

Methode zur Optimierung der Migration von ETCS

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: **Christoph Lackhove**

aus (Geburtsort): **Bietigheim-Bissingen**

eingereicht am 10.05.2013

mündliche Prüfung am 02.10.2013

Gutachter:

Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder

Vorsitzender:

Professor Dr.-Ing. Christoph Herrmann

2013

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 25

Methode zur Optimierung der Migration von ETCS

Christoph Lackhove

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.25

Braunschweig, im Mai 2014

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:
Christoph Lackhove

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Die länderspezifische Prägung der Eisenbahnleit- und Sicherungstechnik in Europa ist historisch begründet. In der Vergangenheit war der grenzüberschreitende Verkehr nur mit erheblichem Aufwand möglich, so dass Ende der achtziger Jahre der Gedanke eines einheitlichen europäischen Zugbeeinflussungssystems (ETCS) Formen annahm. Mittlerweile hat dieses System nicht nur die technische Einsatzreife erreicht, sondern es wurden auch erste kommerzielle Projekte in Europa realisiert. Dennoch ist es zum einen aufgrund des erheblichen Investitionsbedarfs nicht verwunderlich, dass sich die Migration von der bestehenden Alttechnik zu einem einheitlichen europäischen Zugbeeinflussungssystem schwierig gestaltet. Zum anderen ist zu beachten, dass aufgrund der hohen Komplexität der Randbedingungen eine optimierte Migration vor dem Hintergrund der technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und politischen Anforderungen kaum möglich scheint.

Der vorliegende Band stellt eine Methodik vor, mit der ein optimiertes Prozessmodell für die Migration von ETCS entwickelt werden kann. Die formale Problembeschreibung und die Generierung geeigneter Bewertungs- und Optimierungsmethoden stellt dabei die Grundlage für eine transparente und nachvollziehbare Migrationsstrategie dar. Dabei werden Migrationsstrategien erstmalig in ihrer gesamten Komplexität betrachtet und behandelbar. Es wird ein Ansatz entworfen, der die Optimierung der Migration von ETCS auch in großen Netzen unter Berücksichtigung eines optimierten Kosten-Nutzen-Verhältnisses ermöglicht. Dadurch wird ein koordiniertes und abgestimmtes Vorgehen bei der Einführung von ETCS unterstützt, wie es für einen wettbewerbsfähigen Schienenverkehr in Europa benötigt wird.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort des Autors

„Der Schienenverkehr bietet ein janusköpfiges Bild von Modernität und Altertümlichkeit.“
(Weißbuch - Die europäische Verkehrspolitik bis 2010, S. 28, EU-Kommission 2001)

Mit diesem Zitat habe ich 2007 meine Diplomarbeit begonnen und mich auch weiterhin davon anspornen lassen. Die vorliegende Arbeit stellt die Formalisierung und Optimierung des Migrationsprozesses neuer Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik dar, die ich im Rahmen meiner Tätigkeiten als studentische Hilfskraft, Diplomand und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssystemtechnik im DLR e.V. erarbeitet habe.

Bereits während meiner Zeit als studentische Hilfskraft habe ich meine Kollegen Jacob Kohlruss und Benedikt Scheier im „Praktikantenkeller“ kennen und schätzen gelernt. In vielen (teils hitzigen aber immer großartigen) Diskussionen habe ich nicht nur mein Bahnwissen auf die Probe stellen müssen und bin dabei nachher immer schlauer gewesen als vorher. Ein Dank gilt Dr. Miroslav Obrenovic, der mich als Student betreute und einstellte. Hervorheben möchte ich auch die Unterstützung und Motivation durch Dr. Bärbel Jäger und Dr. Michael Meyer zu Hörste. Meine spätere Gruppenleiterin Prof. Katja Gutsch ließ mich meine Forschungsarbeiten weiterführen und unterstützte mich nach Kräften. Die Diskussionen mit Thomas Böhm als meinem langjährigen Büronachbarn und Gruppenleiter waren nicht nur für die Optimierung der implementierten Suchstrategien ein wichtiger Beitrag, ihm gilt mein großer Dank. Genauso danken möchte ich Dr. Malte Hammerl für das Korrekturlesen, die Anregungen und das offene Ohr als Leidensgenosse. Wichtige Begleiter waren auch die anderen Mitglieder unseres Promotionsstammtisches Katrin Lüddecke, Frederike Feldmann: „Promotion Locomotion!“. Hier konnte ich Ideen schon im frühen Stadium kritisch diskutieren. Auch Dr. Markus Pelz gilt für Rat und Tat mein Dank. Von den von mir betreuten Studenten möchte ich Liang Bo und Christian Jurischka erwähnen. Sie haben mit ihrem hervorragenden Einsatz und sehr guten Ergebnissen wichtige Aspekte des Themas beleuchtet. Danken möchte ich an dieser Stelle auch Dr. Christoph Gralla, der bereits meine Diplomarbeit unterstützt und gefördert hat. Für regelmäßige Kurzurlaube im Proberaum möchte ich Florian Brinkmann, Frederike Jathe und Dennis Mey danken. Krachtherapie sollte es auf Rezept geben, Oder So.

Danken möchte ich meiner Prüfungskommission, Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Eckehard Schnieder und meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer. Sie haben die Prüfung ermöglicht, ihre Kommentare haben meine Arbeit weiter reifen lassen.

Besonders möchte ich meinen Eltern danken, die mich immer unterstützt und an mich geglaubt haben. Sie sind große Vorbilder für mich. Der größte Dank gilt meiner geliebten Familie, die immer an meiner Seite steht, mir auch über die langen Durststrecken Kraft und Motivation gibt hat und dennoch häufig zurückstecken musste: meinen Söhnen Moritz und Thies, ganz besonders meiner Frau Andrea. Sie hat den größten Teil der Belastungen getragen und bei der Textkorrektur unersetzbares geleistet. An sie wende ich mich als erstes und sie gibt mir den wichtigsten Rat. Ohne sie an meiner Seite hätte ich diese Arbeit nicht fertigstellen können.

Christoph Lackhove

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	ii
Vorwort des Autors	iv
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Kurzfassung	xiii
Abstract	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziele.....	2
1.3 Vorgehen.....	3
2 Stand und Grundlagen der Migration von ETCS	5
2.1 Stand der Forschung	5
2.2 Definition von Technologiemigration	8
2.3 Rechtlicher Rahmen der Migration von ETCS.....	12
2.4 Beschreibung des technischen Umfelds.....	14
2.4.1 Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik allgemein.....	14
2.4.2 Auswahl nationaler Sicherungssysteme (Klasse B Systeme)	16
2.4.3 European Train Control System – ETCS (Klasse A Systeme)	18
2.5 Bewertung von Migrationsszenarien	21
2.5.1 Lebenszykluskostenrechnung.....	22
2.5.2 Investitionsrechnung.....	25
2.5.3 Nutzwertanalyse	26
3 Modellbildung	29
3.1 Grundlagen.....	29
3.1.1 Beschreibungsmittel.....	30
3.1.2 Methode	31
3.1.3 Werkzeuge.....	32
3.2 Modellierung des Migrationsprozesses.....	33
3.2.1 Anwendungsfalldiagramm.....	33

3.2.2	Anforderungen.....	35
3.2.3	Modellierung der Sicherungstechnik	39
3.2.4	Modellierung des Netzwerks.....	42
3.2.4.1	<i>Elemente des zu modellierenden Schienenverkehrsnetzes</i>	43
3.2.4.2	<i>Zuordnung von Teilnetzen zu Ländern</i>	44
3.2.4.3	<i>Modellierung des Streckennetzes</i>	45
3.2.4.4	<i>Modellierung des Verkehrs</i>	48
3.2.4.5	<i>Abbildung eines Schienenverkehrsnetzes</i>	51
3.2.5	Darstellung der Migration.....	51
3.3	Modellierung des strategischen Spielraums.....	56
3.4	Zusammenfassung der vorgestellten Modellierungsmethode.....	61
4	Strategiegenerierung und –optimierung	63
4.1	Optimierungsansatz	64
4.1.1	Netzwerkeffekte als Ausgangspunkt	64
4.1.2	Umfang des strategischen Spielraums	67
4.2	Optimierung der Migrationsrangfolge.....	70
4.2.1	Statischer Ansatz	70
4.2.1.1	<i>Grundlagen des statischen Ansatzes</i>	70
4.2.1.2	<i>Symmetrische Verknüpfungsmatrix</i>	71
4.2.1.3	<i>Asymmetrische Verknüpfungsmatrix</i>	73
4.2.1.4	<i>Minimal spannender Baum als Basis für einen Algorithmus</i>	74
4.2.1.5	<i>Diskussion des statischen Ansatzes</i>	80
4.2.2	Dynamischer Ansatz	81
4.2.2.1	<i>Grundlagen des dynamischen Ansatzes</i>	81
4.2.2.2	<i>Bestimmung der dynamischen Optimierungsfunktion</i>	82
4.2.2.3	<i>Anwendung eines gierigen Algorithmus</i>	87
4.2.2.4	<i>Diskussion des dynamischen Ansatzes</i>	91
4.2.3	Finden von Teilnetzen	92
4.3	Optimierung der Migrationspfade und –ziele	93
4.3.1	Reduzierung der Pfad-Ziel-Kombinationen	93
4.3.2	Optimierung der Migrationspfade.....	97
4.3.3	Gegenüberstellung von Migrationsszenarien	99
4.4	Entwicklung eines Softwaretools zur Migrationsoptimierung – Railonomics®-Migration	101
4.5	Einbeziehung von zeitlichen Planungsvorgaben	103

5 Fallbeispiel	107
5.1 Überblick.....	108
5.2 Modellierung.....	108
5.3 Ansätze zur Optimierung der Migrationsrangfolge.....	115
5.3.1 Niedrige kritische Masse	116
5.3.2 Hohe kritische Masse	119
5.3.3 Differenzierte kritische Masse	122
5.3.4 Diskussion der Ergebnisse zur Optimierung der Migrationsrangfolge	124
5.4 Optimierung der Migrationspfade und –ziele unter Einbeziehung von zeitlichen Planungsvorgaben	128
5.4.1 Umsetzung der Optimierung.....	128
5.4.2 Optimierungsergebnisse	129
5.5 Zusammenfassung des Fallbeispiels.....	134
6 Schlussbetrachtung	136
Abkürzungsverzeichnis.....	139
Symbolverzeichnis	141
Literaturverzeichnis	145
A Anhang.....	151
A.1 SysML Spezifikation	151
A.2 Modellierung der Sicherungstechnik	155
A.3 Optimierung Migrationsrangfolge.....	160
A.3.1 Modellierung	160
A.3.1.1 Symmetrische Verknüpfungsmatrix, Korridor	160
A.3.1.2 Asymmetrische Verknüpfungsmatrix, Korridor	161
A.3.1.3 Symmetrische Verknüpfungsmatrix, Netz.....	162
A.3.1.4 Asymmetrische Verknüpfungsmatrix, Netz.....	163
A.3.2 Ergebnisse	164
A.3.2.1 Korridor, hohe kritische Masse	164
A.3.2.2 Netz, hohe kritische Masse	167

A.3.2.3	Korridor, niedrige kritische Masse.....	169
A.3.2.4	Netz, niedrige kritische Masse	171
A.3.2.5	Korridor, differenzierte kritische Masse	173
A.3.2.6	Netz, differenzierte kritische Masse	175
A.4	Ergebnisse Optimierung Migrationspfade	177
A.4.1	Streckenseitige Doppelausrüstung, Kostenvergleich	177
A.4.2	Streckenseitige Doppelausrüstung, kritischer Pfad.....	177
A.4.3	Parallele Doppelausrüstung, Kostenvergleich	178
A.4.4	Parallele Doppelausrüstung, kritischer Pfad	178
A.4.5	Optimum, Kostenvergleich.....	179
A.4.6	Optimum, kritischer Pfad.....	179

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ebenen der Migration	11
Abbildung 2: Phasen der Migrationsplanung	12
Abbildung 3: Nationaler Umsetzungsplan von ETCS/ERTMS für 2020 von Deutschland [Regierung der Bundesrepublik Deutschland 27. September 2007]	13
Abbildung 4: Allgemeine Struktur der Signaltechnik	14
Abbildung 5: Projektierungsbeispiel ETCS Level 1 Full Supervision (vgl. [Lackhove und Scheier 2010])	20
Abbildung 6: Projektierungsbeispiel für ETCS Level 2 (vgl. [Lackhove und Scheier 2010]).....	21
Abbildung 7: Integrierter Produktlebenszyklus aus Produzentensicht (vgl. [Coenenberg 2003])	23
Abbildung 8: Trade-off zwischen Anfangs- und Folgeauszahlungen aus Kundensicht	24
Abbildung 9: Entscheidung über Trade-off zwischen Lebenszyklusphasen	24
Abbildung 10: Schematischer Ablauf einer Nutzwertanalyse (vgl. [Rinza und Schmitz 1977]) 26	
Abbildung 11: Anwendungsfalldiagramm des Migrationsprozesses	34
Abbildung 12: Anforderungen an die ETCS-Migration	36
Abbildung 13: Funktionale Anforderungen an die Leit- und Sicherungstechnik in Deutschland	38
Abbildung 14: Funktionserfüllung der Sicherungstechnik	39
Abbildung 15: Funktionserfüllung bei der LZB	41
Abbildung 16: Funktionserfüllung bei ETCS Level 2	42
Abbildung 17: Modellierte Elemente des Netzwerks	43
Abbildung 18: Länderspezifische Merkmale und Anforderungen	44
Abbildung 19: Modell der Streckenseite	45
Abbildung 20: Beispielnetz für die Abschätzung zu projektierender ETCS-Komponenten (vgl.[Lackhove und Scheier 2010])	47
Abbildung 21: Modell des Verkehrs	49
Abbildung 22: Beispiel eines Korridors	51
Abbildung 23: Funktionaler Verlauf der Migration	52
Abbildung 24: Zustände während der Migration	53
Abbildung 25: Ablauf der Migration	55
Abbildung 26: Generierung neuer Zustände im strategischen Spielraum	56
Abbildung 27: Zweistufige Suchstrategie für neue Zustände	58
Abbildung 28: Beschreibung und Kodierung zweier Beispielzustände für die Suche nach neuen Zuständen	58

Abbildung 29: Schematische, beispielhafte Darstellung des strategischen Spielraums als Petrinetz.....	60
Abbildung 30: Ablauf der Modellierung des Migrationsprozesses	61
Abbildung 31: Überblick der behandelten Ansätze	63
Abbildung 32: Netzebenen (vgl. [Knieps 2007]).....	64
Abbildung 33: Vorgehen bei der Optimierung.....	67
Abbildung 34: Komplexität eines Beispielkorridors	69
Abbildung 35: Ablaufdiagramm statische Optimierung	75
Abbildung 36: Beispiel einer Verkehrsmatrix.....	76
Abbildung 37: Anzahl der Fahrzeuge, die zwischen Abschnitten geteilt werden	77
Abbildung 38: Streckenkilometer verknüpfter Abschnitte	77
Abbildung 39: Paarweise Summe der Zugkilometer pro Abschnitt	78
Abbildung 40: Symmetrische Verknüpfungsmatrix, Markierung der maximalen Verknüpfung	78
Abbildung 41: Durchführung des symmetrischen Ansatzes, Schritt 3	78
Abbildung 42: Durchführung des symmetrischen Ansatzes, Schritt 9 (letzter)	79
Abbildung 43: Asymmetrische Verknüpfungsmatrix, Markierung der maximalen Verknüpfung	79
Abbildung 44: Durchführung des asymmetrischen Ansatzes, Schritt 3	80
Abbildung 45: Durchführung des asymmetrischen Ansatzes, Schritt 9 (letzter).....	80
Abbildung 46: Ablaufdiagramm 2-stufige dynamische Optimierung	89
Abbildung 47: Ablaufdiagramm 1-stufige dynamische Optimierung	90
Abbildung 48: Randbedingungen der Beispielmigration	95
Abbildung 49: Strategische Optionen der Beispielmigration.....	96
Abbildung 50: Erstellung der monetären Bewertung von Migrationsstrategien	98
Abbildung 51: Ablauf der Optimierung der Pfade und Ziele.....	99
Abbildung 52: Modellierung eines Beispielkorridors	101
Abbildung 53: Ablauf der automatisierten Optimierung der Migrationspfade und -ziele	102
Abbildung 54: Berücksichtigung zeitlicher Vorgaben für die Optimierung.....	104
Abbildung 55: Vorgehen des Fallbeispiels, Validierung der Optimierungsmethode	107
Abbildung 56: Streckentopologien des Fallbeispiels.....	109
Abbildung 57: Bahnhofstopologien des Fallbeispiels.....	109
Abbildung 58: Bewertung der Algorithmen bei niedrigen kritischen Massen.....	117
Abbildung 59: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei niedriger kritischer Masse, Korridor	117
Abbildung 60: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei niedriger kritischer Masse, Netz.....	118
Abbildung 61: Verlauf der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei niedriger kritischer Masse, Korridor.....	118

Abbildung 62: Verlauf der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei niedriger kritischer Masse, Netz	118
Abbildung 63: Bewertung der Algorithmen bei hohen kritischen Massen	119
Abbildung 64: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei hoher kritischer Masse, Korridor	120
Abbildung 65: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei hoher kritischer Masse, Netz	120
Abbildung 66: Verlauf der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei hoher kritischer Masse, Korridor	121
Abbildung 67: Ausschnitt des Verlaufs der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei hoher kritischer Masse, Korridor	121
Abbildung 68: Verlauf der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei hoher kritischer Masse, Netz	121
Abbildung 69: Bewertung der Algorithmen bei differenzierten kritischen Massen, Korridor	122
Abbildung 70: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei differenzierter kritischer Masse, Korridor	123
Abbildung 71: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei differenzierter kritischer Masse, Netz...	123
Abbildung 72: Verlauf der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei differenzierter kritischer Masse, Korridor.....	123
Abbildung 73: Verlauf der Zugkilometer alleinig auf ETCS bei differenzierter kritischer Masse, Netz	124
Abbildung 74: Vergleich der Optimierungsergebnisse der Algorithmen, gesamt.....	125
Abbildung 75: Vergleich der Ergebnisse für Korridor und Netz.....	125
Abbildung 76: Vergleich der Optimierungsergebnisse, Korridor	126
Abbildung 77: Vergleich der Optimierungsergebnisse, Netz.....	126
Abbildung 78: Schwankung der Ergebnislänge der Algorithmen	127
Abbildung 79: Ergebnisvergleich der optimierten Migrationspfade	130
Abbildung 80: Gegenüberstellung der Streckenausrüstungen.....	131
Abbildung 81: Gegenüberstellung der Fahrzeugausrüstungen	132
Abbildung 82: Einfluss der Strategieänderung auf die Migrationskosten der Parteien	132
Abbildung 83: Von EIU favorisierte Migrationsstrategie, Parallelausrüstung, kritischer Pfad	133
Abbildung 84: Von EVU favorisierte Migrationsstrategie, Optimum aus Handlungsspielraum, kritischer Pfad.....	134
Abbildung 85: Funktionserfüllung bei der PZB	155
Abbildung 86: Funktionserfüllung bei der ATB	156
Abbildung 87: Funktionserfüllung bei ETCS Level 1 LS.....	157
Abbildung 88: Funktionserfüllung bei ETCS Level 1 FS.....	158
Abbildung 89: Funktionserfüllung bei ETCS Level 3	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Funktionen ausgewählter Klasse B Systeme	16
Tabelle 2: Übersicht der Funktionen der Application Level von ETCS (vgl. [Jahnsen et al.])	18
Tabelle 3: Abschätzung der Hard- und Software verschiedener Projektierungsszenarien für Abbildung 20	47
Tabelle 4: Modellierung der Streckenabschnitte des Fallbeispiels	110
Tabelle 5: Angenommene kritische Massen für die Optimierungsszenarien	111
Tabelle 6: Modellierung des Beispielkorridors	112
Tabelle 7: Modellierung des Beispielnetzes	113
Tabelle 8: Abschätzung der Projektierung und der Kosten	114
Tabelle 9: Modellierte Kostensätze des Fallbeispiels	114
Tabelle 10: Modellierte Umrüstkapazitäten des Fallbeispiels.....	115
Tabelle 11: Höchstbewertete Optimierungsansätze für die Szenarien	124
Tabelle 12: Ergebnisse der optimierten Migrationspfade	130

Kurzfassung

Die Einführung von ETCS als einheitliches, europäisches Zugsicherungssystem soll die Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahn gegenüber den anderen Verkehrsträgern sichern. Bei der Einführung, Migration genannt, darf der laufende Betrieb nicht unterbrochen werden. Zusätzlich ergibt sich eine Vielzahl von technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und politischen Randbedingungen, die die Migration zu einer komplexen Planungsaufgabe machen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein auf formalen Methoden basierender Planungs- und Optimierungsansatz vorgestellt, der dem gegebenen Problemumfang gerecht wird.

Basis für die Methodik ist die Erstellung eines Prozessmodells der Migration. Der gesamte Migrationsprozess wird formalisiert und dadurch mit mathematischen Optimierungsmethoden behandelbar. Damit wird die Grundlage für eine transparente und damit bis ins Detail nachvollziehbare Entwicklung von Migrationsstrategien gelegt, wie sie für eine koordinierte und erfolgreiche Durchführung notwendig sind. Für die Modellierung des Migrationsprozesses werden ausgehend von den daran beteiligten Parteien Anforderungen abgeleitet. Durch die Gegenüberstellung von Funktionen und Komponenten kann das Vorgehen bis herunter auf die technische Ebene dargestellt werden. Außerdem werden das zu migrierende Netzwerk und seine Elemente mit Hilfe der System Modeling Language (SysML) als formale Beschreibungssprache abgebildet. Damit liegt für die folgende Optimierung ein ganzheitliches und durchgängiges Modell vor. Durch die Vorgehensweise können Fehler in der Modellierung schnell aufgedeckt werden. Die Entscheidung für eine Strategie wird nachvollziehbar und reproduzierbar. In Anbetracht der Komplexität der Problemstellung ist dieser Punkt besonders hervorzuheben.

Ausgehend von der vorgestellten Modellbildung wird nach einem geeigneten Optimierungsansatz gesucht. Aus der formalen Systembeschreibung und Generierung von Migrationsstrategien wird es so möglich, eine optimale Umsetzung der ETCS-Migration zu ermitteln. Es ist damit eine durchgängige Systematik und Nachvollziehbarkeit von der Aufnahme der Anforderungen an die Migration bei der Modellierung bis hin zur optimierten Strategie gegeben. Dabei wird die Netzwerkökonomik als Ausgangspunkt gewählt und anhand des modellierten Schienenverkehrsnetzes der Umfang der Optimierung ermittelt. Weiterführend wird die sich ergebende Komplexität behandelt und eine gültige Migrationsstrategie erstellt. Zunächst wird dazu die Optimierung der Reihenfolge von Migrationsaktivitäten für eine Maximierung des Nutzens durchgeführt. Eine Detaillierung bis hinunter auf Komponentenebene kann darauf aufbauend ermittelt werden. Die Migrationspfade und -ziele werden unter dem Gesichtspunkt eines optimierten Kosten-Nutzen-Verhältnisses untersucht. Externe Planungsvorgaben bspw. durch Politik oder Gesetzgebung werden anschließend anhand eines iterativen Prozesses integriert.

Der erarbeitete Ansatz wird anhand eines Fallbeispiels validiert. Dabei kann die Praxistauglichkeit und die Qualität des Ergebnisses in einem realistischen Szenario nachgewiesen werden. Der Optimierungsansatz liefert damit einen Beitrag um die neue Eisenbahnsicherungstechnik ETCS erfolgreich national und europaweit einzuführen.

Abstract

The introduction of ETCS as a unified European train control system shall ensure the competitiveness of the rail towards other transport modes. During the introduction, i.e. the migration, the railway has to stay operational. Additionally, there are many technical, operational, economical and political constraints. Thus, the planning of the migration becomes a complex task. This thesis introduces a method for planning and optimisation, based on formal methods to handle these challenges.

The base of this method is the creation of a process model of the migration. The whole migration process is formalised. Hence, it can be handled with mathematical optimisation methods. The migration strategies derived from those methods are transparent and comprehensive, as they are needed for a coordinated and successful implementation. For the modelling of the migration process, requirements are derived from the parties taking part in the migration. By comparing function and technical solutions, the strategies can be broken down to the technical level. Furthermore, the rail network to be migrated and its elements are described with the System Modelling Language (SysML) as a formal language. Thus, the model for the following optimisation is holistic and without methodical breaks. By using this procedure, modelling errors are discovered quickly. The decision for a strategy becomes comprehensive and reproducible. Considering the complexity of the task, this point has to be pointed out.

Starting with the presented model, a fitting approach for the optimisation is created. From the formal system description and the generation of migration strategies, the optimised implementation of the ETCS migration can be derived. As the starting point for the optimisation network economics are chosen. Based on the model of the railway network, the complexity of the optimisation is computed. The occurring complexity is handled and a valid migration strategy can be developed. As the first step, the order of the migration activities is optimised in a way that it maximises the use of the railway network. Considering the technical level, costs can be minimised, keeping the maximised use in mind. External planning constraints, e.g. given from the politics, can be included with an iterative process.

The developed approach is validated with a case study. The practical use and the quality of the results can be shown on a realistic scenario. The optimisation approach contributes to the successful introduction of ETCS on a national and European level.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im vereinigten Europa gewinnt der grenzüberschreitende Waren- und Personenverkehr zusehends an Bedeutung. Dabei entwickelt sich das Verkehrsaufkommen stets oberhalb des Wirtschaftswachstums (vgl. [Clausecker und Bönnen 2010]). Somit entsteht eine nicht unerhebliche Belastung der Umwelt, insbesondere durch CO₂-Emissionen und Lärm, hauptsächlich durch den Straßenverkehr. Ohne eine Veränderung des Modal Split zugunsten des Schienenverkehrs können die von der EU verabschiedeten Ziele zur Begrenzung des Klimawandels nicht eingehalten werden (vgl. [Kohl 2009]). Es zeigt sich außerdem, dass ein Wachstum des Schienenverkehrssektors nur durch eine Öffnung des Marktes erreicht wird. Während in Ländern mit einer voranschreitenden Liberalisierung mit dem Wirtschaftswachstum auch das Verkehrsaufkommen auf der Schiene stieg, findet sich in Ländern mit geschlossenen Märkten lediglich eine Zunahme des Straßenverkehrs (vgl. [Clausecker und Bönnen 2010]).

Ein Hauptgrund für die mangelnde Wettbewerbsfähigkeit der Schiene gegenüber der Straße liegt in der Historie der Eisenbahn als nationales Verkehrsmittel begründet. So entwickelten sich innerhalb der Landesgrenzen individuelle Vorgaben und Lösungen für die betrieblichen Regeln, Stromversorgung, Lichtraumprofil, sowie Leit- und Sicherungstechnik, die Hemmnisse für grenzüberschreitende Zugverkehre darstellen. Die EU hat sich entschlossen, diesen Mangel durch die Verabschiedung von verbindlichen Spezifikationen zur technischen Interoperabilität stückweise zu beheben (vgl. [Europäische Kommission 2005]). Ein elementarer Bestandteil davon ist das European Rail Traffic Management System (ERTMS). Es setzt sich in erster Linie aus dem digitalen Funkkommunikationsstandard GSM-R und dem Zugbeeinflussungssystem European Train Control System (ETCS) zusammen. Durch die europaweite Einführung von ETCS soll die Vielfalt an technischen Umsetzungen der Zugbeeinflussungssysteme beendet werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Einführung von ETCS und dem vollständigen Ersatz der Altsysteme.

Da die Einführung von ETCS zum einen im laufenden Betrieb, ohne den Neubau des bestehenden Schienennetzes und möglichst wirtschaftlich erfolgen muss, stellt sie eine besondere Herausforderung dar. Zudem handelt es sich bei der Eisenbahn durch die Verteilung der Infrastruktur und die Leistungserbringung durch dazu komplementäre Fahrzeuge um eine Netzwerktechnologie. Deswegen soll bei der Ablösung der vorhandenen, nationalen Zugbeeinflussungssysteme durch ETCS von einer *Migration*, bzw. einer *Technologiemigration* gesprochen werden. Durch die gegebene Netzwerkstruktur, den unterbrechungsfrei aufrecht zu erhaltenen Betrieb, die Vielzahl technischer und betrieblicher Randbedingungen, insbesondere zwischen den einzelnen Ländern, entsteht ein hochkomplexes Problem. Darüber hinaus sind mit Eisenbahninfrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen, Herstellerindustrie, Gesetzgeber und Behörden viele Parteien beteiligt.

Dieser Komplexität wird bisher weder in der Praxis, noch in der Wissenschaft ausreichend begegnet. Zwar sind Einzelprobleme teilweise sehr gut lösbar, die übergreifende Koordination und Optimierung weist jedoch noch gravierende Mängel auf. Dies zeigt sich insbesondere in

der aktuellen Umsetzung. Zwar gibt es mit den durch die EU festgelegten Transeuropäischen (TEN) Korridoren definierte Strecken und auch Zeitpläne für die Umrüstung. Die Vielzahl der laufenden Projekte sind jedoch nicht oder nur schlecht untereinander koordiniert. Umgerüstete Strecken sind aufgrund unscharfer Spezifikationen oder unterschiedlicher Versionen nicht kompatibel miteinander. Die Migrationspläne auf beiden Seiten nationaler Grenzen sind teilweise nicht aufeinander abgestimmt. Es findet nur eine begrenzte Abstimmung der Migrationsstrategien zwischen Verkehrs- und Infrastrukturunternehmen statt. Diese Arbeit soll durch eine formale Problembeschreibung und die Entwicklung geeigneter Bewertungs- und Optimierungsmethoden einen Beitrag zur Lösung der bestehenden Koordinationsprobleme und damit zu einer erfolgreichen Migration von ETCS leisten. Durch die starke Verknüpfung der beteiligten Parteien und die Neuartigkeit der Technologie ist bei fehlender Koordination keine ausreichende Investitionssicherheit gegeben. Dem soll durch eine transparente und übergreifende Strategiefindung begegnet werden.

1.2 Ziele

Die Arbeit soll einen Ansatz liefern, der die Optimierung und Planung einer netzweiten Migration von ETCS ermöglicht. Der Anspruch ist dabei, die gegebene Komplexität vollständig zu behandeln und keine Beschränkung auf Teilbereiche vorzunehmen. Ausgangspunkt soll die tatsächliche Anzahl an Randbedingungen, Einflussfaktoren und Lösungsmöglichkeiten sein, von der aus eine gezielte und nachvollziehbare Reduktion des Umfangs auf eine praktisch handhabbare Größe geschieht. Durch methodisches Vorgehen soll eine Lösung erarbeitet werden, die nachvollziehbare und reproduzierbare Ergebnisse liefert. Ein besonderer Fokus wird auf die Abhängigkeiten zwischen dem Verkehr der Schienenfahrzeuge und der Schieneninfrastruktur gesetzt.

Um den Lösungsraum ermitteln zu können, wird eine Modellierung des Migrationsprozesses auf Basis von UML vorgenommen. Dabei werden mit Eisenbahninfrastruktur und Eisenbahnverkehrsunternehmen, Bahnindustrie, Behörden und Politik die wichtigsten Beteiligten einbezogen. Die Erfassung der jeweils herrschenden Randbedingungen wird durch die tatsächliche Modellierung des zu migrierenden Streckennetzes oder Korridors sowie des darauf abgewickelten Verkehrs erreicht. Auftretende Netzwerkeffekte werden direkt abgebildet und für die Optimierung der Migrationsstrategie verwendet.

Es ist nicht abzusehen, dass es eine für alle Parteien gleichermaßen zufriedenstellende Lösung geben wird. Um zwischen den Positionen vermitteln zu können, soll eine Optimierung der Migration aus verschiedenen Perspektiven möglich sein. Diese können einander gegenüber gestellt werden, wodurch sich der Verhandlungsspielraum zwischen den Parteien abstecken lässt.

Der Verhandlungsspielraum kann auch mehrere umsetzbare Zielausrüstungen beinhalten. Diese Szenarien können anhand vieler Kriterien, bspw. Migrationsdauer, Höhe der Investitionen oder erbrachte Streckenleistungsfähigkeit, bewertet werden. Es wird also notwendig sein, die möglichen Ziele zu ermitteln und sie in Szenarien gegenüber zu stellen.

Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag für die Koordination der beteiligten Parteien durch eine nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage. Durch die entstehende Transparenz kann ein gegenseitiges Einverständnis über die umzusetzende Strategie gefunden und eine verbindliche Vereinbarung darüber getroffen werden. So wird eine schnelle und wirtschaftliche Migration möglich, die Risiken von Fehlinvestitionen werden minimiert. Langfristig wird erwartet, dass damit eine Stärkung des Bahnsektors einhergeht.

1.3 Vorgehen

In Kapitel 2 wird in die Migration von ETCS eingeführt. Dazu wird zunächst ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben und ETCS selbst erläutert. Hier werden auch die verwendeten Methoden zur monetären und nichtmonetären Bewertung von Migrationsszenarien vorgestellt. Die Modellbildung schließt sich in Kapitel 3 an. Insbesondere wird auf die Modellierung der Fahrzeugseite, der Infrastrukturseite, sowie deren Zusammenspiel innerhalb eines abgebildeten Korridors oder Netzes eingegangen. Weitere Aspekte wie die Marktentwicklung, Spezifikation und Zertifizierung werden dargestellt. Die Modellbildung wird mit der Abbildung von Korridoren und Netzwerken abgeschlossen. Nachdem damit alle Werkzeuge vorhanden sind, stellt Kapitel 4 die Generierung, Bewertung und Optimierung von Strategien für eine netzweite Migration von ETCS dar. Nachdem der Umfang des strategischen Spielraums ermittelt wurde, kann zunächst die Reihenfolge der Migrationsschritte anhand von direkten Netzwerkeffekten optimiert werden. Auf dieser Basis findet die folgende Optimierung der Migrationspfade und -ziele statt. Bei realen Projekten wird bereits eine Vielzahl von Planungsvorgaben feststehen. Diese werden in einem iterativen Prozess in die Optimierung einbezogen. Zur Demonstration der entwickelten Methodik wird in Kapitel 5 ein Fallbeispiel erläutert. Auch auf die verschiedenen Optimierungsperspektiven und deren Einfluss auf das Ergebnis wird eingegangen. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit Zusammenfassung und Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder ab.

2 Stand und Grundlagen der Migration von ETCS

Dieses Kapitel stellt den Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit dar. Dazu wird zunächst in Abschnitt 2.1 ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben. Für das Verständnis des verwendeten Migrationsbegriffs wird in Abschnitt 2.2 eine Definition vorgenommen. Dabei wird die Bedeutung der Vernetzung einer Technologie in den Mittelpunkt gestellt. So wird sichergestellt, dass der bei der Migration von ETCS vorzufindenden Komplexität angemessen begegnet wird. Über die Begriffsdefinition hinaus ist eine eingehende Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes, der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik ETCS, notwendig. Sie wird in Abschnitt 2.4 vorgestellt. Damit wird sowohl die Problemstellung als auch die konkrete technische Ausgestaltung beschrieben. Aus dem Ansatz sollen sich konkrete Handlungsempfehlungen ableiten und begründen lassen. Entsprechend müssen die für eine Bewertungsgrundlage und Optimierung der Migration verwendeten Kriterien erläutert werden. Dies geschieht in Abschnitt 2.5. Damit liefert dieses Kapitel die Grundlagen und Definitionen für das weitere Vorgehen. Darauf aufbauend wird dann im folgenden Kapitel 3 die Voraussetzung für die Problemlösung geschaffen.

2.1 Stand der Forschung

Im Folgenden wird der Stand der Forschung zur ETCS-Migration und angrenzenden Feldern dargestellt. Die vorhandenen Ideen werden weitergeführt und als Ausgangspunkt für den in dieser Arbeit entwickelten Ansatz verwendet.

Stephan beschäftigt sich in [Stephan 1999] mit Migrationsstrategien für die (Prozess-) Leittechnik. Große Industrieproduktionsanlagen, bspw. in der chemischen Industrie, sind durch ihre hohen Investitionen und die damit verbundene lange Lebensdauer nach und nach von der beschleunigten Entwicklung aktueller Prozessleitsysteme abgekoppelt. Die schrittweise Erneuerung bestehender Anlagen stellt deswegen eine große Herausforderung dar. Stephan stellt eine Methodik zur Erfassung des zu migrierenden Systems mittels der von Lauber in [Lauber 1996] entwickelten Methode zur funktionalen Beschreibung und Analyse von Produktionsprozessen vor. Er bildet die Anforderungen an das zu beschaffende Neusystem ab. Damit bietet sich die Möglichkeit zur gezielten Ausgestaltung und Beurteilung des Neusystems. Die tatsächliche Ausgestaltung eines optimalen Migrationspfades findet allerdings nicht statt.

Die Autoren Bicker und Schroeder befassen sich in [Bicker und Schroeder 2002] mit einer methodische Anforderungsanalyse und dem automatischen Entwurf sicherheitsrelevanter Eisenbahnleitsysteme mit kooperierenden Werkzeugen. Für diese Arbeit ist in erster Linie der von Schroeder verfasste Teil zur Anforderungsanalyse relevant. Insbesondere werden die Migration des neuen Systems in bestehende Systeme, sowie strategische Anforderungen formuliert. Neben der Identifikation von unterschiedlichen Migrationstreibern für Fahrzeug- und Streckenseite, wird eine Bewertungsmethodik erläutert. Es werden Empfehlungen für den erfolgreichen Verlauf einer Migration gegeben, insbesondere wird auf die Aspekte des Netzzugangskriteriums und der Trassenpreise eingegangen. Ein direkter Ansatz zur Optimierung der Migration wird jedoch nicht vorgestellt.

Vor allem der Telekommunikationssektor beschäftigt sich eingehend mit dem Thema Migration. Gerade bei großen Rechenzentren liegt bei Systemwechseln eine Herausforderung vor, die systematisch gelöst werden muss. Für die Migration von Hard- und Software bei staatlichen Behörden wurde vom Bundesministerium des Innern mit [KBSt 2003] einen Leitfaden herausgegeben. Dabei wird zwischen einer harten Migration, d.h. dem Aufbau paralleler Strukturen und der Umschaltung „über Nacht“, und einer weichen, d.h. schrittweisen Migration unterschieden. Die Migrationsprozesse im IT-Bereich in der Leit- und Sicherungstechnik der Eisenbahn sind jedoch nicht direkt vergleichbar. Hinsichtlich der Systemlebensdauer, des Migrationszeitraums, der Anzahl erfolgskritischer Einflussfaktoren sowie der Komplexität und entsprechend auch der Kostendimension bestehen auf Seiten der Leit- und Sicherungstechnik deutlich höhere Anforderungen. Daraus ist ersichtlich, dass die erprobten Methoden aus der Migration im IT-Bereich nicht einfach übernommen werden können.

Meyer zu Hörste verwendet in [Meyer zu Hörste 2003] formale Methoden zur Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. Aus der Modellierung der Infrastruktur, der Fahrzeugdynamik, des Fahrzeugführers und des Leit- und Sicherungssystems werden generische Funktionen abgeleitet. Diese betreffen die Sicherung, die Disposition und die Betriebsführung. Als Ergebnis entsteht ein generisches, formales Referenzmodell auf Basis von Petri-Netzen. Es bietet die Möglichkeit eines technikneutralen Vergleichs verschiedener Leit- und Sicherungstechniksysteme, insbesondere im Hinblick auf die Neuentwicklung und Migration. Die Methode liefert einen Ansatz für die Validierung, Verifizierung und den Sicherheitsnachweis von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. Für die vorliegende Arbeit ist die grundsätzliche Orientierung an formalen Methoden und insbesondere für die Integration von fahrzeugseitiger und streckenseitiger Sicht von großem Einfluss.

Von Holzhausen wird in [Holzhausen 2004] die Durchsetzung neuer Antriebstechnologien bei Automobilen behandelt. Auf Basis von netzwerkökonomischen und spieltheoretischen Betrachtungen wird untersucht, wann sich neue Technologien durchsetzen. Dabei wird insbesondere auf die Einführung von Wasserstoffantrieben und ein dafür notwendiges Tankstellennetz eingegangen. Der Fokus liegt auf den am Markt durch Käufer und Industrie getroffenen Entscheidungen und der politischen Möglichkeiten zur Förderung von alternativen Antriebstechnologien.

In der Diplomarbeit von Lackhove (vgl. [Lackhove 2007]) wird die Modellierung der Einflussparameter für die Strategiewahl bei der Migration neuer Systeme der Produktionssteuerung im Eisenbahnbetrieb beschrieben. Insbesondere wird dabei die ETCS-Migration behandelt. Randbedingungen und Einflussparameter werden verwendet, um zulässige Migrationsstrategien abzuleiten. Außerdem wird ein Ansatz zur Optimierung anhand der kritischen Masse vorgestellt. Die Vorschläge reichen allerdings noch nicht aus, um die Optimierung in größeren Netzen durchzuführen. Die zu betrachtende Datenmenge wächst exponentiell und wird nicht reduziert oder weiter behandelt. Außerdem ist kein Optimierungsalgorithmus vorgeschlagen.

Knollmann beschäftigt sich in [Knollmann 2007] mit der Erstellung UML-basierter Testfall- und Systemmodelle für die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik. Zunächst erfolgt eine ausführliche Darstellung von Modellen und Systembeschreibungen. Es wird auf Beschreibungsmittel sowie die Unified Modeling Language (UML) und ihre Profile System Modeling Language (SysML) und UML 2 Testing Profile (U2TP) eingegangen. Sie werden in den Entwicklungspro-

zess eingebunden und insbesondere die Bedeutung einer durchgängigen Modellierung beginnend mit der Aufnahme der Kundenanforderungen über die Entwicklung hin zum Testen herausgestellt. System- und Testfallbeschreibung werden in UML verknüpft und es wird eine Fallstudie erstellt. Für die vorliegende Arbeit ist die Wahl der UML zur Modellierung des zu migrierenden Systems sowie des Migrationsprozesses selbst von großer Bedeutung. So soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse und ihre Nachvollziehbarkeit ermöglicht werden.

Gralla behandelt in [Gralla 2009] die Migration zu ETCS aus Sicht eines Eisenbahnverkehrsunternehmens. Es werden Einflussfaktoren auf das Migrationsergebnis identifiziert. Anschließend werden die Wirkzusammenhänge zwischen den Faktoren dargestellt und gewichtet. Das Ergebnis ist eine Untersuchungskette zur Bestimmung der optimalen Migration. Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die ausgewählten und gewichteten Einflussfaktoren von Bedeutung. Bei der entwickelten Methode wird keine Betrachtung des möglichen Umfangs einer solchen Untersuchung zur Findung der optimalen Strategie vorgenommen. Dementsprechend findet sich auch keine Strategie, mit der der theoretischen Anzahl von alternativen Szenarien begegnet werden kann.

Achilles behandelt in [Achilles 2008], bzw. [Achilles 2009] die Migration von ETCS aus dem Blickwinkel eines wirtschaftlichen Produktlebenszyklus. Dazu wird der gesamte Markt für Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik anhand von Streckenkategorien abgebildet. Über die Annahme von Einzelentscheidungen für die Ausrüstung der jeweiligen Streckenkilometer kann ermittelt werden, ob sich ein System, in diesem Fall ETCS, gegen bestehende Konkurrenz durchsetzt. Dabei wird die kritische Masse an ausgerüsteten Fahrzeugen und Streckenkilometern verwendet. Grundlage der Einzelentscheidungen sind die Verbreitung des Systems und die damit verbundene Fahrweite entsprechend ausgerüsteter Fahrzeuge. Einfluss auf die vorliegende Arbeit hat die Formulierung von Netzwerkeffekten zur Beschreibung der Migration. Die Arbeit stellt Zusammenhänge zwischen den Streckenkategorien und den Verkehrsarten wie Güter- oder Hochgeschwindigkeitsverkehr her, allerdings wird nicht die Topologie des Streckennetzes selbst abgebildet. Somit können Aussagen über Marktentwicklungen, insbesondere auch Preise, gemacht werden, konkrete Handlungsempfehlungen im Sinne eines Umrüstplans lassen sich jedoch nicht ableiten.

Obrenovic entwickelt in [Obrenovic 2009] zunächst ein Phasenmodell für die Migration der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik. Demnach durchläuft die Migrationsplanung zunächst die Systembeschreibung und die Systemvorselektion. Anschließend werden auf strategischer, taktischer und operativer Ebene Migrationsstrategien entwickelt, die aufeinander aufbauen und abgestimmt sind. Die gefundenen Strategien werden anhand von Kosten und Zeitdauer bewertet, bevor eine Selektion anhand von monetären und nicht-monetären Kriterien im Rahmen einer erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse stattfindet. Das von Obrenovic vorgestellte Phasenmodell liegt auch dieser Arbeit zugrunde. Allerdings findet sich ähnlich wie bei [Gralla 2009] keine Untersuchung über die tatsächliche Anzahl an strategischen Alternativen und die Frage, wie darin ein Optimum gefunden werden soll.

Das mit der Migration von ETCS verwandte und verknüpfte Feld der Einführung von GSM-R behandelt unter anderem ein Fachartikel (vgl. [Sedello und Potthoff 2009]). Darin wird auf die Notwendigkeit einer systematischen Vorgehensweise hingewiesen, insbesondere auf die Ge-

fahren einer Verengung des Blickwinkels auf rein technische Fragestellungen und die Vernachlässigung von betrieblichen Aspekten.

Die Einführung von FlexCargoRail als neue Technologie in der Eisenbahnbranche wird in mehreren Artikeln betrachtet, unter anderem in [Dickenbrock et al. 2009] und [Kochsiek 2009]. Dabei handelt es sich um selbstangetriebene Güterwaggons, die per Funk gesteuert werden können. Als Anwendung werden vor allem der Gütereinzelwagenverkehr, sowie Zustell- und Sortiervorgänge gesehen. Interessant ist dabei, dass ein eingegrenztes Segment für eine mögliche Einführung gewählt wurde. Bewusst wurde darauf verzichtet ein Szenario zu entwickeln, in dem sämtliche im Verkehr befindliche Güterwaggons zu ersetzen wären. Das Konzept gestaltet sich derart, dass bereits eine kleine, in bewusst gewählten Bereichen eingesetzte Anzahl von Wagen erfolgsversprechend ist. Damit wurden die Schwierigkeiten einer umfassenden, sektorweiten Einführung erkannt und bewusst umgangen.

Ein anschauliches Beispiel für die Schwierigkeiten der Einführung neuer Technologien in den Eisenbahnsektor ist der Ersatz der manuellen durch die vollautomatische Kupplung im Güterverkehr. Duchemin behandelt dieses Thema in einem Fachartikel (vgl. [Duchemin 2009]). Es werden die Rückständigkeit des aktuell verbreiteten Systems und die Vorteile der vollautomatischen Kupplung erläutert. Der Autor plädiert für einen erneuten sektorweiten Einführungsversuch und gibt Ansatzpunkte für eine mögliche Strategie.

Bei der Untersuchung des Stands der Forschung wird deutlich, dass sich auch andere Domänen und angrenzende Bereiche mit Migrationsproblematiken befassen. Es gibt ausführliche Ansätze zur Bewertung und zur Optimierung von Teilaspekten. Die Problematik der ETCS-Migration wird dabei nicht in ihrer Gesamtheit erfasst. Dementsprechend findet keine Erfassung der tatsächlich vorliegenden Komplexität statt. Es ist bisher noch keine Antwort darauf zu finden, wie eine optimale Strategie zur flächendeckenden Einführung von ETCS und vollständigen Ablösung der vorhandenen Altsysteme im Detail zu gestalten ist. Dabei ist zu bemerken, dass in der Praxis häufig anzutreffende Migrationsaufgaben, insbesondere bei Rechenzentren und Produktionsanlagen, in Umfang und Komplexität kaum mit der europaweiten Einführung eines einheitlichen Zugbeeinflussungssystems zu vergleichen sind. Es liegen deutliche Unterschiede in der Sicherheitsrelevanz, der Großflächigkeit der Systemverteilung und der Anzahl der beteiligten Parteien vor.

2.2 Definition von Technologiemigration

In der vorangegangenen Darstellung des Stands der Forschung sind unterschiedliche Aspekte und Auffassungen über den Begriff der Migration deutlich geworden. Um innerhalb dieser Arbeit eine eindeutige Begriffswelt einzuführen, wird im Folgenden der Begriff der Technologiemigration definiert. Die weiteren Ausführungen dieser Arbeit greifen auf diese Definition zurück. Es wird auch beschrieben, wodurch sich ein Migrationsprozess von einer klassischen Produkteinführung unterscheidet.

Die Umstellung eines veralteten Systems auf seinen Nachfolger ohne den Betriebsprozess zu unterbrechen wird Technologiemigration genannt. Dabei wird aus dem lateinischen *migrare*, „(aus-)wandern“ oder „sich verändern“, deutlich, dass es sich um einen im wahrsten Sinne

des Wortes schrittweisen Vorgang handelt. Über verschiedene Migrationspfade oder -wege soll das Migrationsziel optimal erreicht werden. (Vgl. [Stephan 1999])

Diese Arbeit setzt den Fokus insbesondere auf verteilte Systeme, also Netzwerke. Sie sollen hier aus Sicht der Netzwerkökonomik erläutert werden. Anhand dieser Betrachtungsweise wird die Problematik der Technologiemigration deutlich. Netzwerkmärkte zeichnen sich insbesondere dadurch aus, dass sie ihren Nutzen mit der Anzahl an Teilnehmern oder Elementen steigern (vgl. [Katz und Shapiro 1985]). Von einem Netzwerkgut wird gesprochen, sobald Netzwerkeffekte für den Nutzen vorliegen. Wird der Nutzen alleinig durch das Netzwerk bestimmt, liegt ein Systemgut vor. Netzwerkmärkte, auf denen Güter mit Netzwerkeffekten vorliegen, besitzen nach Shy (vgl. [Shy 2006]) folgende Eigenschaften:

- Komplementarität und Kompatibilität der gehandelten Güter,
- vereinbarte oder am Markt etablierte Standards,
- externe Effekte, welche sich durch den Konsum der Güter ergeben,
- „Switching Costs“ und „Lock-In“-Effekte
- signifikante Skalenerträge in der Produktion.

Komplementäre Güter erbringen in ihrer Kombination einen höheren Nutzen als wenn sie einzeln verwendet werden. Dies kann auch bedeuten, dass sie nur bei gemeinsamer Verwendung einen Nutzen generieren. Für die Kombination der Güter ist deren Kompatibilität eine Voraussetzung. Sie wird durch Standards sichergestellt. Es wird zwischen De-facto-Standards, welche sich am Markt durchgesetzt haben, und De-juri-Standards, welche gesetzlich vorgeschrieben sind, unterschieden (vgl. [Ehrhardt 2001]). Je stärker der Netznutzen ausgeprägt ist, desto höher ist das Standardisierungspotenzial (vgl. [Müller 2005]). Beim Umstieg von einem bestehenden in ein neues Netzwerk beschreibt der „Lock-In“-Effekt die Stärke der Bindung an das bestehende Netzwerk. „Switching Costs“ sind die dabei entstehenden Kosten. Diese Effekte werden bspw. durch Verträge oder langfristige, bereits im alten Netzwerk getätigte Investitionen hervorgerufen.

Der Zwang zum unterbrechungsfreien Übergang von Alt- zu Neusystem kann so begründet werden, dass der Gesamtnutzen des Netzwerkes sofort massiv vermindert wird, wenn durch die neue Technologie keine Kompatibilität zur Verfügung gestellt wird. Es würden während der Migration zwei nebeneinander existierende Netze entstehen, die für sich genommen jedoch kleiner sind als das ursprüngliche Netz. Dies ist problematisch, da der Nutzen gerade von der Größe, also der Anzahl der Nutzer, abhängt. Im schlimmsten Fall kann dies das generelle Ende der Technologie am Markt bedeuten. Das wird insbesondere dann eintreten, wenn die in der Netzwerkökonomik beschriebene kritische Masse nicht erreicht wird. Dies ist die Menge an Nutzern eines Netzwerkes die benötigt wird, damit sich dessen Ausbreitung von selbst trägt (vgl. [Shy 2006]). Ab diesem Punkt bietet der Nutzen genug Anreize, sich für das Netzwerk zu entscheiden. Bevor dieser Zustand erreicht wird, ist ausschlaggebend, welche Netzgröße in Zukunft erwartet wird. Es muss entscheidende Gründe geben, die aus Sicht des Einzelnen für eine Durchsetzung der Netztechnologie sprechen. Dafür sind u. a. ein einheitlicher Standard und ein Zielnutzen, der über dem des aktuellen Systems liegt, notwendig.

Daraus wird für die vorliegende Arbeit folgende Definition von Technologiemigration festgelegt:

Definition I: Technologiemigration

Eine Technologiemigration liegt vor, wenn die Erneuerung eines Systems ohne Unterbrechung des Produktionsvorgangs vollzogen werden muss. Solche Systeme zeichnen sich durch ausgeprägte Netzwerkeffekte aus. Dies kann auch in einem ausgeprägten Schnittstellencharakter zu Umsystemen begründet sein.

So ist das Thema gerade im IT-Sektor und in der Prozessleittechnik von Relevanz. Die Migration von Rechenzentren oder Industrieanlagen muss systematisch gelöst werden. Das Bundesministerium des Innern hat einen Leitfaden herausgegeben, nach dem die Hard- und Softwaremigration der staatlichen Behörden vollzogen werden soll (vgl. [KBSt 2003]), die Migration in der Leittechnik wird bspw. in [Stephan 1999] behandelt. Die Ziele und Anreize einer Technologie-Migration sind dabei stets sehr ähnlich (vgl. [Europäische Kommission 2005]):

- Produktivitätsgewinn,
- Kostenminimierung,
- Funktionserweiterung,
- Vereinheitlichung von Systemkomponenten zur besseren Wartung, Instandhaltung und Beschaffung,
- das Ende des technischen oder betriebswirtschaftlichen Lebenszyklus der alten Anlage,
- das Ende von Wartungs- und Serviceunterstützung der alten Anlage,
- die Änderung gesetzlicher Vorgaben.

Allerdings bestehen zwischen der Migration im IT-Bereich und der Migration in der Leit- und Sicherungstechnik im System Bahn signifikante Unterschiede was die Lebensdauer der Systeme, die Dauer der Migration, die Anzahl von Einflussfaktoren auf den Migrationserfolg sowie die Komplexität und damit die Kostendimension betrifft. So ist bei der Umstellung der IT-Systeme einer Behörde das Erreichen des Break-Even-Punkts nach drei bis fünf Jahren realistisch (vgl. [KBSt 2003]). Dagegen liegen die Kosten für eine übergreifende Ausrüstung der transeuropäischen Netze bei geschätzten 5 Mrd. €, verteilt über einen Zeitraum von zehn bis zwölf Jahren (vgl. [Europäische Kommission 2006]).

Die Planung der ETCS-Migration kann in drei Ebenen unterteilt werden, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die oberste, strategische Ebene betrifft die Planung durch die Europäische Union sowie die Abstimmung mit den Konsortien der Bahnindustrie. Hier werden sowohl das grundsätzliche Ziel, als auch der technische Standard formuliert und abgestimmt. Darunter, auf der taktischen Ebene, liegt die Koordination der Migration auf den jeweiligen Streckenkorridoren. Sie findet zwischen den beteiligten Bahn- und Infrastrukturunternehmen statt. Auf operativer Ebene muss jedes Unternehmen für sich die Planung und Umsetzung bis ins Detail vorneh-

men. Dabei müssen das Vorgehen und die Planung auf den unteren Ebenen mit den höheren im Einklang stehen. (Vgl. [Obrenovic 2009])

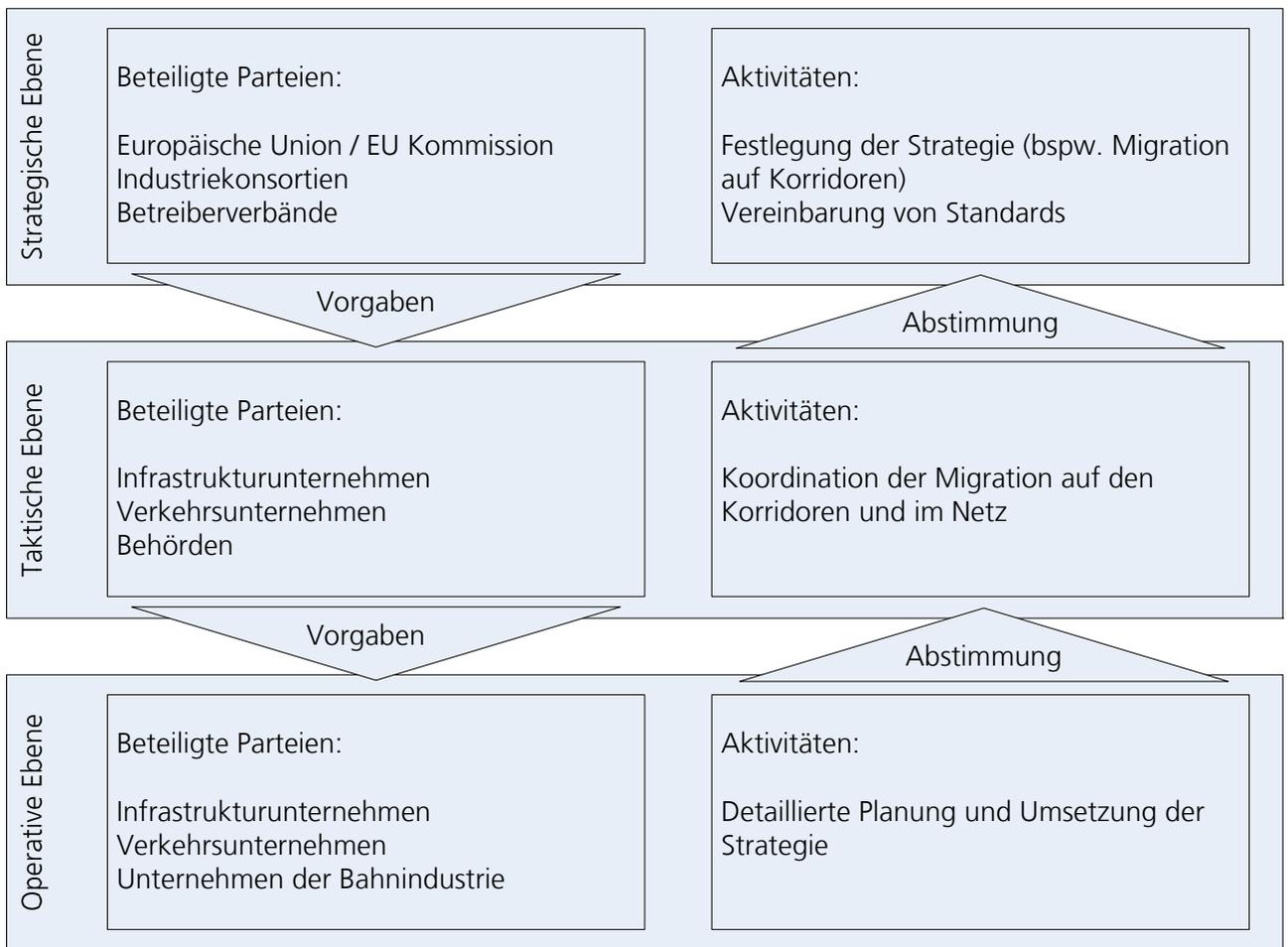


Abbildung 1: Ebenen der Migration

Der Planung des Migrationsprozesses in der Leit- und Sicherungstechnik kann in vier Phasen unterteilt werden (vgl. [Obrenovic und et al. 2005]), vgl. Abbildung 2:

1. Systemmodellierung,
2. Systemselektion,
3. Entwicklung von Migrationsszenarien,
4. Bewertung von Migrationsszenarien.

Hierbei stellen die Systemmodellierung und die Systemselektion Phasen in der Produktentwicklung unter Berücksichtigung der späteren Migration dar. Für die Planung der Migration sind Entwicklung und Bewertung von Migrationsszenarien notwendig. Bei der Systemmodellierung werden zunächst die potenziellen Zielsysteme herausgearbeitet. Daraus wird in der Phase der Systemselektion ein Zielsystem ausgewählt. In der folgenden Phase, der Entwicklung von Migrationsszenarien, sollen mögliche Wege zur Einführung der neuen Technologie gefunden werden. Dies sind die angesprochenen Migrationspfade oder -wege.

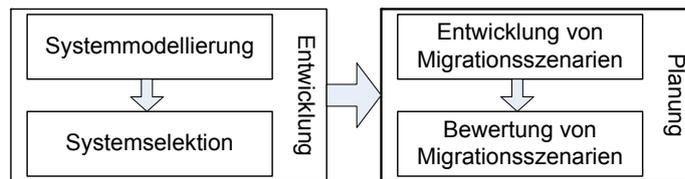


Abbildung 2: Phasen der Migrationsplanung

Zusammenfassend wird von einer Migration gesprochen, wenn bei dem einzuführenden Produkt starke Netzwerkeffekte vorliegen. Die Motivation für Migrationsprojekte ist stets ähnlich. Sie ist häufig entweder in der Abgängigkeit des Altsystems oder stark geänderten Anforderungen begründet. Die Migration selbst verläuft von Ausgangszustand über einen Migrationspfad hin zu einem Migrationsziel.

2.3 Rechtlicher Rahmen der Migration von ETCS

Die Einführung von ETCS in Europa findet auf einer rechtlichen Grundlage statt, die hier kurz erläutert wird. Daraus ergeben sich nicht nur die einzuhaltenden technischen Spezifikationen, sondern auch verbindliche Zeitpunkte für die Fertigstellung der Ausrüstung definierter Strecken. Außerdem werden die mit der Spezifikation und Zulassung von ETCS Komponenten beauftragten Institutionen genannt.

Um die Wettbewerbsfähigkeit des Schienenverkehrs in Europa gegenüber anderen Verkehrsmodi zu stärken wurden seit Mitte der 1990er Jahre die Liberalisierung des europäischen Eisenbahnmarktes und eine grenzüberschreitende Interoperabilität im Eisenbahnverkehr angestrebt. Im Jahre 2008 wurden alle bis dahin bestehenden Interoperabilitätsrichtlinien der EU-Kommission zur Richtlinie 2008/57/EC zusammengefasst. Dies betraf bspw. die Richtlinien 96/48/EC über das transeuropäische Eisenbahnnetz für Hochgeschwindigkeitsverkehr und 2001/16/EC über konventionellen Eisenbahnverkehr. Auf Basis der Richtlinien werden Technische Spezifikationen zur Interoperabilität (TSI) erlassen, die beim Neu-, Aus- und Umbau von Eisenbahnstrecken einzuhalten sind. Sie betreffen neben Hochgeschwindigkeitsverkehr und konventionellem Verkehr bspw. die Energiesysteme, die Infrastruktur oder die zulässigen Schallemissionen von Schienenfahrzeugen. Die Implementierung der Systeme geschieht in aller Regel unter Einhaltung der bestehenden europäischen Standards und Normen. [Publications Office of the European Union 2009, 2011]

Die oberste mit der Einführung von ETCS befasste Institution ist die Europäische Kommission. Sie hat die Aufgabe, die Richtlinien zur Interoperabilität zu entwerfen und deren Umsetzung zu überwachen. Die Europäische Eisenbahnagentur (European Rail Agency – ERA) ist für den Entwurf der TSI zuständig. Die ERA veröffentlicht einen zweijährlichen Bericht über den Fortschritt der Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der EU. Dort findet sich auch eine aktuelle Auflistung der gültigen Richtlinien zur Herstellung der Interoperabilität. Auf nationaler Ebene sind die Benannten Stellen (Notified Bodies) verantwortlich für die Einhaltung der Interoperabilitätsanforderungen. [Publications Office of the European Union 2009; Müller 2010]

Im Rahmen der Richtlinie 2001/16/EG wurde am 28. März 2006 die Entscheidung 2006/679/EC der EU-Kommission über die TSI des Teilsystems „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung (ZZS)“ des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems getroffen.

Darin werden die Mitgliedsländer verpflichtet, Umsetzungspläne für die Einführung der TSI zu erstellen und diese der EU-Kommission und den anderen Mitgliedsstaaten zur Verfügung zu stellen. Abbildung 3 zeigt den verbindlichen Umsetzungsplan von ETCS/ERTMS für 2020 von Deutschland. [Regierung der Bundesrepublik Deutschland 27. September 2007]



Abbildung 3: Nationaler Umsetzungsplan von ETCS/ERTMS für 2020 von Deutschland [Regierung der Bundesrepublik Deutschland 27. September 2007]

2.4 Beschreibung des technischen Umfelds

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten der rechtliche Rahmen der ETCS-Migration und die hier verwendete Definition des Begriffs Technologiemigration gegeben wurden, folgt nun eine Beschreibung des technischen Umfelds, in dem die Migration stattfindet. Für das allgemeine Verständnis wird eine allgemeine Beschreibung der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik in Abschnitt 2.4.1 an den Anfang gestellt. Die konkrete Beschreibung von ETCS in 2.4.3 kann so in den Kontext des Gesamtsystems gestellt werden. Dieser Abschnitt stellt die Grundlage aller in den folgenden Kapiteln beschriebenen technischen Systeme und Zusammenhänge dar.

2.4.1 Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik allgemein

Um die Funktionalität und Struktur des hier behandelten technischen Umfelds einordnen zu können, wird kurz die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik allgemein eingeführt. Es wird auf die Aufgabe, verschiedene technische Ausprägungen und elementare Systeme eingegangen. Insbesondere die später folgende Modellbildung der technischen Systeme sowie deren Anforderungen und Abhängigkeiten greifen hierauf zurück.

Eine zentrale Aufgabe zur Sicherung des Zugverkehrs ist die Sicherung der Zugfolge. Durch den sehr langen Bremsweg eines Zuges, bedingt durch die geringe Haftreibung, muss garantiert sein, dass der Weg bis zum Gefahrenpunkt gesichert ist. Das entspricht dem maximalen Bremsweg bei zulässiger Höchstgeschwindigkeit. Dazu wird heute fast ausschließlich das Fahren im sogenannten festen Raumabstand verwendet. Bei den meisten Verfahren wird die Strecke nicht kontinuierlich freigegeben, sondern im Abstand ortsfester Signalisierungen. Diese teilen die Strecken in sogenannte Blockabschnitte ein, wobei sich in einem Block stets nur ein Zug befinden darf. Eine allgemeine Struktur der Signaltechnik stellt Abbildung 4 dar (vgl. dazu im Folgenden insbesondere [Pachl 2000] und [Naumann und Pachl 2004]).

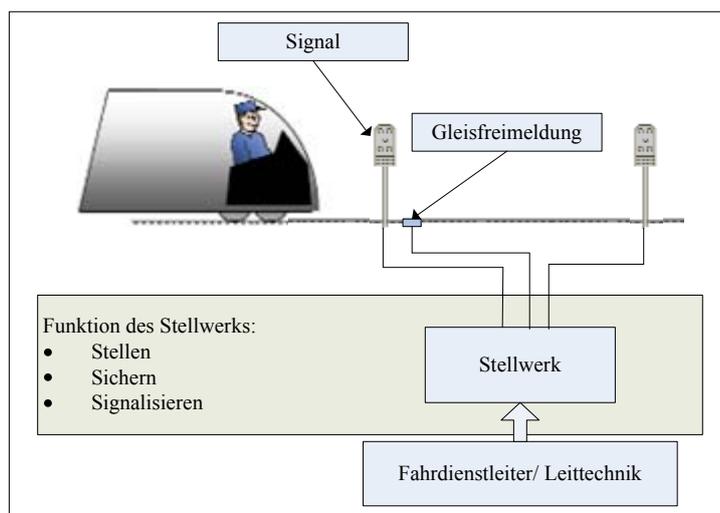


Abbildung 4: Allgemeine Struktur der Signaltechnik

Um eine technische Sicherung der Zugfolge zu gewährleisten, müssen entsprechende Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Einrichtungen zur unmittelbaren Regelung und Sicherung der Zugfahrten bestehen (vgl. „Betriebsstellen“ in [Naumann und Pachl 2004]). Bei dieser Sig-

nalabhängigkeit müssen die Weichen „von den für die Zugfahrt gültigen Signalen derart abhängig sein, dass ein Signal nur dann auf Fahrt gestellt werden kann, wenn die Weichen für den Fahrweg richtig liegen und verschlossen sind“ ([Eisenbahn-Bundesamt 8. Mai 1967], § 14 (9)). Es gibt verschiedene Umsetzungen der Sicherungslogiken.

Streckenblöcke können technisch auf unterschiedliche Weisen realisiert werden. Die Deutsche Bahn unterteilt sie grob in nichtselbsttätige und selbsttätige Streckenblöcke. Während bei den nichtselbsttätigen das Mitwirken von Menschen erforderlich bleibt, um die Ausfahrt eines Zuges aus einem Block zu beobachten und zu kontrollieren, wird dies bei selbsttätigen Streckenblöcken durch eine Gleisfreimeldeanlage übernommen. Die Gleisfreimeldeanlagen können über Gleisstromkreise oder Achszähler realisiert werden. (Vgl. [Pachl 2000; Krüger 2003])

Um die Beachtung der Signale und damit die Sicherheit des Zugverkehrs zu gewährleisten, wird ein System der Zugbeeinflussung verwendet. So kann die Zugbeeinflussung bei Nichtbeachtung eines Signals eine Zwangsbremmung auslösen. Nach der Art der Informationsübertragung kann unterteilt werden in:

- punktförmig wirkende Systeme,
- linienförmig wirkende Systeme,
- Systeme mit punkt- und linienförmigen Elementen.

Bei punktförmigen Systemen werden an festen Streckenpunkten als Ergänzung zur installierten Signalanlage Informationen zur Kontrolle der Fahrweise übertragen. Linienförmige Systeme übertragen die Informationen dagegen kontinuierlich. In diesem Fall ist eine ortsfeste Signalisierung an der Strecke nicht mehr notwendig, da die Streckeninformationen und Signale über die sogenannte Führerstandssignalisierung im Fahrzeug angezeigt werden. Die vollautomatische Fahrt ist realisierbar. Aus wirtschaftlichen Gründen können punkt- und linienförmige Systeme kombiniert werden. Dabei wird die linienförmige Lösung nur in Bereichen der Signalstandorte installiert, um Sicherheit und Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Auf offener Strecke kann dagegen die günstigere punktförmige Beeinflussung ausreichend sein, wenn dies die Anforderungen an Höchstgeschwindigkeit und Zugfolge zulassen. Zur Kategorie der linienförmigen Systeme können auch Systeme mit funkbasierter Übertragung gezählt werden, da sie die gleiche Funktionalität bieten.

Ein zentrales Element zur Steuerung des Zugverkehrs ist das Stellwerk. Hier sind die Einrichtungen zur Bedienung der Weichen, Signale und Gleissperren, sowie die Kommunikation mit der Gleisfreimeldung und damit die Zugbeeinflussung zusammengefasst. Bei den Bauformen lassen sich unterscheiden:

- mechanische Stellwerke,
- elektromechanische und elektropneumatische Stellwerke,
- Relaisstellwerke,
- elektronische Stellwerke (ESTW).

Während die mechanischen Stellwerke mit Muskelkraft betrieben werden, kommen bei elektromechanischen und elektropneumatischen Stellwerken elektromotorische Antriebe zum Einsatz. Sie sind beide in der Regel nicht mit Gleisfreimeldeanlagen ausgestattet. Bei Relaisstellwerken sind diese bis auf wenige Ausnahmen vorhanden. Die modernste Bauform, das elektronische Stellwerk, arbeitet rechnergestützt. Dabei ist die Stellwerkslogik als Software implementiert.

Nach dieser allgemeinen Übersicht werden in den folgenden beiden Abschnitten konkrete Leit- und Sicherungstechniksysteme beschrieben. Zur groben Einteilung werden ETCS-kompatible Systeme als Klasse A Systeme bezeichnet, während die inkompatiblen nationalen Systeme Klasse B Systeme heißen. Die in dieser Arbeit behandelte Migration erfolgt von existierenden Klasse B hin zu Klasse A Systemen.

2.4.2 Auswahl nationaler Sicherungssysteme (Klasse B Systeme)

Dieser Abschnitt stellt beispielhaft drei Klasse B Systeme dar. Dazu wurde neben den deutschen Systemen der punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB) nach INDUSI-Bauart und der Linienförmigen Zugbeeinflussung (LZB) LZB 80 das niederländische Automatische Trainbeïnvloeding System (ATB), zu Deutsch „automatische Zugbeeinflussung“, gewählt. Die ATB stellt durch die niederländische Vorreiterrolle bei der ETCS-Migration im europäischen Kontext ein wichtiges System dar. Außerdem wird bei der ATB eine von PZB und LZB deutlich zu unterscheidende technische Umsetzung gewählt. In Tabelle 1 werden die Funktionen der Systeme gegenübergestellt.

	PZB	LZB	ATB
Technische Interoperabilität	nein	nein	nein
Informationsübertragung	punktförmig	linienförmig	linienförmig
Streckenseitige Signalisierung	ja	nein (PZB als Rückfallebene)	ja
Führerstandsignalisierung	nein	ja	nein
Funkübertragung	nein	ja (Linienleiter)	nein
Zugintegritätskontrolle	streckenseitig	streckenseitig	streckenseitig
Hochleistungsblöcke möglich	nein	ja	nein
Moving Block möglich	nein	nein	nein

Tabelle 1: Übersicht der Funktionen ausgewählter Klasse B Systeme

Bei der PZB können nur an diskreten Punkten Daten an das Fahrzeug übertragen werden (vgl. im Folgenden [Fenner et al. 2003] und [Pachl 2000]). Bei der deutschen INDUSI geschieht dies mit Gleismagneten, die eine Frequenz von 500 Hz, 1000Hz oder 2000Hz besitzen. Dies sind auch die Resonanzfrequenzen des Fahrzeugmagnets. Der 1000Hz Magnet ist am Bremsenanzugsplatz, also dem Vorsignal, angebracht. Zeigt das Signal „Halt erwarten“, wird die Wach-

samkeitskontrolle für den Triebfahrzeugführer und eine Geschwindigkeitsüberwachung ausgelöst. Nach 20 Sekunden muss eine Zielgeschwindigkeit erreicht sein, die von der Zugart und damit vom Bremsvermögen des Zugs abhängt. 150m bis 200m vor dem Hauptsignal befindet sich der 500Hz Magnet. Er löst eine weitere, von der Zugart abhängige Geschwindigkeitsüberwachung aus. So soll sichergestellt werden, dass die Schutzstrecke hinter dem Hauptsignal nicht verletzt werden kann. Der 2000Hz Magnet am Hauptsignal löst beim Überfahren eine unmittelbare Zwangsbremung aus, wenn der Signalbegriff „Halt“ ist. Die Gleisfreimeldung ist durch streckenseitige, technische Einrichtungen wie Gleisstromkreise oder Achszähler realisiert. Die Fahrwegsicherung kann durch Stellwerke unterschiedlicher Bauart erfolgen.

Im Gegensatz zur PZB kann bei der LZB der Signalbegriff kontinuierlich an das Fahrzeug übertragen werden. Im Gleis ist ein Linienleiter als Sender verlegt, dessen Informationen von den LZB-Antennen unter dem Fahrzeug empfangen werden. Darüber hinaus klassifizieren Fenner und Naumann in [Fenner et al. 2003] die in Deutschland, Spanien und Österreich verwendete LZB der Bauarten 72 und 80 als zentrale LZB-Systeme. Die Steuerdatentelegramme werden in der für mehrere Abschnitte zuständigen LZB-Zentrale generiert und übermittelt. So wird eine Mehrabschnittsbremung ermöglicht. Durch sie können Geschwindigkeiten gefahren werden, deren Bremsweg den bei der PZB in der Regel vorhandenen Vorsignalabstand von 1000m überschreiten. Dies ist eine gesetzliche Voraussetzung für das Fahren im Hochgeschwindigkeitsverkehr von über 160km/h (vgl. [Eisenbahn-Bundesamt 8. Mai 1967]). Außerdem wird die LZB mit CIR ELKE Funktion bspw. bei den Verkehrsbetrieben München und auf verschiedenen Strecken deutschlandweit bei niedrigeren Geschwindigkeiten für eine Minimierung der Zugfolgezeiten verwendet. Um eine kontinuierliche Beeinflussung und eine permanente Überwachung des Fahrzeugs möglich zu machen, sind hochgenaue Ortungsinformationen notwendig. Diese werden durch Kreuzungsstellen des Linienleiters, einem Odometer und bei neueren Systemen einem Dopplerradar zur Verfügung gestellt (vgl. [Dräger 2010]). Die LZB wird in Deutschland im Jahr 2026 auslaufen, d. h., sie ist abgängig und muss entsprechend ersetzt werden. (Vgl. [Regierung der Bundesrepublik Deutschland 27. September 2007; Eschbeck 2009])

Ebenso wie die LZB der Baureihen 72 und 80 handelt es sich bei der in den Niederlanden und Belgien verwendeten ATB um eine linienförmige Zugbeeinflussung. Ihre Funktionsweise unterscheidet sich grundlegend von den beiden bereits vorgestellten Systemen. Der Signalbegriff wird als Wechselstrom in den zur technischen Gleisfreimeldung verwendeten Gleisstromkreisen mit einer Trägerfrequenz von 75Hz aufmoduliert (vgl. [Heilig und Altmeier 2010]). Am Fahrzeug angebrachte Antennen empfangen das Signal. Mit diesen Eigenschaften klassifizieren Fenner und Naumann die ATB als dezentrales, niederfrequentes LZB-System (vgl. [Fenner et al. 2003]). Damit ist eine permanente Überwachung und Beeinflussung gegeben. Allerdings eignet sich das System durch seine dezentrale Bauweise nicht für den Hochgeschwindigkeitsverkehr, es wird bis zu einer Geschwindigkeit von 140km/h eingesetzt.

Eine Besonderheit ist, dass bei der ATB der alten Generation (ATB-EG) bei Geschwindigkeiten unter 40km/h keine Beeinflussung am Halt zeigenden Signal möglich ist. Um diese Sicherheitslücke zu schließen wurde die verbesserte Version ATB-VV (Verbeterde Versie) entwickelt, die durch vor dem Hauptsignal angebrachte Transponder ein Überfahren durch Zwangsbremung verhindert.

2.4.3 European Train Control System – ETCS (Klasse A Systeme)

Dieser Abschnitt erläutert ETCS als Klasse A System. Es werden mögliche Varianten der Projektierung vorgestellt. Anhand dieser Varianten ist es möglich, die Anzahl an verwendeten Infrastrukturelementen abzuschätzen. Dies wiederum bildet die Basis für eine spätere Abschätzung der Investitionen.

Durch die europaweite Einführung von ETCS soll die Vielfalt an technischen Umsetzungen der Zugbeeinflussungssysteme beendet werden. Es ist Bestandteil eines übergeordneten Systems, dem ERTMS (European Rail Traffic Management System). Das ERTMS umfasst neben dem ETCS noch das Funkdatenübertragungssystem GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway). Um verschiedenen Anforderungen an die Leistungsfähigkeit und dem jeweiligen Stand der technischen Entwicklung des Systems Rechnung zu tragen, wurde die Implementierung von ETCS in drei Ebenen, sogenannte Application Levels, vorgesehen. Zusätzlich wird für Level 1 zwischen den Modes Limited Supervision (LS) und Full Supervision (FS) unterschieden. Sie sind in Tabelle 2 als Übersicht dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

	Level 1 LS	Level 1 FS	Level 2	Level 3
Technische Interoperabilität	ja	ja	ja	ja
Betriebliche Interoperabilität	nein	ja	ja	ja
Streckenseitige Signalisierung	ja	ja	optional	nein
Führerstand-signalisierung	nein	ja	ja	ja
Funkübertragung	nein	ja (Radio Infill)	ja	ja
Zugintegritäts-kontrolle	streckenseitig	streckenseitig	streckenseitig	fahrzeugseitig
Hochleistungsblöcke möglich	nein	nein	ja	ja
Moving Block möglich	nein	nein	nein	ja

Tabelle 2: Übersicht der Funktionen der Application Level von ETCS (vgl. [Jahnsen et al.])

Das grundsätzliche Problem, das die Migration erst nötig macht, ist die Inkompatibilität von ETCS und den nationalen Systemen. Sie tritt insbesondere an der Luftschnittstelle zwischen Fahrzeug und Infrastruktur auf. Ähnliches gilt für die Schnittstelle zwischen ETCS und den Stellwerken. Allgemein kann gesagt werden, dass elektronische Stellwerke für den Betrieb mit ETCS geeignet sind, andere Stellwerkstypen müssen unter Umständen ersetzt werden. Sie sind zwar kein direkter Bestandteil des ETCS, stellen jedoch eine zentrale Voraussetzung für ein europaweit einheitliches Zugbeeinflussungssystem dar. (Vgl. [Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2006])

Zu beachten ist weiterhin, dass die Definition von ETCS nicht abgeschlossen ist. Vielmehr ist ETCS als ein Softwareprojekt zu verstehen, bei dem eine fortschreitende Entwicklung und

Anpassung natürlich ist. Es werden immer noch Änderungen an den Spezifikationen durchgeführt oder angefragt. Außerdem sind die Änderungsvorschläge teilweise inkompatibel zueinander, so dass auch in Zukunft weitere Migrationsvorgänge innerhalb von ETCS zu erwarten sind. (Vgl. [Hase 2009])

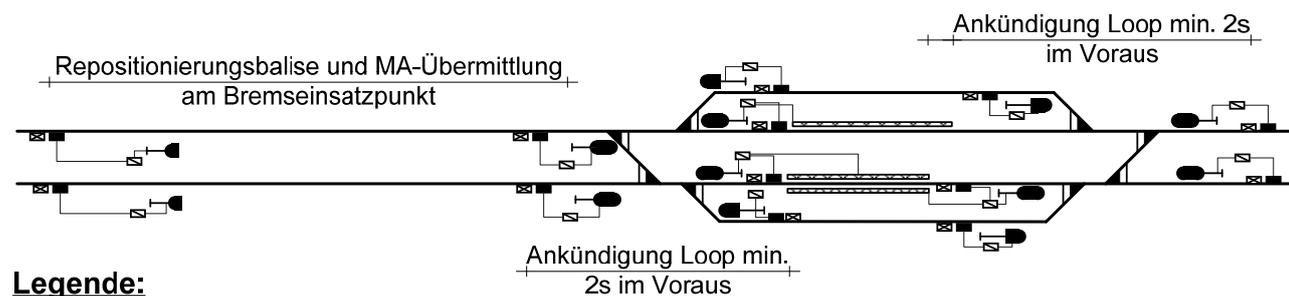
Für die fahrzeugseitige Ausrüstung gibt es neben der alleinigen Ausrüstung mit dem European Vital Computer (EVC) als Fahrzeuggerät vier Varianten zur Kombination mit den geforderten Klasse B Systemen (vgl. [Löwe und Lehmann 2010]). Die erste Möglichkeit ist ein integriertes Klasse A/B Gerät. Hier werden beide Geräte unabhängig voneinander auf platzsparende Weise untergebracht. Werden beide Systeme nicht in einem Gerät integriert, können sie über digitale Ein- und Ausgänge verbunden werden. So wird der Durchgriff von ETCS auf die Bremswirkungsgruppe sichergestellt (vgl. [Gralla 2009]). Eine wirklich funktionale Integration geschieht über das Specific Transmission Module (STM). Mit einer solchen Lösung ist auch der Übergang zwischen beiden Systemen während der Fahrt möglich (vgl. [Dräger 2004]). Zu unterscheiden ist dabei noch zwischen einem Semi-STM und einem normgerechten STM. Das Semi-STM ist über den auf modernen Fahrzeugen vorhandenen Multifunctional Vehicle Bus (MVB) mit dem EVC verbunden. Bei einer normgerechten Anbindung geschieht dies über den Profibus, der jedoch eine Master-Slave-Beziehung zwischen STM und EVC bedingt. Eine solche Hierarchisierung ist nicht von allen Betreibern gewünscht. Sie würde eine Schulung aller Mitarbeiter auf ETCS zur Folge haben, obwohl ETCS eventuell im Betrieb nur selten eingesetzt wird (vgl. [Dräger 2010], [Dräger und Krieger 2006]). Die Beschreibung einer beispielhaften Fahrzeugausrüstung des ICE 3M findet sich in [Braun et al. 2010] und [Gralla et al. 2009].

Bei der Installation von ETCS Level 1 bleibt die signaltechnische Infrastruktur mit Stellwerk, Gleisfreimeldung und Signalen erhalten. Zusätzlich werden auf der Strecke EURO-Balisen angebracht. Um die landesspezifischen Signale standardisiert an den Zug weiter geben zu können, wird ein Telegrammgenerator eingesetzt, die LEU (Lineside Electronic Unit). Streckenseitig existieren für das Application Level 1 mit Limited Supervision und Full Supervision verschiedene Modes. Im ETCS Level 1 FS wird die Fahrerlaubnis (Movement Authority - MA) über eine transparente Balise oder ein EuroLoop an den Zug übertragen. Die Balise bzw. der EuroLoop wiederum erhält bei gesichertem Blockabschnitt bzw. eingelegter Fahrstraße die MA von der LEU. Die LEU leitet aus dem Fahrtbegriff die zugehörige MA ab. Der Fahrtbegriff kommt entweder direkt aus dem Stellwerk oder wird den Signallampenströmen des Altsystems entnommen. (Vgl. [Pachl 2000; Krüger 2003; Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2006])

Um eine Richtungserkennung zu ermöglichen, ist neben einer transparenten auch eine fixe Balise notwendig. Sie bilden eine Balisengruppe. Durch einen EuroLoop, ein im Gleisbett verlegter Leiter, wird der Fahrtbegriff kontinuierlich übertragen. Die notwendige Ankündigung geschieht durch eine an entsprechender Stelle verlegte fixe Balise (Abbildung 5). (Vgl. [Lackhove und Scheier 2010])

Jede Balisengruppe verfügt darüber hinaus über eine eindeutige Kennung. Durch das so ermöglichte Linking wird einem Zug mit jeder MA eindeutig die als nächstes zu erwartende Balisengruppe sowie die Strecke dorthin übermittelt. Treffen die erwarteten Ereignisse nicht ein, wird eine Zwangsbremmung ausgelöst. Um Messfehlern bei der zurückgelegten Wegstrecke

cke nicht zu groß werden zu lassen, wird der Ortungsfehler des Zugs regelmäßig korrigiert. Dies geschieht durch die Übertragung eines entsprechenden Telegramms von einer Balise.



Legende:

- Transparente Balise
- ▣ Fixe Balise
- ▢ LEU (lineside electronic unit)
- EuroLoop

Abbildung 5: Projektierungsbeispiel ETCS Level 1 Full Supervision (vgl. [Lackhove und Scheier 2010])

Da die Fahrerlaubnis bei ETCS Level 1 FS an diskreten Punkten übertragen wird, liegt eine punktförmige Zugbeeinflussung vor. Zur Signalaufwertung am Hauptsignal können in begrenzten Bereichen Fahrerlaubnisse durch EuroLoops und Radio-Infills kontinuierlich übertragen werden. Eine ähnliche Funktionalität wird durch das Verlegen mehrerer sogenannter Infill-Balisen erreicht.

Durch einen reduzierten Funktionsumfang bei ETCS Level 1 LS gegenüber Level 1 FS kann der Projektierungsaufwand reduziert werden. Trotzdem bleibt die technische Interoperabilität erhalten. So kann eine Funktionsweise vergleichbar mit der PZB umgesetzt werden (vgl. [Weigand 2007]). Durch eine reduzierte Anzahl an Bremskurven zeigte sich in Simulationen eine gegenüber Level 1 FS erhöhte Leistungsfähigkeit. (vgl. [Wendler 2009]). Ein Verzicht auf ein ausdefiniertes Geschwindigkeits- und Streckenprofil ist möglich, da der Triebfahrzeugführer mit dem nationalen Regelwerk vertraut sein muss. Das Verlinken der Balisen ist nicht mehr notwendig. Auf eine Führerstandssignalisierung wird verzichtet. Damit sind die Grundlagen für das Erreichen einer betrieblichen Interoperabilität im Gegensatz zu Level 1 FS nicht vorhanden.

Wird ETCS Level 2 auf einer Strecke installiert, sind keine streckenseitigen Signale mehr notwendig. Sie können jedoch optional vorhanden bleiben, wenn weiterhin Fahrzeuge auf der Strecke verkehren, die nicht mit ETCS ausgestattet sind oder sie als Rückfallebene vorgesehen sind. Es ist eine vollständige Führerstandssignalisierung vorgesehen. Die Übertragung des Streckenprofils geschieht durch eine zentrale Funkeinheit, dem RBC (Radio Block Center). Der Zug empfängt die Daten per GSM-R. (Vgl. [Pachl 2000; Krüger 2003; Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2006])

Bei ETCS Level 2 handelt es sich um eine kontinuierliche Zugbeeinflussung. Die MA wird per GSM-R an den Fahrzeugrechner übermittelt. So sind höhere Streckenleistungsfähigkeiten und nach EBO Geschwindigkeiten oberhalb 160 km/h zulässig (vgl. [Eisenbahn-Bundesamt 8. Mai 1967]).

ETCS Level 2 ist im Full Supervision Mode realisiert. Entsprechend ist die MA identisch mit der von Level 1 FS. Die MA wird zentral im RBC erstellt und an das GSM-R-Netzwerk übermittelt. Ein RBC kann dabei für mehrere Stellwerksbereiche zuständig sein. Die Fahrstraßen werden aus dem Stellwerk an das RBC übertragen. Dies lässt sich bei einem ESTW oder einem ferngesteuerten RSTW realisieren. Die MA eines Zuges wird im RBC aus den entsprechenden Streckendaten und der übermittelten Fahrstraße generiert. Die Zuginformationen werden beim Verlassen eines RBC-Bereichs an das angrenzende RBC übergeben. (Vgl. [Stamm 2009])

Durch Base Transceiver Stations (BTS) geschieht die Ausleuchtung der Strecke mit dem GSM-R Netzwerk (Abbildung 6). Neben der Streckenlänge bestimmt das Gelände und die möglichen Installationsorte die Zahl der aufzustellenden BTS.

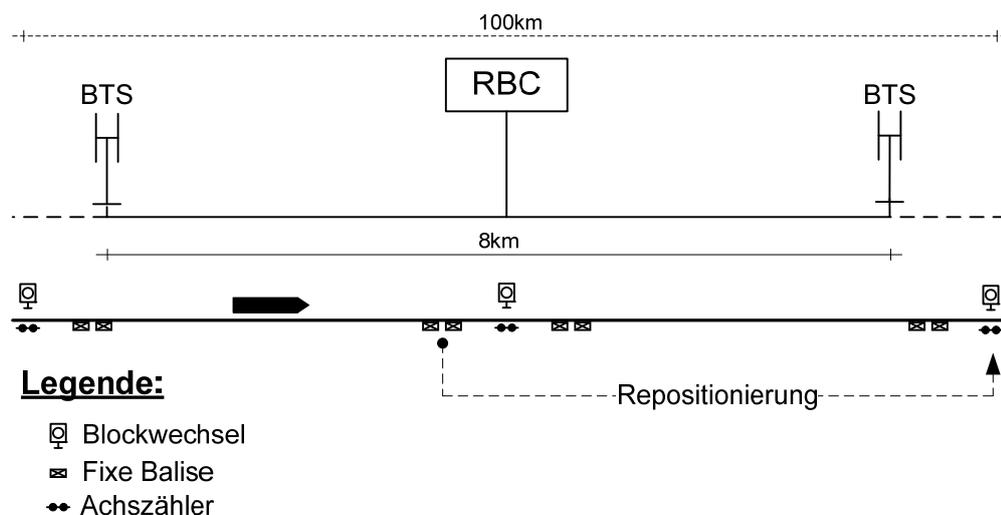


Abbildung 6: Projektierungsbeispiel für ETCS Level 2 (vgl. [Lackhove und Scheier 2010])

Der Schritt von ETCS Level 2 zu ETCS Level 3 besteht in der fahrzeugseitigen Ortung, inklusive fahrzeugseitiger Zugvollständigkeitskontrolle. Damit ist keine streckenseitige Gleisfreimeldung mehr nötig. Die Ortung wird durch fixe Balisen unterstützt, die zur Repositionierung dienen. (Vgl. [Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2006]). Die technische Realisierung der Zugvollständigkeitskontrolle ist zurzeit noch nicht vorhanden. Mit dem Konzept kann der Zugbetrieb im sogenannten Moving Block realisiert werden, d. h., der Sicherheitsabstand wird permanent überwacht und sichergestellt. Eine Einteilung der Strecke in feste Blöcke ist damit nicht mehr notwendig. Durch diese Maßnahme kann nochmals die Leistungsfähigkeit erhöht werden. Allerdings wird diese Stufe voraussichtlich nur bei einem einheitlichen Fuhrpark und einfachen betrieblichem Regelwerk Anwendung finden, was bei Metros und im Nahverkehr der Fall sein könnte (vgl. [Krüger 2003]).

2.5 Bewertung von Migrationsszenarien

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die verwendete Definition von Technologiemigration sowie eine Beschreibung des technischen Migrationsgegenstands gegeben. Für das Ziel der Optimierung ist es darüber hinaus notwendig die möglichen Migrationsstrategien zu bewerten. Dazu werden im Folgenden bestehende monetäre und nicht-monetäre Bewertungs-

ansätze vorgestellt. Sie lassen sich verwenden um alternative Strategien in eine Präferenzordnung zu stellen und somit eine Handlungsempfehlung zu begründen.

2.5.1 Lebenszykluskostenrechnung

Als erste Methode zur Bewertung von Migrationsszenarien wird hier die Lebenszykluskostenrechnung vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine Erfassung aller während des Lebenszyklus eines Produkts anfallenden Kosten. Da bei Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik eine sehr lange Nutzungsdauer charakteristisch ist, eignet sich die Methode besonders. Die Lebenszykluskostenrechnung nimmt im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Rolle zur Bewertung ein und wird als Grundlage für Investitionsentscheidungen herangezogen.

Ein zentrales Problem von Investitionen im Bahnsektor sind die langen Lebenszyklen der verwendeten Komponenten. Zum einen steigt dadurch die technische Komplexität, da trotz unterschiedlichster Systeme die Kompatibilität aufrecht erhalten bleiben muss. Zum anderen ist es elementar, dass der Fokus der Investitionsentscheidung von der Anfangsinvestition auf den Betrieb der Systeme verlagert wird. Dazu kommt noch, dass die Umstellung der Leit- und Sicherungstechnik ebenfalls über einen längeren Zeitraum und nicht in einem Schritt vollzogen wird. Somit ist auch der parallele Betrieb von altem und neuem System zu berücksichtigen.

Um eine Fokussierung auf die Betriebsphase gewährleisten zu können, bietet sich das Instrument der Lebenszykluskostenrechnung an. Damit lässt sich die gesamte Lebensdauer eines Produktes monetär erfassen. Der Ausgangspunkt zur Entwicklung der Lebenszykluskostenrechnung war der steigende Anteil der beschäftigungsunabhängigen Gemeinkosten in manchen Branchen und die damit einhergehende, verminderte Steuerungsfähigkeit der Deckungsbeitragsrechnung (vgl. [Rückle und Klein 1994]). Dies liegt auch bei der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik vor. In der Literatur finden sich unterschiedliche Ansätze für die Lebenszykluskostenrechnung, bspw. das Life-Cycle Costing (vgl. [Sakurai 1997]), das Product-Life-Cycle-Cost Management (vgl. [Rückle und Klein 1994]) oder das Product Life Cycle Costing (vgl. [Coenenberg 2003]). Im Folgenden wird der hier verwendete Ansatz erläutert.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Auffassungen von Produktlebenszyklen. Im Marketing wird darunter der Verlauf des Absatzes eines Produktes über die Zeit verstanden, beginnend mit der Markteinführung bis zur Einstellung der Produktion (vgl. [Rückle und Klein 1994]). Eine umfassendere Einteilung definiert zusätzlich einen Zulieferer- und einen Kundenlebenszyklus (vgl. [Reichmann 2001]). Der Ansatz ist für das Verständnis des in dieser Arbeit behandelten Problems nützlich. Stellt man die Verkehrs- und Infrastrukturunternehmen in den Mittelpunkt, so produzieren diese Mobilität. Neben dem von den Bahnen angebotenen nationalen Verkehr wird von den Kunden immer stärker der internationale Verkehr nachgefragt. Dies entspricht einer Veränderung im Kundenlebenszyklus, auf die Produzenten und Zulieferer reagieren müssen. An dieser Stelle soll allerdings die Kostenverursachung des einzelnen verwendeten Produkts in Abhängigkeit von der Einsatzdauer behandelt werden (vgl. [Sakurai 1997]). Dabei stellen die Infrastrukturunternehmen die Kunden und die Systeme der Leit- und Sicherungstechnik die Produkte dar.

In der Lebenszykluskostenrechnung können die Hersteller- und die Kundenperspektive bezogen auf ein Produkt unterschieden werden. Während die Kundenperspektive Anschaffung, Betrieb, Wartung, Reparatur und Entsorgung umfasst, ergänzt der integrierte Produktlebenszyklus aus Herstellersicht Umfeldanalyse, Forschung und Entwicklung, Konstruktion, Fertigung, sowie Vertrieb. Wie in Abbildung 7 dargestellt, kann dieser Lebenszyklus in die drei Abschnitte des Entstehungszyklus, Marktzyklus und Nachsorgezyklus unterteilt werden (vgl. [Sakurai 1997; Coenenberg 2003]).

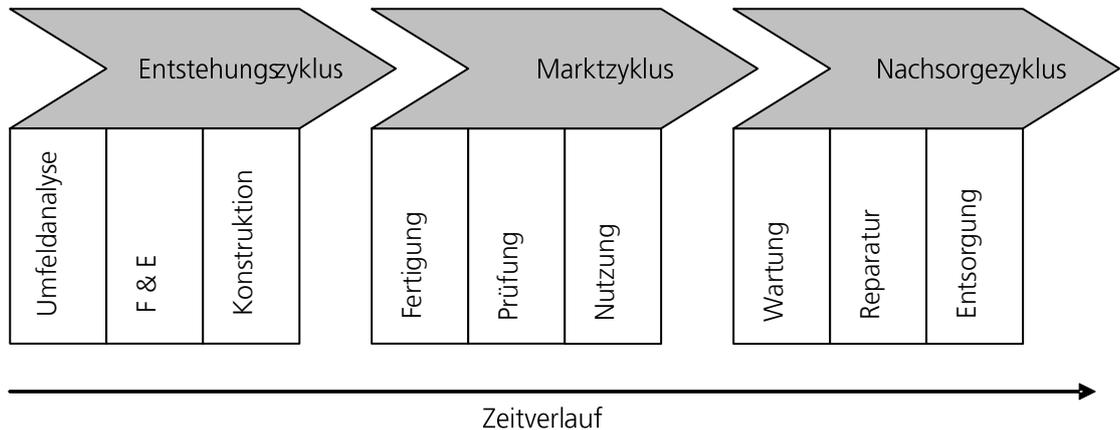


Abbildung 7: Integrierter Produktlebenszyklus aus Produzentensicht (vgl. [Coenenberg 2003])

Der Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass bereits während des Entstehungszyklus alle später anfallenden Kosten antizipiert und beeinflusst werden können. Durch einen erhöhten Aufwand im Entstehungszyklus wird angenommen ein Produkt dahingehend zu verändern, dass es im Markt- und Nachsorgezyklus geringere Kosten verursacht. Eine signifikante Kostenbeeinflussung zu einem späteren Zeitpunkt ist in der Regel kaum noch möglich. Durch eine Verschiebung der Kosten zwischen den Phasen soll die optimale Kostenstruktur gefunden werden. Sie besteht für den Kunden als Trade-Off zwischen der Anfangsinvestition und den später anfallenden Kosten für Betrieb, Wartung und Entsorgung. Für den Produzenten bedeutet dies eine Verlagerung von Kosten aus Markt- und Nachsorgezyklus in den Entstehungszyklus. Abbildung 8 zeigt dies in einer Cashflow-orientierten Darstellung der Kosten als Auszahlungen. (Vgl. [Sakurai 1997; Coenenberg 2003])

In welchem Maße die Verschiebung von Auszahlungen sinnvoll ist, hängt in erster Linie von der Nutzungsdauer ab, wie in Abbildung 9 dargestellt. Im hier behandelten Fall ist die Nutzungsdauer weitgehend bekannt und festgelegt, so dass die entsprechend optimale Investitionsalternative gewählt werden kann.

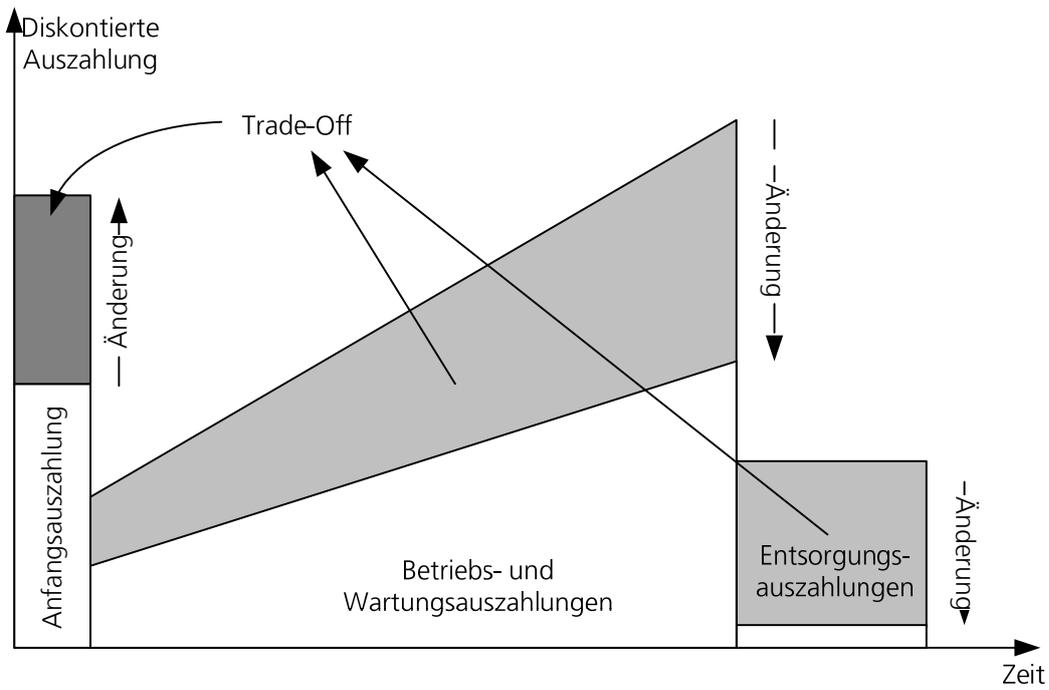


Abbildung 8: Trade-off zwischen Anfangs- und Folgeauszahlungen aus Kundensicht

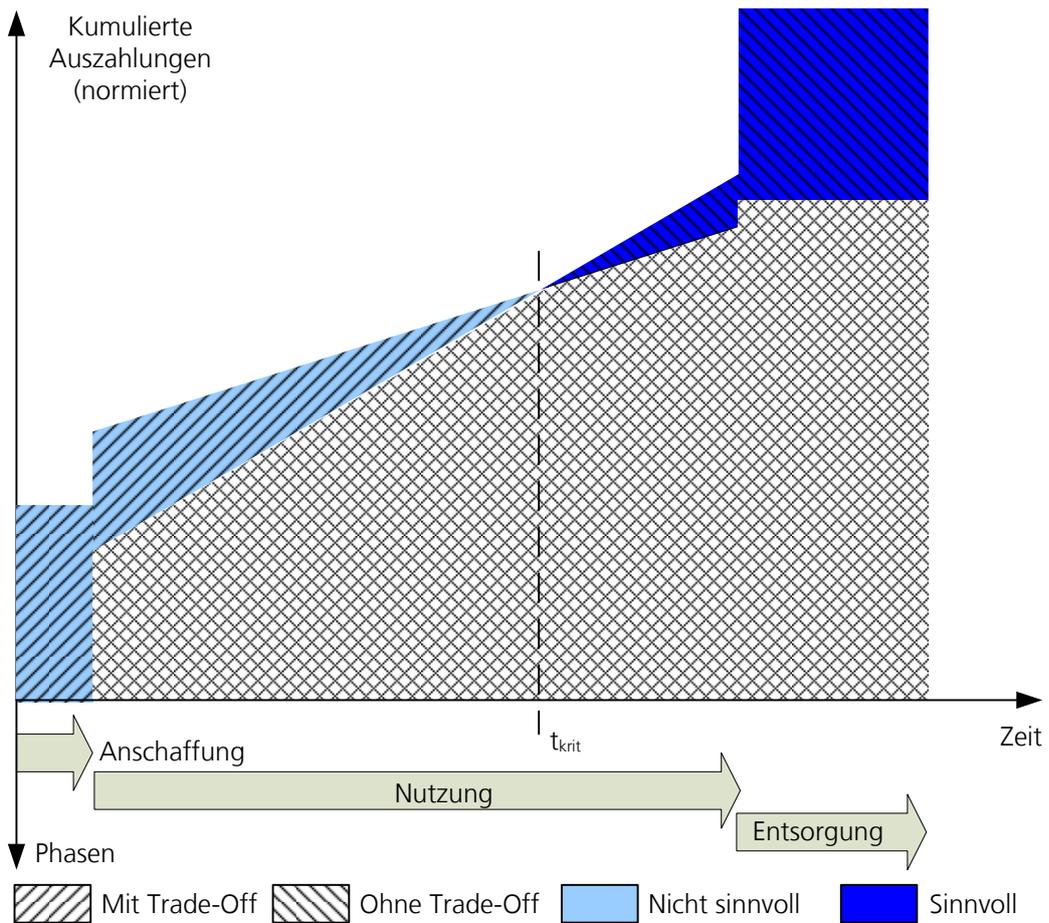


Abbildung 9: Entscheidung über Trade-off zwischen Lebenszyklusphasen

2.5.2 Investitionsrechnung

Die Entscheidung für eine Migrationsstrategie legt die Investitionsstrategie für einen großen Zeitraum fest. Um die durch eine Investitionsentscheidung ausgelösten Ein- und Auszahlungen zum Betrachtungszeitpunkt bewerten zu können, bietet sich die dynamische Kapitalwertmethode an. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf diesen allgemeinen Bewertungsstandard zurückgegriffen. Im Folgenden wird sie kurz vorgestellt. Darüber hinaus wird eine speziell an Migrationsfragestellungen angepasste Methode, die Migrationskostenrechnung, erläutert.

Für die monetäre Bewertung der verschiedenen Investitionsalternativen soll in dieser Arbeit die allgemein für solche Problemstellungen akzeptierte dynamische Kapitalwertmethode herangezogen werden. „Der Kapitalwert einer Investition ist definiert als [...] Barwert ihrer Rückflüsse zuzüglich dem Barwert ihres Liquidationserlöses und abzüglich dem Barwert ihrer Investitionsausgaben.“ ([Blohm et al. 2006], S. 51) Aufgrund des großen Betrachtungszeitraums ist die Wahl einer dynamischen Methode der Investitionsrechnung unausweichlich. Statische Methoden würden zu ungenügenden Ergebnissen führen, da sie von Durchschnittskosten ausgehen und keine zeitliche Bewertung vornehmen (vgl. [Blohm et al. 2006]). Die dynamische Kapitalwertmethode orientiert sich an der Zielsetzung des Investors über einen mehrperiodischen Zeitraum. Für die Durchführung ist es notwendig, dass die zur Wahl stehenden Investitionen echte Alternativen sind und sich gegenseitig ausschließen. Außerdem sind die aus der Investition resultierenden Zahlungsreihen nicht konstant, sondern variieren stark über die Zeit (vgl. [Kruschwitz 2003]). Die Ein- und Auszahlungen werden auf einen gemeinsamen Zeitpunkt hin mit dem Kalkulationszinsfuß i abgezinst. Der Kapitalwert C_0 ergibt sich aus der Anfangsinvestition I_0 , den Rückflüssen R_t zum Zeitpunkt t , abgezinst zum Bezugszeitpunkt, und aus dem abgezinsten Liquidationserlös L_T im Endzeitpunkt der Investition T :

$$C_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{R_t}{(1+i)^t} + \frac{L_T}{(1+i)^T}. \quad (1)$$

Um die Migration zu einer neuen Leit- und Sicherungstechnik besser bewerten zu können, soll im Folgenden auch eine modifizierte Form des Kapitalwerts verwendet werden. Die Kosten des Migrationsprozesses erhält man, in dem die Ein- und Auszahlungen E_t und A_t zum Zeitpunkt t der Zahlungsreihe in Beziehung zu dem Weiterführungsszenario bei Nicht-Investition gesetzt werden (vgl. [Obrenovic und et al. 2005]). So ergeben sich die verwendeten Migrationskosten MC_0 zu:

$$MC_0 = \sum_{t=0}^T (E_t - A_t) \cdot \frac{1}{(1+i)^t} + \frac{L_T}{(1+i)^T}. \quad (2)$$

Obrenovic stellt die Elemente der Einzahlungen E_t und der Auszahlungen A_t detailliert vor (vgl. [Obrenovic 2009]). Dabei wird insbesondere auf die Aufwände für Wartung und Instandhaltung von Neu- und Altsystem, fahrzeug- und streckenseitiger Rückbau des Altsystems sowie die Anfangsinvestitionen eingegangen. Die streckenseitigen Einnahmen über verkaufte Trassen können nach Streckenleistungsfähigkeit berechnet werden.

2.5.3 Nutzwertanalyse

Die Investition in eine europaweit einheitliche Leit- und Sicherungstechnik ist ein Projekt von immensum Umfang. Schon bei kleineren Projekten können nicht-monetär erfassbare Größen entscheidungsrelevant sein. Um sie systematisch erfassen und bei der Entscheidungsfindung berücksichtigen zu können, wird hier das Instrument der Nutzwertanalyse vorgestellt.

Als problematisch stellt sich dabei heraus, dass die Bewertung dieser Faktoren häufig subjektiv geprägt ist. Um eine Entscheidung trotzdem objektiv nachvollziehbar und systematisch zu gestalten, bietet sich das Instrument der Nutzwertanalyse an, vgl. im Folgenden [Zangemeister 1971] und [Rinza und Schmitz 1977]. Mit ihr können nicht-monetäre und monetäre Ziele zu einem mehrdimensionalen Zielsystem verknüpft werden (vgl. [Kruschwitz 2003]). Abbildung 10 zeigt den schematischen Ablauf einer Nutzwertanalyse.

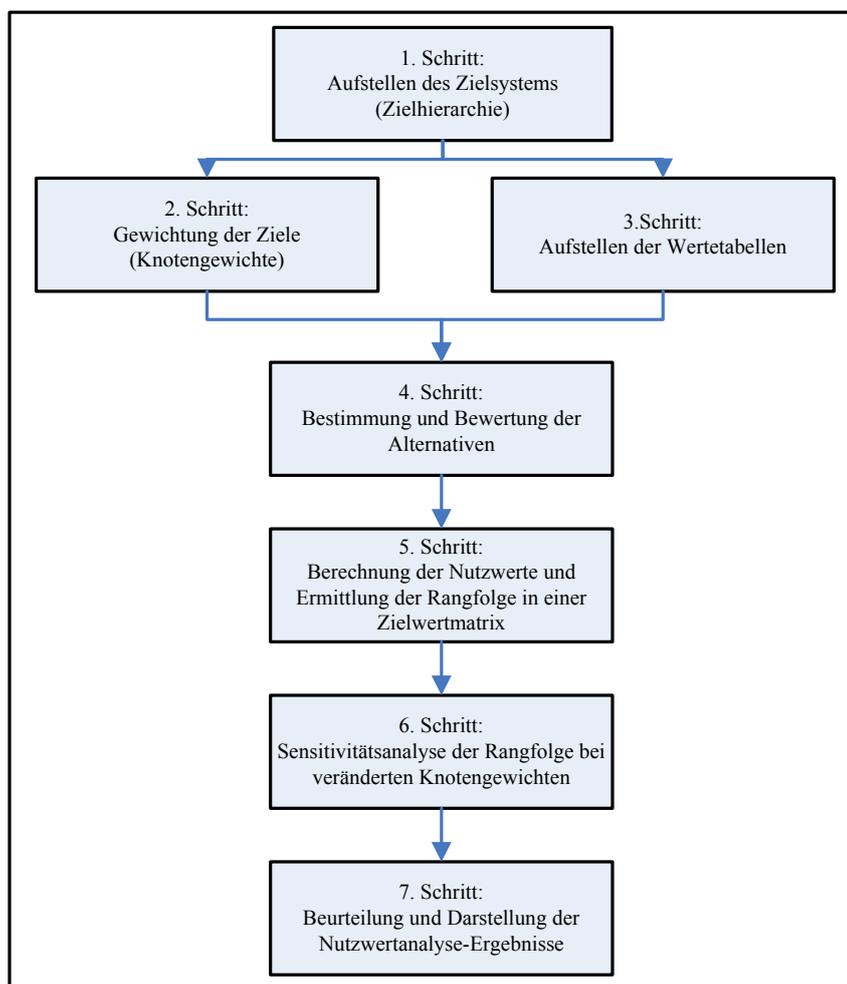


Abbildung 10: Schematischer Ablauf einer Nutzwertanalyse (vgl. [Rinza und Schmitz 1977])

Das Zielsystem wird als erster Schritt der Nutzwertanalyse aus den Zielkriterien für die Investitionsentscheidung gebildet. Die Zielkriterien stellen die Bewertungsgrundlage einer Investitionsalternative dar. Die Bewertung muss anhand einer eindeutigen Messskala geschehen (vgl. [Huch et al. 2004]). Wichtig ist auch, dass zunächst grobe Oberziele weiter unterteilt und konkretisiert werden. Die Ziele einer Ebene dürfen sich nicht überschneiden oder beeinflussen. So wird das Zielsystem hierarchisiert.

Nachdem die Wertetabelle mit den Kriteriengewichtungen aufgestellt wurde, können die Nutzenbeiträge der einzelnen Alternativen eingetragen werden. Dazu wird zunächst die Zielerreichung gemessen und diese anschließend in den Teilnutzen transformiert. Um zu starke Subjektivität zu vermeiden und die Nachvollziehbarkeit zu fördern, sollte dieser Schritt von einem Team durchgeführt werden (vgl. [Weber 2004]).

Um die Alternativen nun in eine Präferenzordnung zu stellen, werden die einzelnen Teilnutzenbeiträge mit der jeweiligen Nutzensgewichtung multipliziert und anschließend für jede Alternative summiert. Als Summe ergibt sich der Nutzen einer jeden Alternative. Um die Verlässlichkeit der entstandenen Rangordnung zu überprüfen, ist es sinnvoll, eine Sensitivitätsanalyse gegenüber veränderten Kriteriengewichtungen und veränderten Eigenschaften der Alternativen durchzuführen. So kann eine Aussage über die Belastbarkeit der getroffenen Handlungsempfehlung gefunden werden.

Im letzten Schritt wird die Handlungsempfehlung mit der Nutzenerwartung verglichen. Entspricht der realisierbare Nutzen einer Investition mindestens der Erwartung, ist sie empfehlenswert. Ist dies nicht der Fall, muss entweder nach weiteren Alternativen gesucht werden, die die gestellten Erwartungen erfüllen können, oder es wird nicht investiert.

3 Modellbildung

Dieses Kapitel erläutert die Erstellung eines Prozessmodells der Migration. Der gesamte Migrationsprozess wird formalisiert und mathematisch optimierbar. Damit werden die Grundlagen für eine transparente und damit bis ins Detail nachvollziehbare Entwicklung von Migrationsstrategien gelegt, wie sie für eine koordinierte und erfolgreiche Durchführung notwendig sind. Dazu werden die verschiedenen Ansätze aus der Forschung aufgegriffen und weitergeführt. Auf Basis dieses Modells soll im Weiteren der strategische Spielraum bei der Migration ermittelt werden, in dem dann die Optimierung der Strategie vorgenommen werden kann. Für die Modellierung des Migrationsprozesses werden ausgehend von den daran beteiligten Parteien deren Anwendungsfälle für die Migration definiert und daraus Anforderungen abgeleitet. Durch die Gegenüberstellung von Funktionen und Komponenten kann das Vorgehen bis herunter auf eine technische Ebene dargestellt werden. Außerdem werden das zu migrierende Netzwerk und seine Elemente abgebildet. Dafür wird die System Modeling Language (SysML) als formale Beschreibungssprache verwendet. Für die in Kapitel 4 folgende Optimierung liegt damit ein ganzheitliches und durchgängiges Modell vor. Durch die Vorgehensweise können Fehler in der Modellierung schnell aufgedeckt werden. Die Entscheidung für eine Strategie wird dadurch nachvollziehbar und reproduzierbar. In Anbetracht der Komplexität der Problemstellung ist dieser Punkt besonders hervorzuheben.

3.1 Grundlagen

Bei der europaweiten Migration von ETCS handelt es sich um eine hochkomplexe Aufgabenstellung, deren Erfolg beträchtlich von der Koordination der beteiligten Parteien abhängt. Diese ist bisher nicht im ausreichenden Maße vorhanden. Für ein optimiertes Vorgehen ist eine übergreifende Sichtweise, die über die bisherigen Einzelansätze hinausgeht, notwendig. Um dies auf Basis eines Entscheidungsmodells zu unterstützen, muss der Migrationsprozess korrekt und für die Beteiligten nachvollziehbar sein. Dieser Abschnitt behandelt die Grundlagen und das gewählte Vorgehen bei der Erstellung eines solchen Modells. Nach Stachowiak (vgl. [Stachowiak 1973]) zeichnet sich dieses durch die Merkmale der Abbildung, der Verkürzung und des Pragmatismus aus.

Für die Korrektheit ist es notwendig, dass die relevanten Randbedingungen und Einflussparameter berücksichtigt werden. Insbesondere die wechselseitigen Einflüsse zwischen Fahrzeug- und Infrastrukturseite sind hier hervorzuheben. Das Kriterium der Nachvollziehbarkeit bezieht sich in diesem Fall nicht nur auf die theoretische Rückverfolgung eines produzierten Ergebnisses im Sinne eines deterministischen Systems. Da sich der vorliegende Ansatz die Unterstützung von Entscheidungsprozessen zur Aufgabe gemacht hat, müssen die gemachten Annahmen und Modellierungsschritte auch von den Entscheidungsträgern als korrekt anerkannt werden. Ist dies nicht der Fall oder stehen die Grundsätze des Modells vielleicht sogar im Widerspruch zu den Erfahrungen der Entscheidungsträger, sind die gelieferten Ergebnisse für eine praktische Anwendung wertlos. Der Punkt ist besonders wichtig, da absehbar ist, dass die sich ergebenden strategischen Optionen bei weitem die manuell nachvollziehbare Anzahl übersteigt.

Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, bedient sich die Modellierung des Migrationsprozesses eines möglichst formalen Ansatzes. Ausgangspunkt dafür ist das BMW-Prinzip (Beschreibungsmittel, Methode, Werkzeug), das die orthogonalen Elemente der Modellierung ordnet (vgl. [Schnieder 1999]). Damit liegt eine eindeutige, überschneidungsfreie Definition vor, die die Basis für die hier aufgestellte Modellbildung liefert. Im Folgenden werden verwendete Beschreibungsmittel, Methode und Werkzeuge dargestellt.

3.1.1 Beschreibungsmittel

Durch das gewählte Beschreibungsmittel muss eine Migrationsstrategie eindeutig und nachvollziehbar abbildbar sein. Die Beschreibung wird hier in den Migrationsprozess selbst und den sich ergebenden strategischen Spielraum unterschieden. Die Wahl für die Modellbildung benötigten Beschreibungsmittel wird nachfolgend erläutert.

Für die Beschreibung des Migrationsprozesses selbst wurde ein Ableger der Unified Modelling Language (UML) gewählt. Die UML ist eine objektorientierte Sprache, die die grafische Darstellung des Aufbaus, des Verhaltens und der Funktionen von Systemen ermöglicht. Sie kann in einem sehr weiten Feld eingesetzt werden und ist nicht auf eine Domäne beschränkt. Die System Modelling Language (SysML) stellt ein Profil der UML dar, das in seinem Sprachumfang reduziert und auf die Beschreibung technischer Systeme hin ausgelegt wurde. Sie erlaubt es als Erweiterung zur UML, die Anforderungen der beteiligten Parteien im Modell nachvollziehbar darzustellen. Den Anforderungen werden Funktionen, statische Strukturen und Aktivitäten gegenüber gestellt. So entsteht eine integrierte Sicht auf das Modell. Das bedeutet, dass unterschiedliche Sichtweisen auf das System konsistent sind. Dadurch ist es vergleichsweise leicht möglich Widersprüche in der Modellierung zu identifizieren und zu korrigieren. Ein weiterer Vorteil ist die eindeutige, öffentlich zugängliche und weit verbreitete Notation. Mit ihr ist es möglich, die Zusammenhänge weitgehend ohne Missverständnisse darzustellen. Die Spezifikation der Object Management Group (OMG) erstellt von Weillkiens befindet sich in Anhang A.1 [Weillkiens 2008]. Im Folgenden sind die wichtigsten Eigenschaften kurz erläutert, siehe insbesondere [Knollmann 2007]:

- Für die Darstellung der Dekomposition des Systems in Subsysteme und Module werden Klassen- und Kompositionsstrukturdiagramme herangezogen. Blockdiagramme stellen die Zusammensetzung des Systems dar.
- Schnittstellen zwischen verschiedenen Blöcken werden über Ports und Datenflüsse modelliert. Dabei können sporadische, periodische oder kontinuierliche Ströme von Daten, Material oder Energie abgebildet werden.
- Mathematische und logische Zusammenhänge eines Systems werden durch Randbedingungen und Parameterdiagramme erfasst. Sie beschreiben auch die physikalischen Eigenschaften.
- Das Systemverhalten kann durch verschiedene Diagramme abgebildet werden. Die wichtigsten für die vorliegende Arbeit sind das Anwendungsfalldiagramm, das Zustandsdiagramm und das Aktivitätsdiagramm. Ein Anwendungsfalldiagramm stellt die Interaktion des Systems mit der Umwelt und damit auch die Systemgrenzen dar. Dar-

aus lassen sich ebenfalls die funktionalen Anforderungen ableiten. Das Zustandsdiagramm erlaubt eine Darstellung des Systemverhaltens als endlicher Automat. Das Aktivitätsdiagramm bildet nicht wie das Zustandsdiagramm den Systemzustand ab, sondern eine Abfolge von Aktivitäten. Diese können auch einzelnen Systemkomponenten zugeordnet werden.

- Das Anforderungsdiagramm stellt als eine Variante des Klassendiagramms die an das System gestellten Anforderungen dar. Sie ermöglichen eine Verfolgung der Anforderungen durch das gesamte Modell.
- Die Zuordnung der Funktionen auf Implementierungselemente geschieht durch Funktionsallokation.

Der strategische Spielraum hingegen wird anders als der Migrationsprozess als Petrinetz beschrieben. Dadurch wird es möglich verschiedene Szenarien, bestehend aus Migrationspfaden und -zielen, zu vergleichen. Es wird deutlich, wie die Szenarien in Beziehung zueinander stehen und ob sie bspw. Pfadabschnitte teilen. Durch die mathematisch eindeutige Notation können automatisierte Vergleiche und Optimierungen innerhalb des Netzes vorgenommen werden. Zudem lässt sich das Petrinetz automatisch erzeugen.

3.1.2 Methode

Die Methode legt das Vorgehen bei der Erstellung des Modells der Migration fest. Damit stellt sie den roten Faden dar, der sich durch die folgenden Abschnitte zieht. Durch eine entsprechende Wahl kann die Fehleranfälligkeit des erstellten Modells verringert und die Nachvollziehbarkeit gesteigert werden.

Als Methode zur Modellierung wird eine Systemanalyse herangezogen. Diese wird durch das Beschreibungsmittel SysML sehr gut unterstützt. So sollen potenzielle Investitionsalternativen gefunden werden (vgl. [Schaefer 1993]). Die Systemanalyse dient zur Definition des betrachteten Realitätsausschnitts, also des Objekts und des Prozesses der Investition. Damit stellt sie einen zentralen Baustein dieser Arbeit dar. Die Analyse wird hier in vier Schritten durchgeführt. Lunze definiert ein dynamisches System als „einen Teil der Welt, in dem sich Prozesse abspielen“ [Lunze 2003] (vgl. auch die Systemaxiome von Schnieder [Schnieder 1999]).

Zur Erleichterung der Planung bietet sich die Unterteilung in Objekt- und Wertesystem an (vgl. im Folgenden [Schneeweiß 1991]). Das Objektsystem beschreibt die physikalischen Objekte der Planung und deren Attribute. Bezogen auf die Planung der Migration entspricht dies der Identifikation von Migrationspfaden. Diese Pfade stellen eine zeitliche Abfolge von möglichen technischen Zwischenzuständen auf dem Weg zum Zielsystem dar. Dabei spielen wirtschaftliche Überlegungen zunächst keine Rolle. Lediglich die technische Machbarkeit sowie sachlogische Zusammenhänge sind ausschlaggebend. Die Information, welche Pfade überhaupt realisierbar sind, leitet sich also aus den Beschreibungen des Ursprungssystems und des Zielsystems ab. Darüber hinaus ist die Berücksichtigung des laufenden Produktionsprozesses, in diesem Fall der Dienstleistung Mobilität, maßgeblich, da dieser im Laufe der Migration nicht ins Stocken geraten darf.

Das Wertsystem nimmt im Gegensatz zum Objektsystem keine physikalische Beschreibung des Planungssystems, sondern eine betriebswirtschaftliche Bewertung vor. Nach dieser Bewertung, die sowohl auf erfassbaren, als auch auf nicht oder nur indirekt erfassbaren monetären Größen basiert, ergibt sich eine Präferenzordnung der physikalisch möglichen Zustände des Systems hinsichtlich der Zielerreichung. Dabei ist auch die Beziehung von eventuellen Unterzielen zueinander und zum Oberziel zu betrachten, d. h., ob die Ziele neutral zueinander sind, in Konkurrenz stehen oder sich komplementär bei der Erfüllung unterstützen. Die Zusammenführung von Objekt- und Wertsystem ermöglicht die Beurteilung und Optimierung von Migrationsstrategien.

Um sowohl Objekt- als auch Wertsystem und deren Zusammenhänge zu beschreiben, werden in dieser Arbeit zunächst die an der Migration beteiligten Parteien und ihre Anforderungen erfasst. Randbedingungen der Investition sind Gegebenheiten, die sich im betrachteten Zeitraum nicht ändern werden. Eine Strategie ist nur realisierbar, wenn sie sich innerhalb dieser Grenzen bewegt (vgl. [Schaefer 1993]). Um auf den oben angeführten Systembegriff zurückzugreifen, definieren die Randbedingungen sowohl die Systemgrenzen, als auch die Wirkbeziehungen der Systemkomponenten untereinander. Einflussfaktoren hingegen wirken auf das System ein und ziehen Veränderungen des Systemzustands nach sich. Durch das Erfassen aller relevanten und maßgeblichen Faktoren entsteht ein Modell, das eine abstrakte und reduzierte Abbildung der Realität darstellt. Dieses Modell hat wiederum Systemcharakter (vgl. [Schneeweiß 1991]). Anhand der Variation von Einflussparametern kann der Einfluss verschiedener Umweltszenarien auf die Strategiewahl erfasst werden.

3.1.3 Werkzeuge

Für die Modellbildung werden unterschiedliche Werkzeuge herangezogen. Sie dienen der Umsetzung des erstellten Modells und stellen eine Verarbeitungskette dar. Bei der Wahl standen Pragmatik und leichte Handhabbarkeit im Vordergrund. Zur Darstellung der SysML Diagramme wird auf Microsoft Visio 2003 und eine frei verfügbare Schablone zurückgegriffen (vgl. [Hruby]). Die Darstellung der Petrinetze geschieht mit Renew 2.1, einem Java basiertem Werkzeug, zur Verfügung gestellt von der Universität Hamburg (vgl. [The Reference Net Workshop]).

Allerdings ist ein zentraler Bestandteil der benötigten Werkzeugkette nicht als Software am Markt erhältlich. Dabei handelt es sich um die Umsetzung der Modellierung und der Optimierung selbst, wie sie in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben wird. Das so parallel zur schriftlichen Ausarbeitung entstandene Programm kann jegliche Verkehrsflüsse über beliebige Netztopologien abgebildet werden. Durch die Integration entsprechender Suchstrategien und –algorithmen ist auch die Bearbeitung umfangreicherer Problemstellung zu annehmbaren Laufzeiten möglich. So werden im Rahmen des Fallbeispiels in Kapitel 5 Problemstellungen behandelt, die real existierenden Herausforderungen entsprechen. Zur Erstellung der Software zur Generierung und Optimierung von Migrationsstrategien wird AnyLogic 6.2 von XJ-Tek verwendet (vgl. [XJ Technologies]). In Abschnitt 4.4 wird das Tool beschrieben.

3.2 Modellierung des Migrationsprozesses

In diesem Abschnitt wird die Modellierung des Migrationsprozesses selbst vorgestellt. Sie ist Voraussetzung für die spätere Optimierung und Wahl der Migrationsstrategie. Es ist dabei essentiell, dass Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit gewahrt sind. Nur so ist auch für die später ausgegebene Handlungsempfehlung die notwendige Aussagekraft gegeben. Dabei steht zunächst die Erfassung der beteiligten Parteien (Abschnitt 3.2.1) und der Ableitung der von ihnen gestellten Anforderungen (Abschnitt 3.2.2) im Vordergrund. Die Leit- und Sicherungstechnik selbst stellt den Gegenstand der Migration dar, sie wird in Abschnitt 3.2.3 modelliert. Darauf aufbauend können das abzubildende (Strecken-)Netzwerk und der darauf fließende Verkehr modelliert werden (Abschnitt 3.2.4). Bei der Migration von Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik wird so die örtliche Verteilung des Systems abgebildet. Aus den damit erfassten Eigenschaften des Systems lassen sich die erlaubten Migrationsschritte und -ziele ableiten (Abschnitt 3.2.5). Dieser Abschnitt stellt alle notwendigen Schritte dar, um im Abschnitt 3.3 den strategischen Spielraum darzustellen.

3.2.1 Anwendungsfalldiagramm

Alle für den zu modellierenden Prozess relevanten Parteien werden im Rahmen der Erstellung des Anwendungsfalldiagramms (Use Case Diagram) identifiziert. Die erläuterten Zusammenhänge sind in Abbildung 11 im Anwendungsfalldiagramm des Migrationsprozesses dargestellt. Durch die Interaktion der als Männchen dargestellten Parteien mit dem Prozess ergeben sich Anwendungsfälle, die für die weitere Modellierung wegweisend sind. Sie lassen sich teilweise in weitere Anwendungsfälle untergliedern. Schließlich werden aus ihnen direkt Anforderungen abgeleitet.

Die beiden zentral an der Migration der LST beteiligten Gruppen sind die Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU). Sie führen gemeinsam den Betrieb durch und stellen die dafür benötigten Systeme, also Fahrzeuge und Infrastruktur, zur Verfügung.

Die Aufsicht über den Betrieb haben nationale Behörden, wie das Eisenbahnbundesamt (EBA) und die Bundesnetzagentur sowie europäische Behörden wie die European Railway Agency (ERA). Sie beeinflussen den Betrieb und die Zulassung maßgeblich und somit auch die ETCS-Migration.

Die Politik, also die Parlamente und Regierungen der jeweiligen Länder sowie der EU, bestimmen die Rahmenbedingungen des Eisenbahnverkehrs. In einem liberalisierten Markt nehmen sie kaum noch Einfluss auf die EVU, stellen aber bspw. einen Großteil der infrastrukturseitigen Finanzmittel zur Verfügung. Von ihrer Seite werden die Gesetze erlassen, deren Umsetzung und Anwendung den nationalen Behörden obliegt.

Von den Unternehmen der Bahnindustrie werden die Systeme hergestellt, sowohl auf Infrastruktur- als auch auf Fahrzeugseite. Sie beeinflussen den zur Verfügung gestellten Nutzen und die anfallenden Kosten eines Systems und damit auch die Migrationsfähigkeit maßgeblich. Außerdem haben sie eine zentrale Rolle im Rahmen der Zulassung ihrer Produkte. Ohne die Zulassung ist es nicht möglich, Eisenbahnbetrieb durchzuführen.

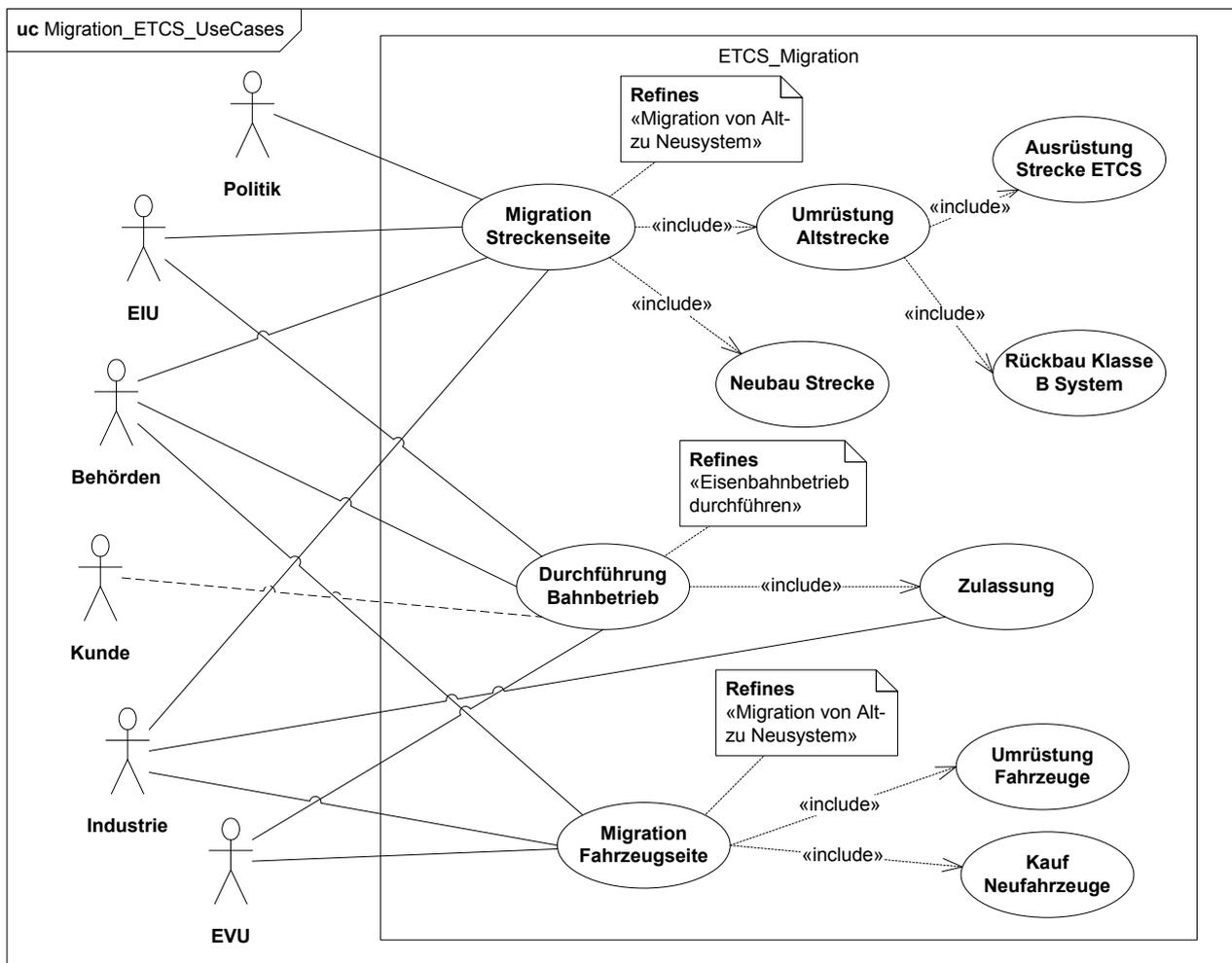


Abbildung 11: Anwendungsfalldiagramm des Migrationsprozesses

Die Gruppe der Bahnkunden darf ebenfalls nicht vernachlässigt werden, unabhängig davon, ob im Rahmen des Schienenpersonenverkehrs (SPV) oder des Schienengüterverkehrs (SGV). An den Anforderungen des Kunden hinsichtlich Transportgeschwindigkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Kosten muss sich das System Bahn messen. Wie gut die Anforderungen erfüllt werden, spiegelt sich schließlich im Modal Split wider, also der anteiligen Verkehrsleistung der Bahn gegenüber Straßen-, Wasser- und Luftverkehr. Das Eisenbahnsystem stellt seinen Nutzen dem Kunden zur Verfügung, dieser Nutzen darf während und nach der Migrationsphase nicht sinken. Damit stellt der Kunde nicht nur die Anforderungen an das fertig migrierte System, durch ihn wird auch die Forderung eines unterbrechungsfreien Betriebs gestellt.

Aus den beschriebenen Beteiligten am Migrationsprozess und ihrer Einflussnahme werden die Anwendungsfälle abgeleitet. Als die drei Hauptanwendungsfälle werden „Migration Streckenseite“, „Migration Fahrzeugseite“ und „Durchführung Bahnbetrieb“ definiert.

Bei der streckenseitigen Migration kann zunächst eine Unterscheidung zwischen dem Neubau von Strecken und der Umrüstung von Bestandsstrecken getroffen werden. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, soll im Rahmen von Streckenneubauten nur von „Migration“ die Rede sein, wenn sich diese in ein bestehendes Netz einfügen. Die Umrüstung von Bestandsstrecken soll in die eigentliche Ausrüstung der Strecke mit ETCS als Klasse A System und den Rückbau der vorhandenen Klasse B Systeme, also der nationalen Systeme, untergliedert werden. Der Anwendungsfall der streckenseitigen Migration definiert die Anforderung, dass eine Migration

von Alt- zu Neusystem stattfinden muss. Die Mitgliedsländer der EU sind gesetzlich dazu verpflichtet, bei zukünftigen Projekten die TSI einzuhalten und somit die Migration zu ETCS durchzuführen (vgl. [Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2006]). An der streckenseitigen Migration sind die EIU, die Politik, nationale Behörden und die Bahnindustrie beteiligt.

Komplementär zur streckenseitigen Migration steht die Migration auf Fahrzeugseite. Analog zur Umrüstung von Bestandsstrecke oder dem Neubau sind die Umrüstung von Bestandsfahrzeugen und der Neukauf von Fahrzeugen zu sehen. Die Entscheidung, ob Bestandsfahrzeuge nachgerüstet oder ersetzt werden, hängt neben technischen Randbedingungen von der kalkulierten Restlebensdauer, der Entwicklung der Instandhaltungskosten und der Höhe der Investitionen ab. Wie schon die Migration auf Streckenseite definiert die fahrzeugseitige Migration die Anforderung einer Migration von Alt- zu Neusystem. An der fahrzeugseitigen Migration sind die EVU, die Bahnindustrie und die jeweiligen nationalen Behörden beteiligt.

Die Durchführung des Bahnbetriebs darf während der Migration nicht unterbrochen werden. Dies würde von den Kunden, die die Verkehrsdienstleistung in Anspruch nehmen nicht akzeptiert. Neben den Kunden selbst sind die EIU und EVU beteiligt, sie stellen die technischen und betrieblichen Voraussetzungen. Darüber hinaus müssen auch die nationalen Behörden berücksichtigt werden. Ohne ihre Zulassung der Bahnsysteme ist ein Verkehr nicht möglich. Über den Punkt der Zulassung ist auch die Bahnindustrie an der Durchführung des Bahnbetriebs beteiligt. Die Zulassungsfähigkeit ihrer Produkte stellt eine Grundvoraussetzung dar. Der Anwendungsfall „Eisenbahnbetrieb durchführen“ stellt die Anforderung eines unterbrechungsfreien Betriebs an den Migrationsprozess.

3.2.2 Anforderungen

Aus den zuvor beschriebenen Anwendungsfällen werden nun Anforderungen abgeleitet, die von dem Migrationsprozess und dem zu migrierenden System, also ETCS, erfüllt werden müssen. Abbildung 12 stellt die Zusammenhänge dar, insbesondere aus welchen Anwendungsfällen sich die Anforderungen ableiten lassen und welche Untieranforderungen sich ergeben. Außerdem lassen sich aus einer Gruppe von Anforderungen neue Anforderungen aggregieren. Aus den Anforderungen leiten sich dann im Weiteren direkt die benötigten Funktionen und später auch die zu verwendenden Komponenten ab.

Die Anwendungsfälle „Migration Streckenseite“ und „Migration Fahrzeugseite“ definieren die Anforderung „Migration von Alt- zu Neusystem“. Daraus lässt sich die Forderung nach einer wirtschaftlichen Migration und nach einer wirtschaftlichen Systemgestaltung ableiten. Diese Anforderungen müssen erfüllt sein, damit die Migration als solches gerechtfertigt ist. Das spiegelt sich auch in den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Gründen für eine Migration wider.

Generell muss ein wenigstens auf mittlere Sicht positives Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegen. Dies kann monetär bspw. über einen positiven Kapitalwert erfasst werden. Nicht-monetäre Kriterien sollten Berücksichtigung finden, zum Beispiel mit der Durchführung einer Nutzwertanalyse (siehe Abschnitt 2.5.3).

Eng verknüpft mit der Forderung nach einem positiven Kosten-Nutzen-Verhältnis ist die Struktur der Lebenszykluskosten. Im Fall der LST betrifft dies in erster Linie das Verhältnis von An-

schaffungskosten zu Kosten für Betrieb und Instandhaltung. Durch die lange Lebensdauer der LST ist die Betriebsphase des Produktlebenszyklus von besonderer Bedeutung (vgl. [Bormet 2007]).

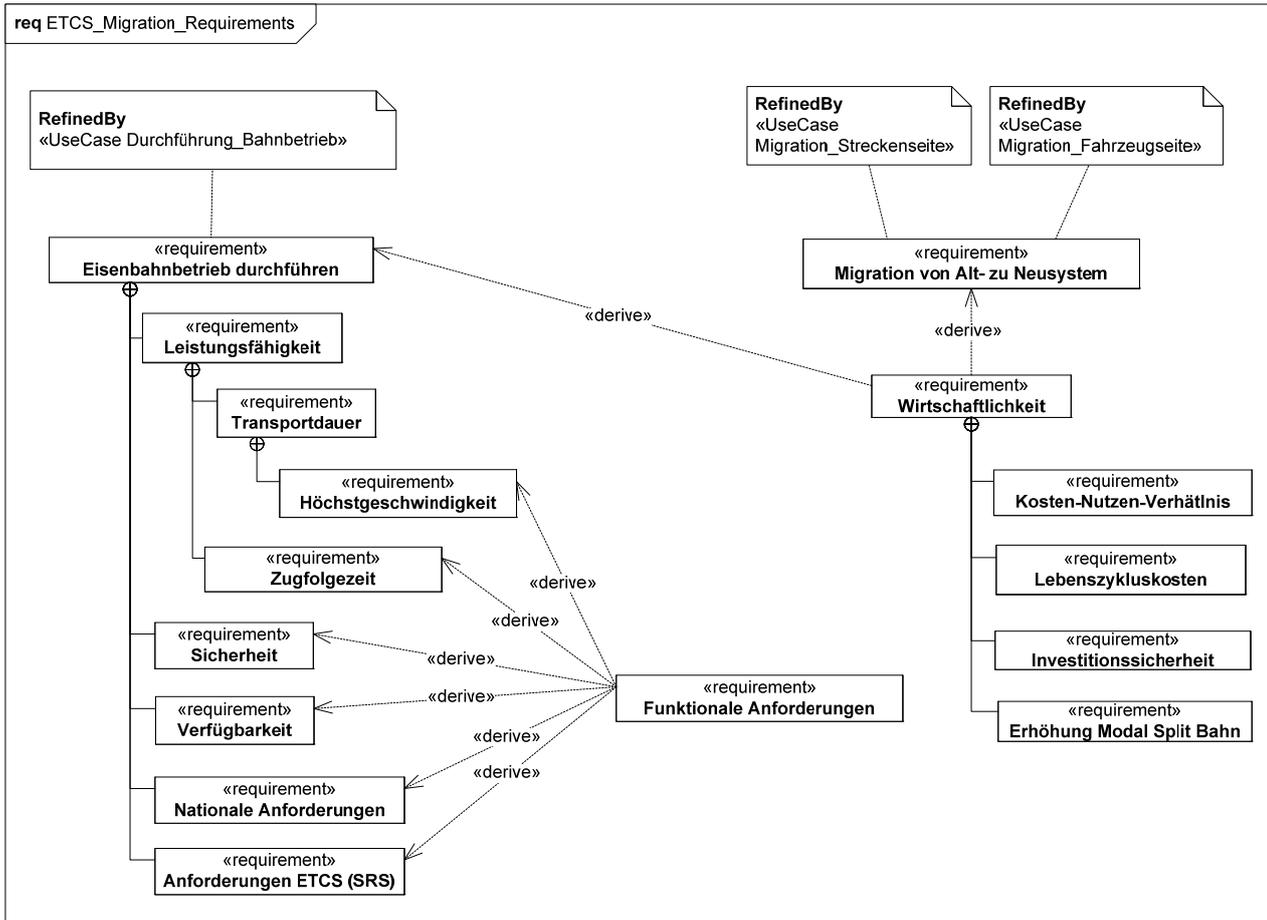


Abbildung 12: Anforderungen an die ETCS-Migration

Ein als K.O.-Kriterium zu bezeichnender Aspekt ist die Investitionssicherheit. Kann diese nicht glaubhaft untermauert werden und besteht die Gefahr, dass weitere, schlecht oder gar nicht kalkulierbare Folgeinvestitionen für die Aufrechterhaltung des Betriebs notwendig werden, verliert das Klasse A System seine Attraktivität. Dieser Punkt bezieht sich vor allem auf die Erfüllung der zugrunde liegenden Spezifikationen bzw. die Frage, ob eine Erfüllung der Spezifikationen ausreicht, um die gestellten Anforderungen zu erfüllen, vgl. dazu insbesondere [Hase 2009] und [Bolli und Rothbauer 2009]. Die Netzwerktheorie beschreibt, dass sich ein Marktteilnehmer nur für eine neue Netzwerktechnologie entscheidet, wenn er sich einer hinreichenden zukünftigen Anzahl an Nutzern sicher sein kann. Diese wird nur erreicht, wenn der heutige Standard auch in der Zukunft gültig ist. So wird sichergestellt, dass die Technologie, in die heute investiert wird zukunftssicher ist. Kann dies nicht glaubhaft vermittelt werden, kann der Marktteilnehmer nicht von einer wachsenden Zahl an Nutzern und keiner Erfüllung des erwarteten Nutzens ausgehen. Die Investitionssicherheit fehlt und somit wird nicht in die neue Technologie investiert. (Vgl. [Holzhausen 2004]) Auf die Migration von ETCS angewendet bedeutet das, dass ohne einen glaubhaften Nachweis der Interoperabilität des Systems keine Investitionen getätigt werden und somit keine Migration stattfinden wird.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht sollte das neue System zu einer Erhöhung des Modal Split zu Gunsten des Schienenverkehrs beitragen. Dies ist der Fall, wenn den Bahnkunden im Güter- und Personenverkehr ein gegenüber dem Straßen-, Luft- und Wasserverkehr attraktiveres Angebot gemacht werden kann. Voraussetzung dafür ist neben einer günstigen Kostenstruktur des Betriebs auch die Erfüllung der geforderten Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit. (Der Komfortaspekt soll an dieser Stelle außen vor gelassen werden, da im er Bezug auf die Leit- und Sicherungstechnik von untergeordneter Bedeutung ist.) Eine solche Perspektive kann auch hohe Investitionen und damit verbundene Risiken für die beteiligten Unternehmen rechtfertigen. (Vgl. [van der Werff und Klinkhamer 2009])

Da die Forderung nach einem unterbrechungsfreien Bahnbetrieb vom Kunden ausgeht, kann dieser Aspekt auch der Forderung nach Wirtschaftlichkeit zugeordnet werden. Um den Eisenbahnbetrieb durchführen zu können, ist damit neben Sicherheit und Verfügbarkeit auch eine angemessene Leistungsfähigkeit gefordert. Diese soll hier untergliedert werden in die Transportdauer und die Zugfolgezeit. Als ein Aspekt für die Transportdauer wird die Streckenhöchstgeschwindigkeit herausgegriffen. Für die Bestimmung der Transportdauer ist zwar die Durchschnittsgeschwindigkeit einer Strecke ausschlaggebend, sicherungstechnisch maßgebend ist jedoch die Höchstgeschwindigkeit. Um den Eisenbahnbetrieb durchführen zu können, müssen darüber hinaus nationale Anforderungen erfüllt werden. Ergänzend dazu stehen Anforderungen, die aus der Spezifikation von ETCS erwachsen. Sie gelten unabhängig in jedem Land, das auf dieser Basis ein interoperables Zugbeeinflussungssystem aufbauen will. Aus den Anforderungen des Eisenbahnbetriebs werden funktionale Anforderungen an das installierte System abgeleitet, die im Folgenden nochmals detailliert betrachtet werden. Sie sind in Abbildung 13 dargestellt.

Die funktionalen Anforderungen lassen sich ableiten aus den Anforderungen Sicherheit, Verfügbarkeit, Zugfolgezeit, Streckenhöchstgeschwindigkeit sowie nationalen Anforderungen und solchen aus der Spezifikation von ETCS, der System Requirement Specification (SRS). Die Einhaltung der SRS soll Interoperabilität garantieren. Sie wird durch die European Railway Agency (ERA) festgelegt. Dies ist die wesentliche Erweiterung der an die vorhandenen Klasse B Systeme gestellten Anforderungen. Das lässt sich auch daraus ableiten, dass durch die Einführung von ETCS die an das jeweilige Klasse B System gestellten Anforderungen nicht unterschritten werden dürfen. Insbesondere im Bereich Sicherheit wird dies deutlich (vgl. [Eisenbahn-Bundesamt 8. Mai 1967]). Umgekehrt bedeutet das aber auch, dass ein aus ETCS-Komponenten aufgebautes Zugsicherungssystem, das jedoch nicht die SRS im Sinne der Interoperabilität erfüllt, als ein weiteres Klasse B System einzuordnen ist (vgl. [Bolli und Rothbauer 2009]). Um einen gemeinsamen Standard ETCS sicherzustellen wurden Benannte Stellen, auch Notified Bodies genannt, eingerichtet (vgl. [Müller 2010]). Diese stellen verbindliche Zertifikate für Komponenten, Strecken- und Fahrzeugeinrichtungen aus. Die Zertifizierung durch eine Benannte Stelle ist Voraussetzung, um eine Zulassung bei den jeweiligen nationalen Behörden zu erlangen.

Die Anforderung einer Fahrwegsicherung gilt für Klasse A wie für Klasse B Systeme (vgl. im Folgenden [Pachl 2000] und [Fenner et al. 2003]). Um dies leisten zu können, muss der Zug geortet werden. Dies wird durch die Forderung einer technischen Gleisfreimeldung sichergestellt. Um durch die Fahrwegsicherung verbotene Zugbewegungen auszuschließen, wird eine

Zugbeeinflussung gefordert. Es kann zwischen einer punktförmigen und einer kontinuierlichen Beeinflussung unterschieden werden. Letztere ist in Deutschland bei Geschwindigkeiten oberhalb von 160 km/h verpflichtend. Ähnliches gilt für die Geschwindigkeitsüberwachung. Sie kann punktuell zur Absicherung von Gefahrenpunkten oder permanent ausgeprägt sein. Eine kontinuierliche Zugbeeinflussung und eine permanente Geschwindigkeitsüberwachung werden darüber hinaus benötigt, um eine hohe Streckenleistungsfähigkeit mit minimalen Zugfolgezeiten realisieren zu können.

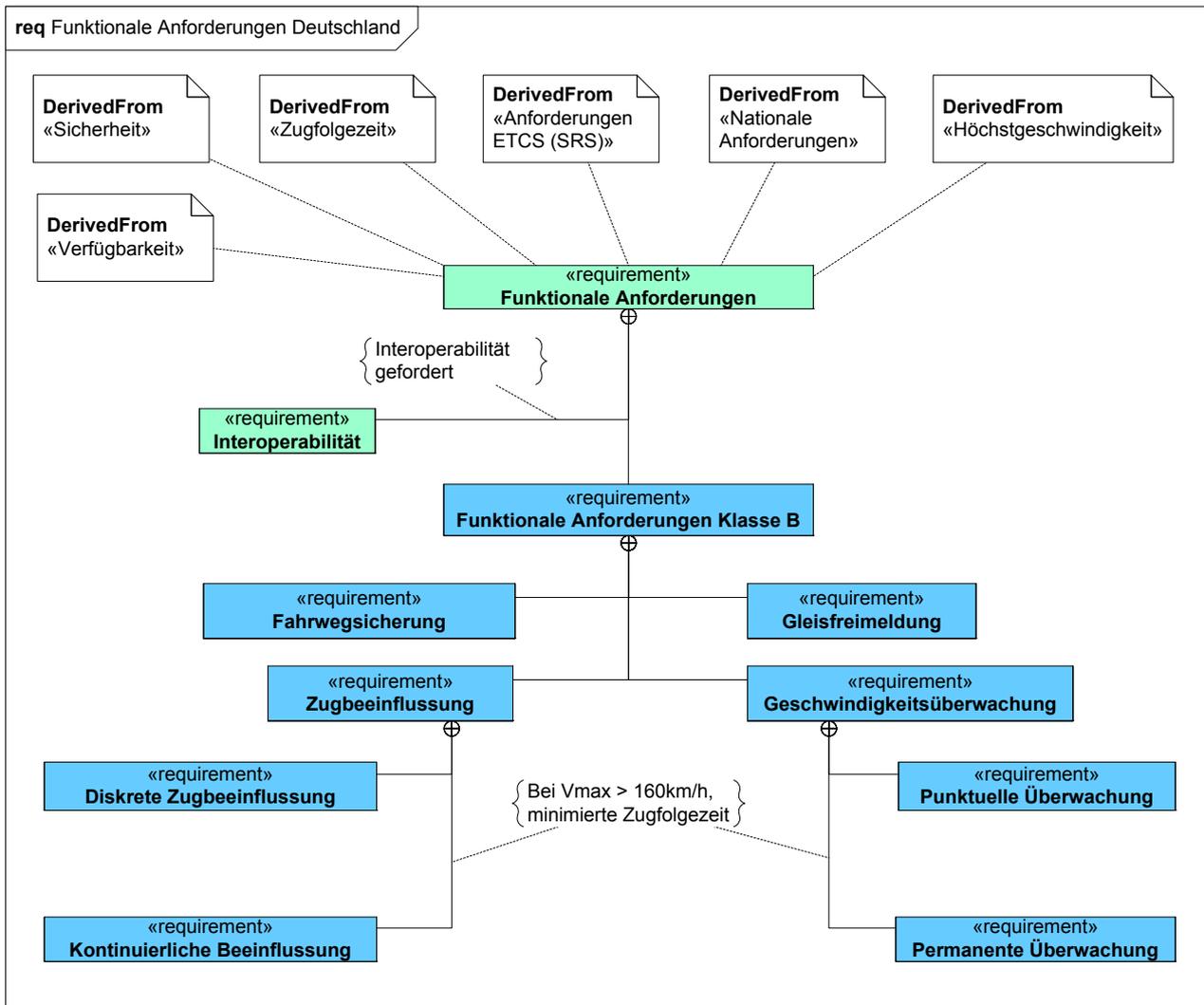


Abbildung 13: Funktionale Anforderungen an die Leit- und Sicherungstechnik in Deutschland

Die Grenze von 160km/h in Deutschland als höchste zulässige Geschwindigkeit mit punktförmiger Überwachung leitet sich vom Abstand des Vorsignals zum Hauptsignal und der Festlegung der Brems Hundertstel ab. Allerdings lassen sich in anderen Ländern unter anderen Randbedingungen durchaus technische Lösungen für das Fahren mit Geschwindigkeiten über 160km/h mit diskreter Zugbeeinflussung finden. Als internationales Beispiel sei hier Spanien angeführt. So wird auf der mit ETCS Level 1 ausgerüsteten Strecke Madrid-Barcelona eine Höchstgeschwindigkeit von 300km/h erreicht (vgl. [Forth et al. 2008]).

3.2.3 Modellierung der Sicherungstechnik

Bisher wurden die am Migrationsprozess beteiligten Parteien, deren Anwendungsfälle während der Migration, die daraus entstehenden Anforderungen und die Modellierung des zu migrierenden Netzwerks auf funktionaler Ebene beschrieben. In diesem Abschnitt wird eine weitere Definition bis auf Komponentenebene vorgenommen.

Den bisher beschriebenen Funktionen werden technische Komponenten als Funktionsträger gegenüber gestellt. Durch diesen Schritt wird für den Migrationsprozess eindeutig beschrieben, welche Technik zu den gegebenen Zeitpunkten installiert sein muss. Die Verteilung der Sicherungstechnik auf Fahrzeug- und Streckenseite wird dabei deutlich. Abbildung 14 beschreibt den für die Klasse A und Klasse B Systeme geltenden Zusammenhang zwischen Anforderungen, Funktionen und Komponenten. Die Darstellung ist wie folgt zu verstehen: „Die Funktionen des Klasse A Systems erfüllen die funktionalen Anforderungen und werden durch Klasse A Komponenten realisiert.“

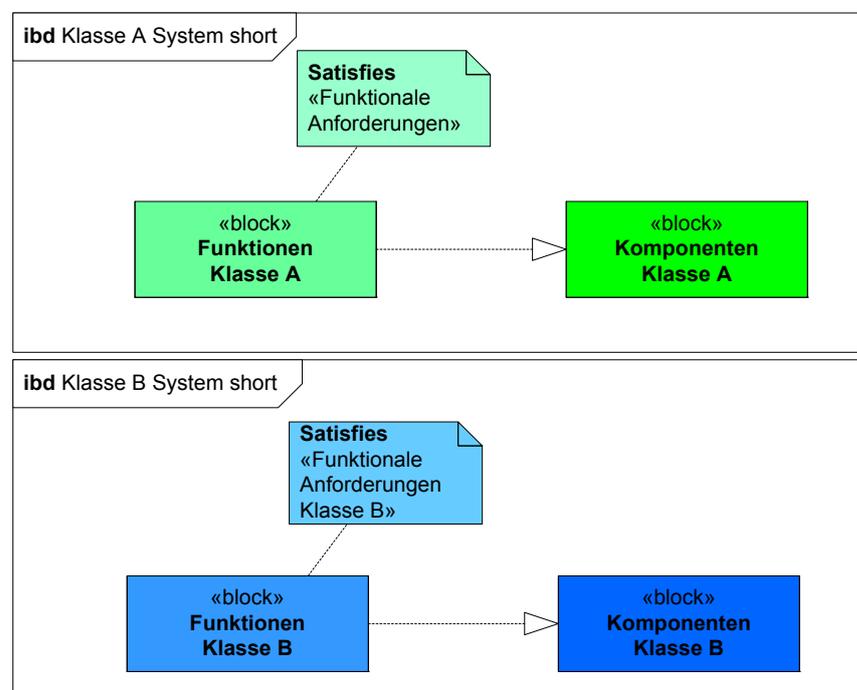


Abbildung 14: Funktionserfüllung der Sicherungstechnik

Durch die Zuordnung von Komponenten zu Anforderungen kann geprüft und sichergestellt werden, dass ein zukünftiges System die gestellten Anforderungen auch tatsächlich erfüllt. Außerdem kann so die Aufrechterhaltung des Betriebs während der Migrationsphase sichergestellt werden. Schon während der Planung sind auf Komponentenebene die Prüfung und der Nachweis möglich, dass alle notwendigen Funktionen zu allen Zeitpunkten zur Verfügung stehen. Aus der Analyse des Klasse B Systems liegt die Information vor die benötigt wird um sicher zu stellen, dass bei der Außerbetriebnahme einer Komponente eine entsprechende des Klasse A Systems zur Verfügung gestellt wird, die die vakant gewordene Funktion ausführt. So können auch nationale Eigenarten der bestehenden Systeme berücksichtigt und deren Weiterführung unter ETCS sichergestellt werden. Nur so kann auch der zukünftige Betrieb nach der Migration sichergestellt werden. Umgekehrt kann eine teure Übererfüllung von Anforderungen durch Komponenten mit einem nicht benötigten Leistungsumfang ausgeschlos-

sen werden. Zudem kann die Auswirkung einer Änderung von Anforderungen, bspw. ausgelöst durch eine politische Entscheidung, bis auf die Komponentenebene nachverfolgt werden. Eventuelle Auswirkungen auf die Migrationsstrategie, bspw. durch Terminverschiebungen oder geänderte Kosten, werden nachvollziehbar. Durch die Unterscheidung zwischen Fahrzeug- und Streckenkomponenten werden auch Verschiebungen der Funktionsallokation deutlich hervorgehoben. Diese haben unterschiedliche Belastungen der beteiligten Parteien zur Folge, zum Beispiel eine stärkere Belastung der Fahrzeughalter und eine Entlastung der EIU. Für die erfolgreiche Ausgestaltung einer Migration kann dies wertvolle Hinweise auf eventuell notwendige finanzielle Förderungen geben, um Hemmnisse für die Umsetzung der Strategie abzubauen.

Im Folgenden wird die Funktionsallokation von ETCS Level 2 als Klasse A und der LZB als Klasse B System beispielhaft durchgeführt. Anforderungen und Funktionen werden dabei Komponenten zugeordnet. Im Anhang A.2 werden die PZB und ATB sowie die ETCS Level 1 LS, Level 1 FS und Level 3 beschrieben.

Für das hier gezeigte Beispiel wurden als Anforderungen eine permanente Geschwindigkeitsüberwachung sowie eine kontinuierliche Zugbeeinflussung gewählt, sie sind sowohl in Abbildung 15 bei der LZB, als auch in Abbildung 16 bei ETCS Level 2 zu finden. Dies entspricht in Deutschland Strecken, auf denen schneller als 160 km/h gefahren wird, bzw. die eine entsprechend hohe Streckenleistungsfähigkeit zur Verfügung stellen müssen. Die Funktionen der permanenten Geschwindigkeitsüberwachung, bzw. kontinuierlichen Zugbeeinflussung erfüllen ebenfalls die Anforderungen der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung, bzw. der punktförmigen Zugbeeinflussung. In beiden Fällen ist ebenfalls sowohl eine Fahrwegsicherung durch ein Stellwerk, als auch eine Gleisfreimeldung durch streckenseitige, technische Einrichtungen gefordert. Im Falle des Stellwerks ist zu sehen, dass ETCS Level 2 ein ESTW, bzw. ferngesteuertes RSTW benötigt, während bei der LZB auch ein herkömmliches RSTW den Anforderungen genügt. Dies kann bei der Installation von ETCS Level 2 zu erheblichen Mehrkosten führen, sofern kein kompatibles Stellwerk vorhanden ist und dies ebenfalls installiert werden muss. Kommt nun die Forderung nach technischer Interoperabilität hinzu, so kann dies nur durch ETCS Level 2 gewährleistet werden, nicht jedoch durch die LZB.

Beide Systeme erfüllen also, mit Ausnahme der Forderung nach Interoperabilität, dieselben Anforderungen. Die technischen Umsetzungen weichen jedoch voneinander ab. Neben den schon erwähnten Unterschieden in der geforderten Stellwerkstechnik, wird zum Beispiel die Funktion der Leiterschleife bei der LZB bei ETCS Level 2 durch ein aufzubauendes GSM-R Netzwerk übernommen. Hier wird noch einmal deutlich, dass die beiden Systeme nicht miteinander kompatibel sind.

Da die LZB die neuen Forderungen nach Interoperabilität nicht erfüllt und zwischen beiden Systemen keine Kompatibilität vorliegt, ist für den Wechsel der LZB hin zu ETCS Level 2 eine Migration notwendig.



Abbildung 15: Funktionserfüllung bei der LRB

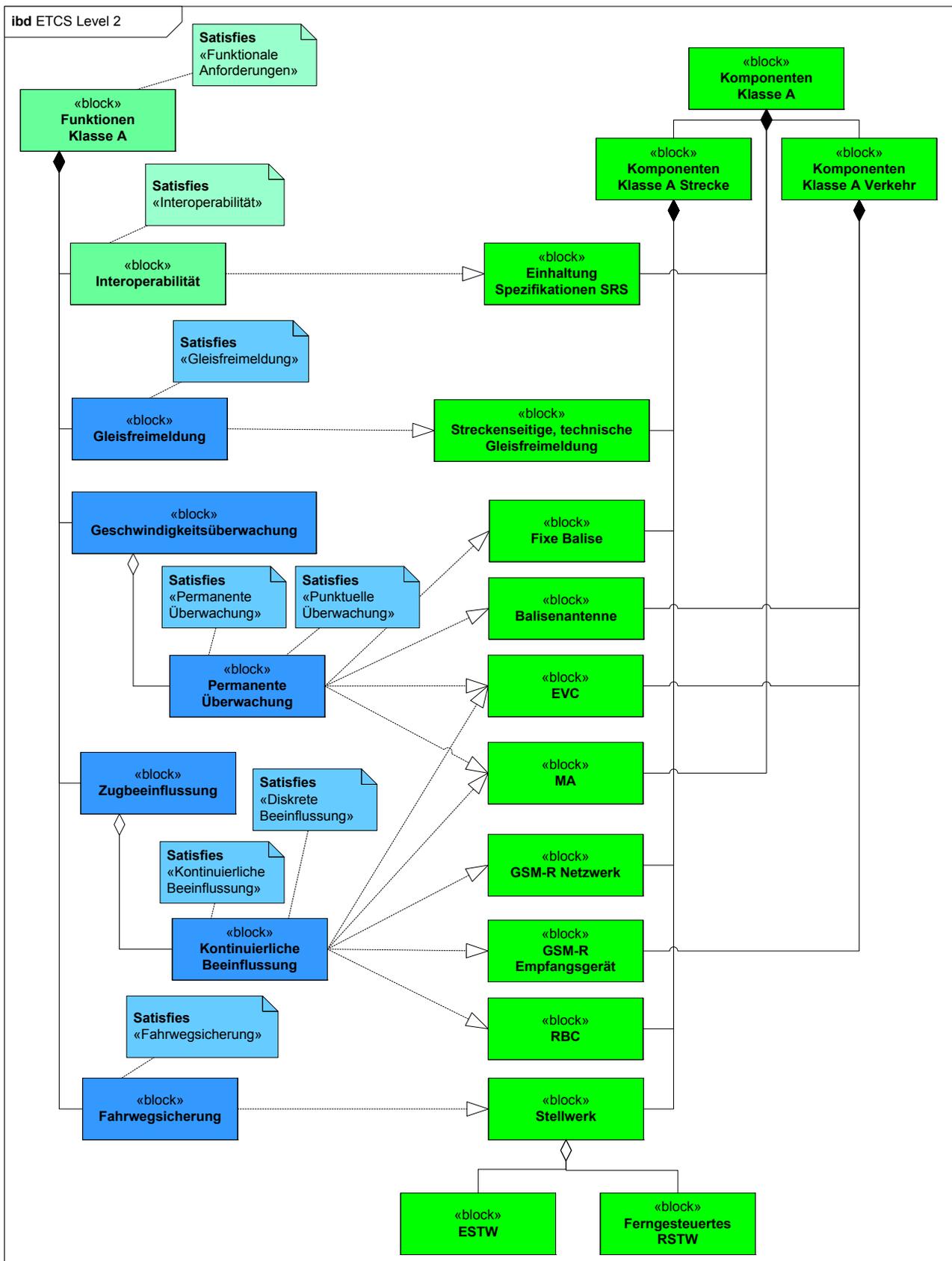


Abbildung 16: Funktionserfüllung bei ETCS Level 2

3.2.4 Modellierung des Netzwerks

Dieser Abschnitt beschreibt die Modellierung des Schienenverkehrsnetzes. Ziel ist, die Streckentopologie und den darüber fließenden Verkehr so abzubilden, dass ein für die Migration

von ETCS aussagefähiges Modell entsteht. Durch Modellierung des Netzwerkes werden die für die jeweilige Optimierung der Migrationsstrategie maßgeblichen Randbedingungen berücksichtigt. So kann sichergestellt werden, dass die entwickelten Strategien auf die tatsächlich vorzufindenden Gegebenheiten anwendbar sind. Diese sind insbesondere der Streckenverlauf, der Verkehrsfluss und Länderspezifika. Darüber hinaus können auch lokale Gegebenheiten wie die vorzufindende Stellwerksausstattung berücksichtigt werden. In Abschnitt 3.2.4.1 werden das Vorgehen und die Bestandteile des Verkehrsnetzes erläutert. Darauf aufbauend wird auf die Modellierung von Länderspezifika (Abschnitt 3.2.4.2), des Streckennetzes (Abschnitt 3.2.4.3) und des Verkehrs (Abschnitt 3.2.4.4) eingegangen.

3.2.4.1 Elemente des zu modellierenden Schienenverkehrsnetzes

Das Schienennetz der Bahn stellt ein Transportnetzwerk dar, über das die Dienstleistung der Ortsveränderung für Güter und Personen abgewickelt werden kann. Die Migration hat als Ziel die technische Ausrüstung des Schienennetzwerks zu ändern. Entsprechend wird in diesem Abschnitt erläutert, wie das Netzwerk modelliert wird. So können die jeweiligen Eigenschaften bei der Optimierung der Migrationsstrategie berücksichtigt werden.

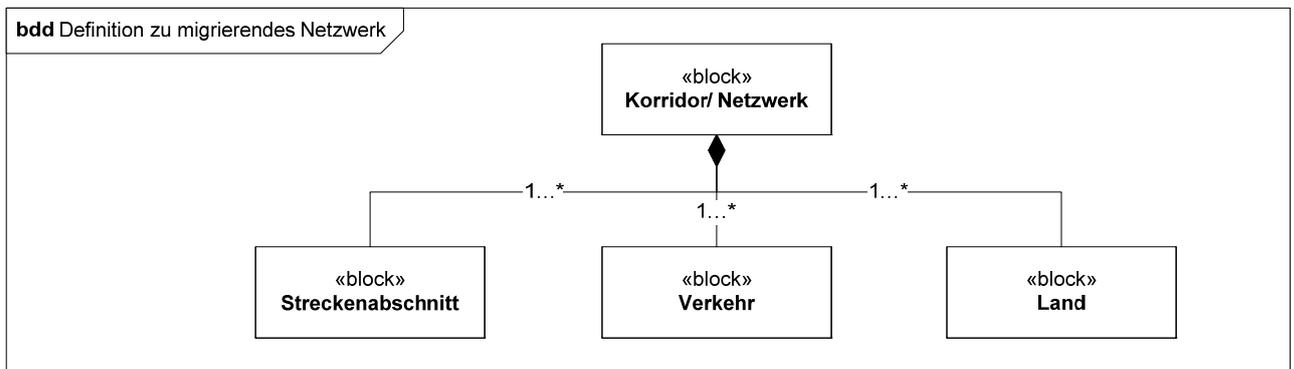


Abbildung 17: Modellierte Elemente des Netzwerks

In der Notation der Graphentheorie wird ein solches Netzwerk aus einer Menge von Knoten und Kanten aufgebaut. In der klassischen Betrachtungsweise stellen Abschnitte der freien Strecke die Kanten dar, während Bahnhöfe, Haltepunkte und Abzweigungen als Knoten aufgefasst werden (vgl. [Pachl 2000]). Von dieser Sicht soll hier insofern abgewichen werden, als das Bahnhöfe ebenfalls als Kanten aufgefasst werden. Dies ist darin begründet, dass bei einer Auffassung des Bahnhofs als Knoten, die dortige Infrastruktur nicht mehr in die Betrachtung einbezogen werden könnte. Eine solche Herangehensweise hätte eine Vernachlässigung der dort vorhandenen Anzahl an Gleisen, Weichen und Elementen der Leit- und Sicherungstechnik zur Folge. Diese hat jedoch einen signifikanten Anteil an den insgesamt vorhandenen Elementen.

Der zu betrachtende Streckenkorridor oder das Streckennetz werden durch Repräsentationen des Schienennetzes und des darüber fließenden Verkehrs abgebildet. Das Schienennetz wird dazu in Streckenabschnitte unterteilt. Diesen Abschnitten kann wiederum der Verkehrsfluss zugeordnet werden. Dies gilt insbesondere unter der Maßgabe, dass sich im Zeitraum der Migration keine gravierende Änderung des Verkehrsflusses ergibt. Die Zuordnung von Strecken und Fahrzeugen kann durch die Zuordnungsmatrix \underline{X} ausgedrückt werden. Die Elemente x_{ij} geben dabei an, ob der Verkehr j über den Abschnitt i fließt.

$$\underline{\underline{X}} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{i1} & \cdots & x_{s1} \\ \vdots & \ddots & & & \\ x_{1k} & & x_{ik} & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ x_{1o} & & & & x_{so} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, \text{ mit } x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{falls Abschnitt } i \text{ von Verkehr } k \text{ befahren} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Bei dem Verkehr ist für die Migration von besonderem Interesse, mit wie vielen Fahrzeugen er durchgeführt wird, also wie groß die jeweilige Gruppe der zu migrierenden Fahrzeuge ist. Da im Falle der ETCS-Migration gerade auch der grenzüberschreitende Verkehr betrachtet wird, erfolgt eine Zuordnung von Teilnetzen zu Ländern. Deswegen müssen auch Länderspezifika Einzug in das Modell erhalten. Die beschriebenen Elemente des zu migrierenden Netzwerks sind in Abbildung 17 dargestellt. Dementsprechend setzt sich ein Korridor bzw. ein Streckennetz aus einem oder mehreren Streckenabschnitten zusammen, über die ein oder mehrere Verkehre fließen. Die Gesamtstrecke verläuft durch ein oder mehrere Länder.

3.2.4.2 Zuordnung von Teilnetzen zu Ländern

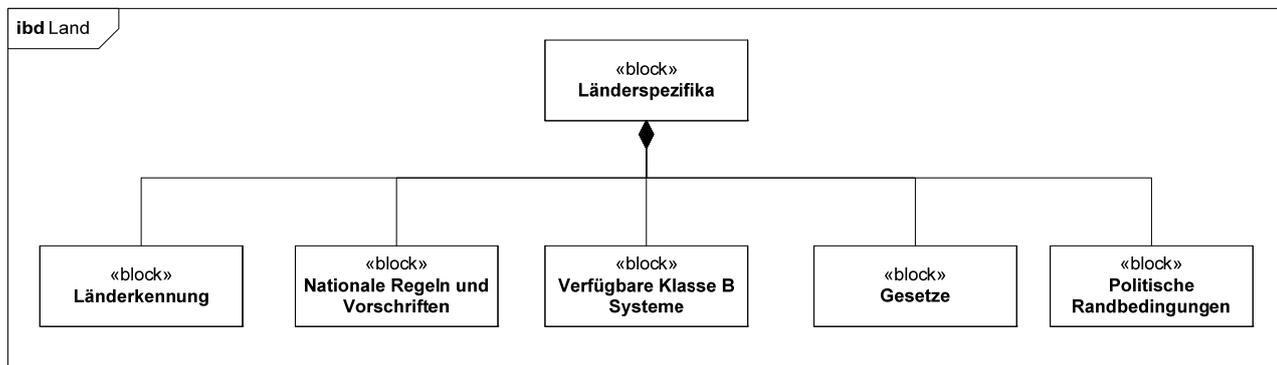


Abbildung 18: Länderspezifische Merkmale und Anforderungen

Um die Komplexität großer Netze handhaben zu können, bietet sich Streckenabschnitte auf die ähnliche Bedingungen zutreffen, zu Teilnetzen zusammenzufassen werden. Insbesondere für die Migration im europäischen Zusammenhang ist dies sinnvoll.

Durch die Zuordnung der Teilnetze zu ihren jeweiligen Ländern können die in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen länderspezifischen Merkmale und Anforderungen einem Streckenabschnitt übertragen werden. Sie sind in Abbildung 18 dargestellt. Als einfaches Unterscheidungsmerkmal für den sich über das Streckennetz bewegenden Verkehr wird eine Länderkennung herangezogen. So lässt sich später bspw. einfach prüfen, ob ein Verkehr grenzüberschreitend verläuft. Die Anforderungen setzen sich darüber hinaus aus den nationalen Regeln und Vorschriften sowie den jeweiligen Gesetzen zusammen. Damit verbunden sind die verfügbaren Klasse B Systeme des Landes. Unter dem Punkt der politischen Randbedingungen können Finanzierungsbedingungen, aber auch verkehrspolitische Vorgaben zusammengefasst werden. Jeder

Streckenabschnitt des betrachteten Schienenverkehrsnetzes muss auf diese Weise genau einem Land zugeordnet werden.

3.2.4.3 Modellierung des Streckennetzes

Dieser Abschnitt stellt das Vorgehen zur Modellierung des betrachteten Streckennetzes und einzelner Abschnitte dar. Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 dargestellt. Sie umfassen neben Randbedingungen wie Streckenlänge und Länderzugehörigkeit auch für die Durchführung der Migration maßgebliche Faktoren wie die zur Verfügung stehenden Umrüstkazapazitäten oder die möglichen Zielausrüstungen. Die Modellierung des Streckennetzes ist elementar für die Generierung und Optimierung der Migrationsstrategien.

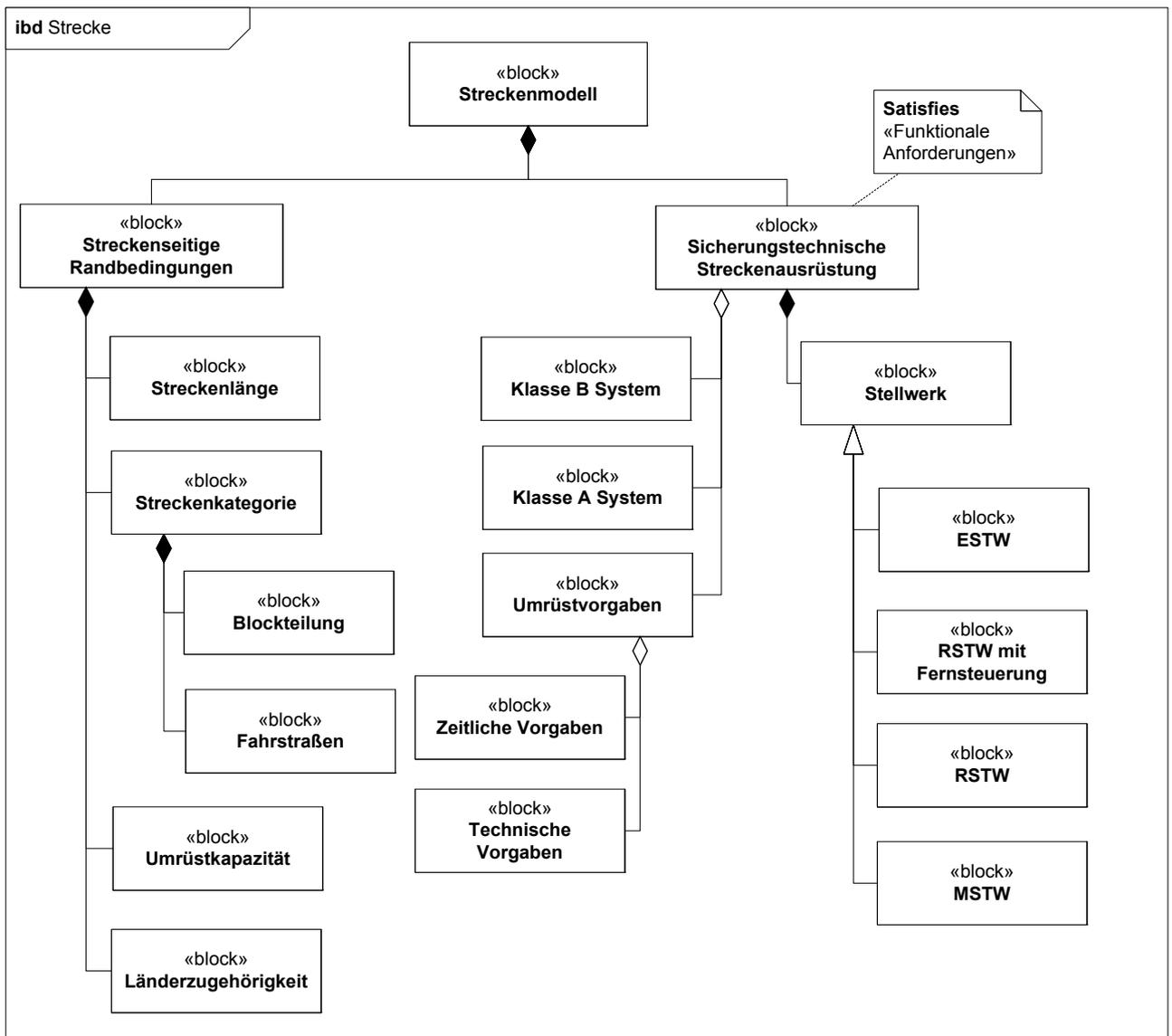


Abbildung 19: Modell der Streckenseite

Für die Definition der Streckenabschnitte muss das zu untersuchende Streckennetz bzw. der zu untersuchende Korridor in seinem Verlauf bekannt sein. Um dessen Komplexität handhaben zu können, muss es in Abschnitten betrachtet werden. Eine erste Unterteilung geschieht anhand der Länder, durch die die Strecke führt. Dies wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert. Daraus werden die nationalen Systeme abgeleitet, die potenziell auf den

Abschnitten vorhanden sein können. Außerdem kann so berücksichtigt werden, ob ein Zug Ländergrenzen passiert oder nicht.

Streckenabschnitte müssen dann detaillierter anhand betrieblicher und organisatorischer Bereiche innerhalb der jeweiligen Länder gebildet werden. Mit diesen ersten beiden Schritten ist auch die für die Migration unbedingt notwendige länder- und unternehmensübergreifende Koordination sichergestellt. Außerdem kann eine Zuordnung von für die Durchführung der Migration notwendigen Ressourcen entsprechend der organisatorischen Bereiche geschehen. Auf der letzten Gliederungsebene orientiert sich die Einteilung an den Zu- und Abflüssen von Verkehren. Sind die Abschnitte so gewählt, dass sich der Verkehr nur an den Grenzen der Abschnitte ändert, können die dazwischen liegenden Streckenkilometer als homogen angesehen werden. Jeder Abschnitt stellt eine Verbindung von Knoten zu Knoten dar. Eine Zuordnung von Verkehren und Abschnitten liefert damit ein gutes Bild des realen Verkehrsflusses über das Streckennetz.

Für jeden Abschnitt ist damit an dieser Stelle bekannt, welche Streckenlänge er besitzt. Dies kann für alle Abschnitte durch den Vektor \underline{L} , mit den Elementen l_i für die Streckenlängen der Abschnitte $i=1\dots s$ ausgedrückt werden.

$$\underline{L} = \begin{pmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_i \\ \vdots \\ l_s \end{pmatrix} \quad (4)$$

Es ist darüber hinaus berücksichtigt, auf welche Ressourcen er zur Umrüstung zurückgreifen kann und in welchem Land er liegt, bzw. welche Klasse B Systeme vorhanden sein können. Für eine Abschätzung der entlang der Strecke vorhandenen und für ETCS benötigten Elemente kann darüber hinaus die Streckenkategorie bspw. nach der Konzernrichtlinie 413 der DB herangezogen werden. Mit einfachen Mitteln lassen sich so die Blockteilung auf freier Strecke und die Anzahl der Fahrstraßen innerhalb der Bahnhöfe abschätzen (vgl. [Lackhove und Schier 2010], [Deutsche Bahn AG 2002]). Dabei werden die Projektierungsstandards aus Abschnitt 2.4.3 auf die Streckencharakteristika der Streckenkategorien angewendet. Die unten stehende Tabelle 3 zeigt dies für drei unterschiedliche Szenarien der Streckenausrüstung des Beispielnetzes in Abbildung 20. Durch die Hinzunahme von Kostensätzen lassen sich die voraussichtlichen Investitionen der Szenarien gegenüberstellen.

Für die Generierung der Szenarien wurden soweit möglich Sicherungssysteme und Rückfallebene variiert. In Deutschland ist für eine Strecke der Kategorie M230 (Mischverkehr bis 230km/h) allein ETCS Level 2 als Sicherungssystem möglich. Als Rückfallebene wurde für die Abschnitte und Bahnhöfe dieser Kategorie immer ETCS Level 1 LS gewählt. Das bedeutet, dass bei einem Ausfall bspw. des GSM-R Funks die Strecken immer noch mit einer Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h betrieben werden können. Bei der Strecke und dem Bahnhof der Kategorie M160 (Mischverkehr bis 160 km/h) sind sowohl ETCS Level 1 LS und FS, als auch Level 2 mit Level 1 LS als Rückfallebene möglich. Mit diesen Szenarien können jetzt betriebli-

che Unterschiede herausgearbeitet und die dabei entstehenden Kostenunterschiede gegenübergestellt werden. So ist bei Szenario 3 die höchste Leistungsfähigkeit zu erwarten, verbunden mit den höchsten Kosten. Zwischen den Szenarien 1 und 2 ist eine ähnliche Leistungsfähigkeit zu erwarten, wobei die Kosten für Szenario 2 geringer ausfallen. Allerdings liegt hier dann lediglich eine technische, jedoch keine betriebliche Interoperabilität wie in Szenario 1 vor. Weitere Kriterien können bspw. die betriebliche Bedeutung der Rückfallebene oder eine möglichst einheitliche Ausrüstung des Streckennetzes sein. Eine rein auf den Investitionen begründete Entscheidung wäre in den meisten Fällen nicht zielführend, vielmehr handelt es sich um ein multikriterielles Entscheidungsproblem.

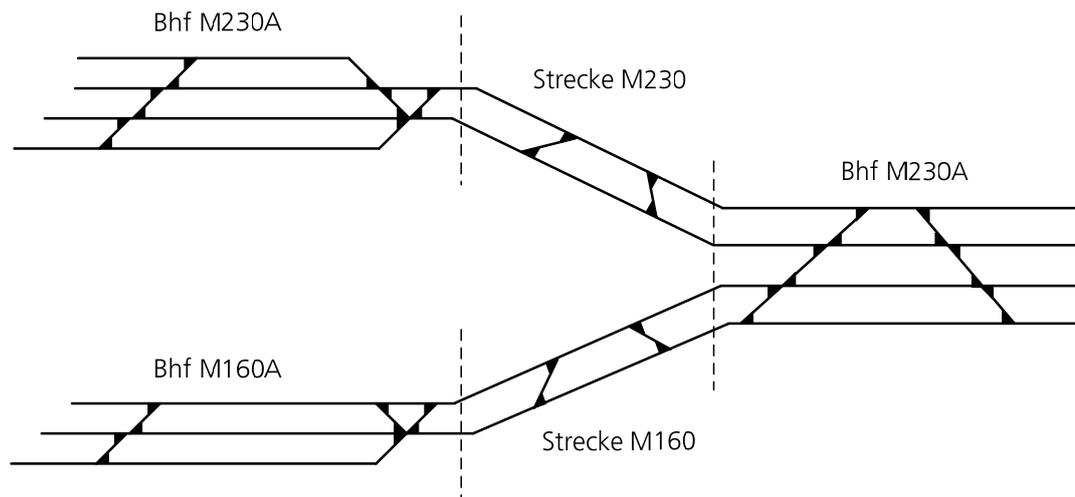


Abbildung 20: Beispielnetz für die Abschätzung zu projektierender ETCS-Komponenten (vgl.[Lackhove und Sch-eier 2010])

		Szenarien			
		1	2	3	
Strecken		<Sicherheitssystem> / <Rückfallebene>			
M230	100 km	Level 2 / Level 1 LS	Level 2 / Level 1 LS	Level 2 / Level 1 LS	
M160	100 km	Level 1 FS / -	Level 1 LS / -	Level 2 / Level 1 LS	
Bahnhöfe					
M230A	2	Level 2 / Level 1 LS	Level 2 / Level 1 LS	Level 2 / Level 1 LS	
M160A	1	Level 1 FS / -	Level 1 LS / -	Level 2 / Level 1 LS	
Hardware		Ergebnisse der Projektierung			Angenommene Kostensätze
Balisen		2728	2728	3864	2.000 €
LEU		528	528	528	16.500 €
EuroLoop		9	0	0	5.000 €
Software					
Fahrstraßen		111	80	111	15.000 €
Linking		2328	1192	2328	1.000 €
Blockabschnitte		132	66	132	10.000 €
RBC		4	4	7	3.000.000 €
Gesamtkosten der Szenarien		31.526.000 €	29.220.000 €	42.753.000 €	

Tabelle 3: Abschätzung der Hard- und Software verschiedener Projektierungsszenarien für Abbildung 20

Die bisher vorgestellten Aspekte des Streckenmodells sind statisch. Eine Ausnahme könnte lediglich die Blockteilung darstellen, wenn diese im Rahmen der ETCS-Ausrüstung für eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit optimiert wird. Im Sinne der Migration dynamisch ist jedoch die sicherungstechnische Streckenausrüstung. Sie umfasst im Migrationsprozess sowohl verschiedene Klasse B Systeme als Ausgangspunkt für eine Bestandsstrecke, als auch ein Klasse A

System als Ziel. Abhängig davon ist auch die geforderte Stellwerksausrüstung. Die streckenseitige Ausrüstung kann darüber hinaus zeitlichen und technischen Vorgaben unterliegen. So sind bspw. auf den TEN-Korridoren Terminvorgaben für die Fertigstellung von Streckenabschnitten rechtlich vorgegeben und bindend. Technische Vorgaben könnten bspw. die Wahl des ETCS-Levels betreffen. Ein weiterer Aspekt ist in diesem Zusammenhang das Netzzugangskriterium (vgl. [Bikker und Schroeder 2002]). Es formuliert die funktionalen und technischen Anforderungen als Bedingung für den Zugang. Darüber hinaus könnte vorgeschrieben werden, dass jedes Fahrzeug für die Benutzung mit einem Klasse A System ausgestattet sein muss, bzw. umgekehrt ein oder mehrere Klasse B Systeme auf der Strecke vorgehalten bleiben müssen.

Bereits bei der Definition der Anforderungen in Abschnitt 3.2.2 wurde das Zusammenspiel von streckenseitiger und fahrzeugseitiger Ausrüstung deutlich. Auch für die sicherungstechnische Ausrüstung der Streckenabschnitte muss deshalb gelten, dass sie die Voraussetzungen für die Durchführung von Verkehr, die funktionalen Anforderungen, erfüllen. Das bedeutet, dass die auf der Strecke und auf den Fahrzeugen vorhandene Sicherungstechnik zueinander passen muss. Bspw. wird so ausgeschlossen, dass auf Strecken mit alleiniger ETCS-Ausrüstung, Verkehr mit Fahrzeugen durchgeführt werden soll, die noch nicht entsprechend ausgerüstet sind.

3.2.4.4 Modellierung des Verkehrs

Dieser Abschnitt beschreibt, wie der über das betrachtete Netz oder den Korridor fließende Verkehr abgebildet wird. Dabei werden die für die Durchführung des Verkehrs verwendeten Fahrzeuge zu Gruppen zusammengefasst und den entsprechenden Abschnitten des modellierten Netzes zugeordnet. Abbildung 21 zeigt das Modell eines Verkehrs im Überblick. Neben der vorangegangenen Modellierung des Streckennetzes ist die Modellierung des Verkehrs elementar für die Generierung und Optimierung von Migrationsstrategien. Mit diesem Schritt wird die Modellierung des Schienenverkehrsnetzes abgeschlossen.

Die Schlüsselfrage für die Migration der Fahrzeugseite ist, ob der Betrieb auf geschlossenen Linien oder im offenen Umlauf durchgeführt wird (vgl. [Bikker und Schroeder 2002], [Dräger 2010]). Im Falle des Linienbetriebs würde jede Linie eine Fahrzeuggruppe darstellen (vgl. [Grala et al. 2009]). Werden die Fahrzeuge jedoch in offenen Umläufen auf dem gesamten Streckennetz oder zumindest großen Teilen davon eingesetzt, ist die Definition von Fahrzeuggruppen deutlich komplexer. Dadurch wird maßgeblich die in jedem Migrationsschritt umzurüstende Anzahl an Fahrzeugen bestimmt. Ähnlich wie auf der Streckenseite eine Unterteilung in Abschnitte stattfindet, werden hier die Fahrzeuge, die den Verkehr abwickeln, zu Gruppen zusammengefasst.

Eine detailliertere Unterscheidung der Verkehre kann bspw. anhand der eingesetzten Baureihen geschehen. Wenn für eine Baureihe ein Gebiet identifiziert werden kann, in dem sie bevorzugt eingesetzt wird, kann entsprechend zusammengefasst werden. Dies würde Änderungen in der Fahrzeugdisposition nach sich ziehen, die jedoch unter Umständen in überschaubarem Maße bleiben. Anders verhält es sich, wenn keine Zuordnung zwischen einer Gruppe von Fahrzeugen und einem bevorzugten Einsatzgebiet möglich ist. Daraus folgen entweder große Änderungen in der Disposition, wenn Fahrzeuge nur noch in bestimmten Bereichen einge-

setzt werden dürfen, oder die Migrationsstrategie für die Fahrzeugseite wird weniger gut an den Migrationsverlauf der Infrastruktur anpassbar sein. Für eine Entscheidung müssen die Alternativen ermittelt, bewertet und gegenübergestellt werden. (Vgl. [Lackhove 2010])

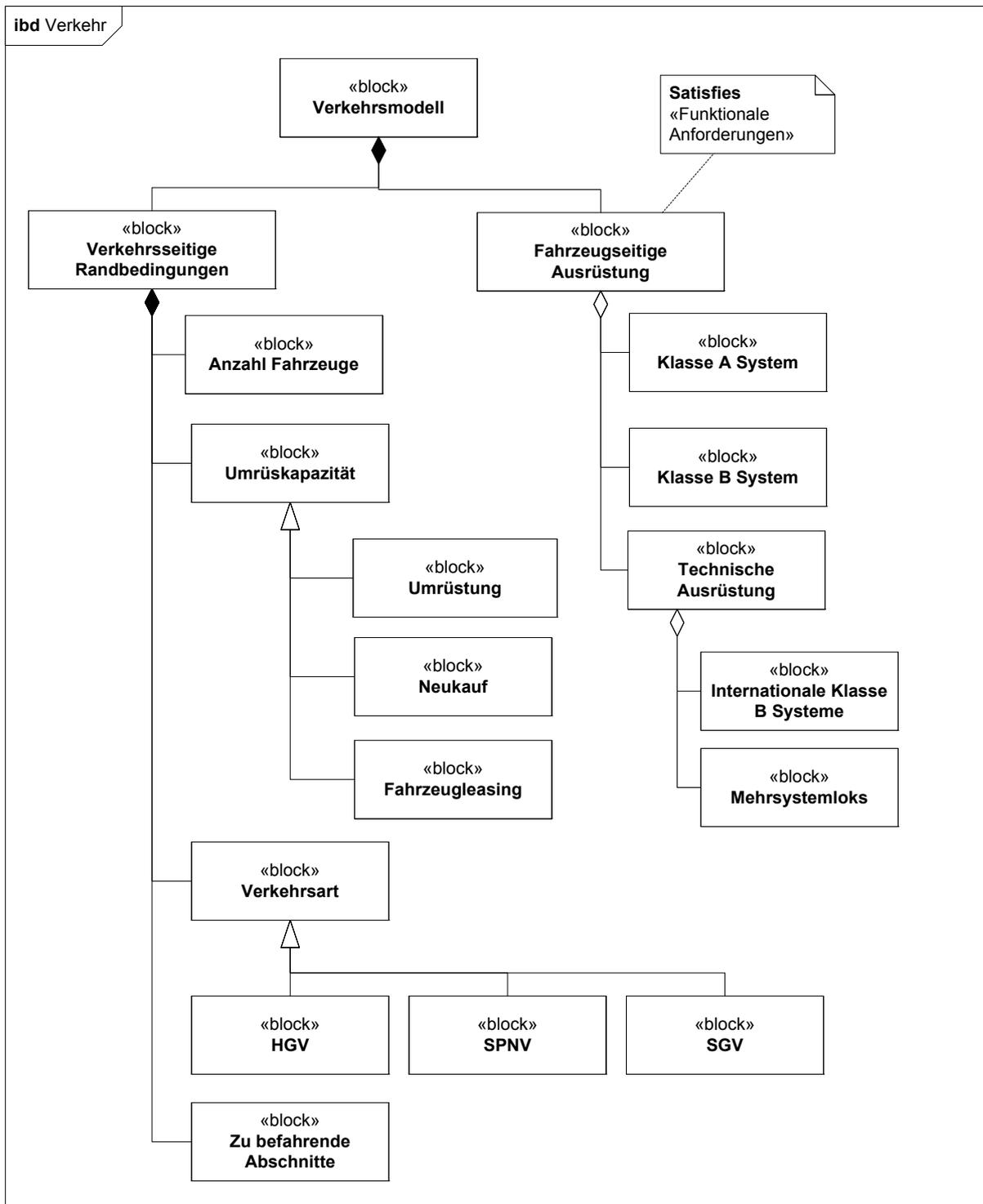


Abbildung 21: Modell des Verkehrs

Gralla stellt in [Gralla 2009] verschiedene Maßnahmen für eine migrationsoptimierte Bildung von Fahrzeuggruppen vor. Insbesondere wird auf die Bildung von Lok-Pools und Teilflotten eingegangen. Unter der Bildung von Lok-Pools wird dabei eine Kooperation mit internationalen Partner-EVU verstanden, die ihre Fahrzeugreserve zusammenlegen und damit verkleinern können. So lassen sich die Investitionen bei der Nachrüstung von Bestandsfahrzeugen redu-

zieren. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass Servicekonzept, Linienführung und Qualitätsstandards der Partner vereinbar sind. Bei der Bildung von Teilflotten wird eine bestehende Flotte unter verschiedenen Gesichtspunkten geteilt. Dies können Teile mit und ohne ETCS sein, Teilflotten mit unterschiedlichen ETCS-Ausrüstungshorizonten oder SRS-Versionen. Eine solche Strategie führt jedoch unter Umständen zu einer erhöhten Anzahl an Reservefahrzeugen. Umgekehrt besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass ein EVU zunächst ETCS-Teilflotten bildet, diese dann jedoch zu einer einzigen ETCS-Flotte zusammenlegt. So kann die Zahl der vorzuhaltenden Reservefahrzeuge reduziert werden.

Die so gefundenen Fahrzeuggruppen sind damit in ihrer Größe bekannt und werden den Abschnitten zugeordnet, auf denen sie ihre Verkehrsleistung erbringen sollen. Damit ist für jeden Abschnitt bekannt, welcher Verkehr über ihn fließt und wie viele Fahrzeuge von der jeweiligen streckenseitigen Migration betroffen sind. Dies kann durch den Vektor \underline{N} ausgedrückt werden, bei dem n_k die Anzahl der Fahrzeuge von Verkehr $k=1\dots o$ ist.

$$\underline{N} = \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_k \\ \vdots \\ n_o \end{pmatrix} \quad (5)$$

Aus der Zusammenstellung der Fahrzeuggruppe ergibt sich auch die erbrachte Verkehrsart. Daraus können Anforderungen an die streckenseitige Ausrüstung abgeleitet werden, entsprechend Abschnitt 3.2.2. Beispiele sind die in Deutschland geforderte kontinuierliche Zugbeeinflussung für Hochgeschwindigkeitsverkehr oder Anpassungen, um einer minimierten Zugfolgezeit gerecht zu werden.

Um die Umrüstdauer eines Verkehrs realistisch zu gestalten, muss bestimmt werden, welche Ressourcen zur Verfügung stehen. Darunter wird zusammengefasst, wie viele Fahrzeuge pro Jahr umgerüstet, bzw. neu beschafft oder geleast werden können. Die Entscheidung, ob Fahrzeuge umgerüstet oder beschafft werden, hängt von der technischen Machbarkeit und dem Fahrzeugalter ab.

Dementsprechend ist die Ausrüstung der Fahrzeuggruppe über die Dauer der Migration als dynamisch anzusehen. Um die Randbedingung der Aufrechterhaltung des Verkehrs gerecht zu werden, muss die fahrzeugseitige Ausrüstung zu der der befahrenen Abschnitte passen. Für jeden Verkehr und jeden Abschnitt müssen die in Abschnitt 3.2.2 formulierten funktionalen Anforderungen erfüllt werden. Das gilt insbesondere auch für die Ausrüstung mit mehreren, internationalen Klasse B Systemen bei grenzüberschreitendem Verkehr. Durch diese Forderung kann auch modelliert werden, wenn ein Verkehr erst durch die Ausrüstung mit ETCS möglich wird. In diesem Fall besitzt der Verkehr nur ein Klasse A aber kein Klasse B System. Erst wenn die gesamte zugewiesene Strecke mit ETCS ausgerüstet ist, kann die Verkehrsleistung erbracht werden.

3.2.4.5 Abbildung eines Schienenverkehrsnetzes

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Modellierung des zu migrierenden Netzwerks wird hier abschließend anhand eines kurzen Beispiels verdeutlicht.

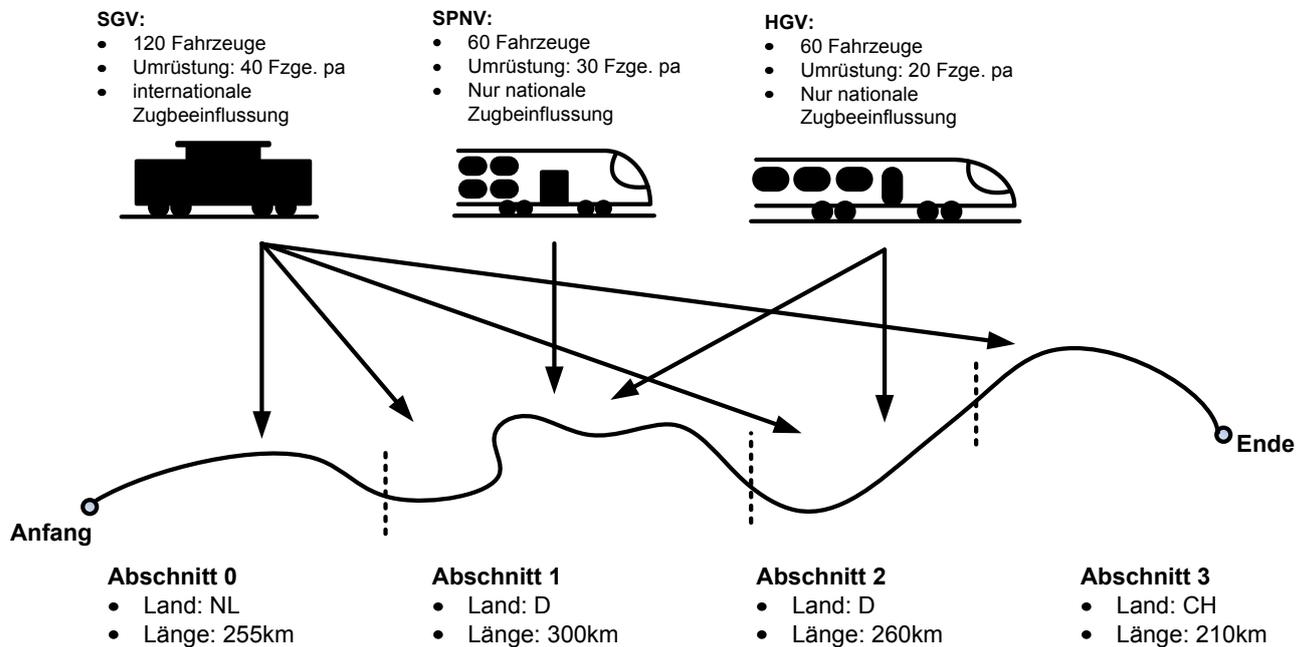


Abbildung 22: Beispiel eines Korridors

Abbildung 22 zeigt eine sehr stark vereinfachte Darstellung eines Teils des Korridors A. Er beginnt in den Niederlanden, führt durch Deutschland und endet in der Schweiz. Dabei bleibt der durch Italien bis Genua verlaufende Teil des Korridors aus Übersichtlichkeitsgründen unberücksichtigt. Auf dem Korridor findet Schienengüterverkehr (SGV), Schienenpersonennahverkehr (SPNV) und Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) statt. Die jeweiligen Fahrzeuge sind zu Gruppen zusammengefasst und es wurden die Abschnitte identifiziert, über die sie fahren. Für jede Fahrzeuggruppe ist angegeben, aus wie vielen Fahrzeugen sie besteht, wie viele Fahrzeuge pro Jahr umgerüstet werden können und ob die für grenzüberschreitenden Verkehr benötigten Klasse B Systeme installiert sind. Ein ausführliches Fallbeispiel wird in Kapitel 5 vorgestellt.

3.2.5 Darstellung der Migration

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Randbedingungen für den Migrationsprozess modelliert. Hier soll daraus nun der darauf aufbauende Ablauf dargestellt werden. Zunächst wird dazu auf die Anforderungen während der Migration eingegangen. Daraus lassen sich die erlaubten Zustände während des Migrationsprozesses und die eigentlichen Migrationsaktivitäten ableiten. Es ist damit also die Generierung der Migrationsstrategien möglich, die in den folgenden Kapiteln die Grundlage der Optimierung bilden.

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, kann die Migration allgemein durch eine Änderung der Anforderungen ausgelöst werden. Die neuen Anforderungen erfordern neue Funktionen, die wiederum durch neue Komponenten erfüllt werden müssen. Abbildung 23 stellt den funktionalen Verlauf der Migration dar.

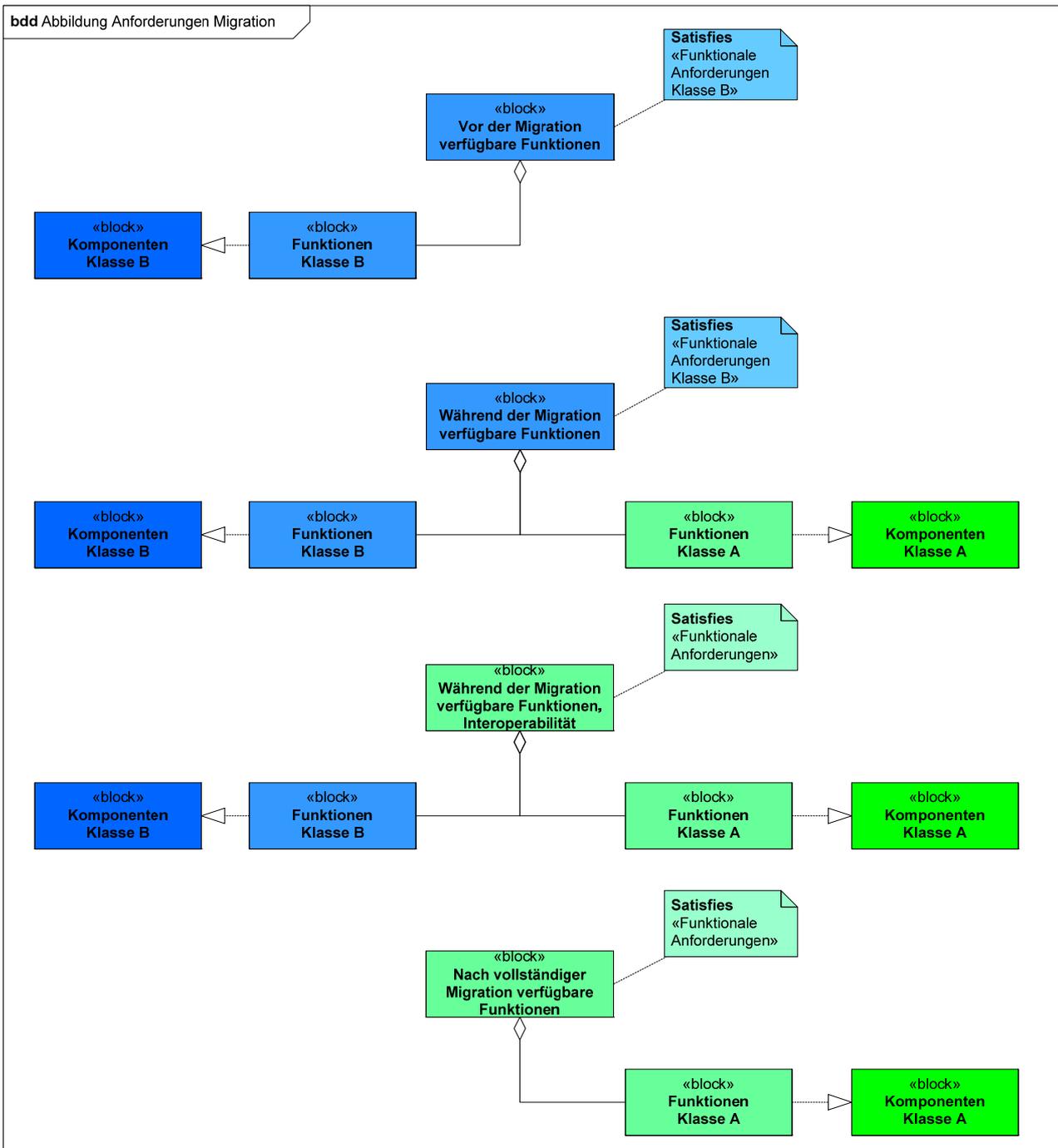


Abbildung 23: Funktionaler Verlauf der Migration

In der Ausgangssituation liegt nur das Klasse B System vor, nur dessen Funktionen und Anforderungen können erfüllt werden. Dies ändert sich während der Migration zunächst nicht. Es sind zwar Klasse A Komponenten vorhanden, die auch die entsprechenden Funktionen erfüllen, jedoch noch nicht für den gesamten zu migrierenden Bereich. Diese Phase kann als Migrationsphase im engeren Sinne bezeichnet werden (vgl. [Obrenovic 2009]). Für die spätere Optimierung kann es ein Ziel sein, diese Phase so kurz wie möglich zu halten. Die Investitionen in das Klasse A System werden zwar schon getätigt, die flächendeckende Nutzenerbringung ist jedoch aufgrund des Netzwerkcharakters noch nicht erreicht.

Die Migration kann als abgeschlossen betrachtet werden, wenn die an das neue System gestellten Anforderungen tatsächlich erfüllt werden. Dies bedeutet jedoch im Umkehrschluss

nicht, dass sämtliche Komponenten des Altsystems entfernt sein müssen. Für den Fall, dass sie entweder den Anforderungen des neuen Systems entsprechen oder in einem Bereich eingesetzt werden, in dem sich die Anforderungen nicht geändert haben, bleiben sie in Betrieb. Im Gegensatz dazu kann von einer vollständigen Migration gesprochen werden, wenn das Klasse B System vollständig vom Klasse A System ersetzt wurde. Unter Umständen können die Kostenvorteile des Klasse A Systems erst mit einer vollständigen Migration zur Gänze ausgeschöpft werden.

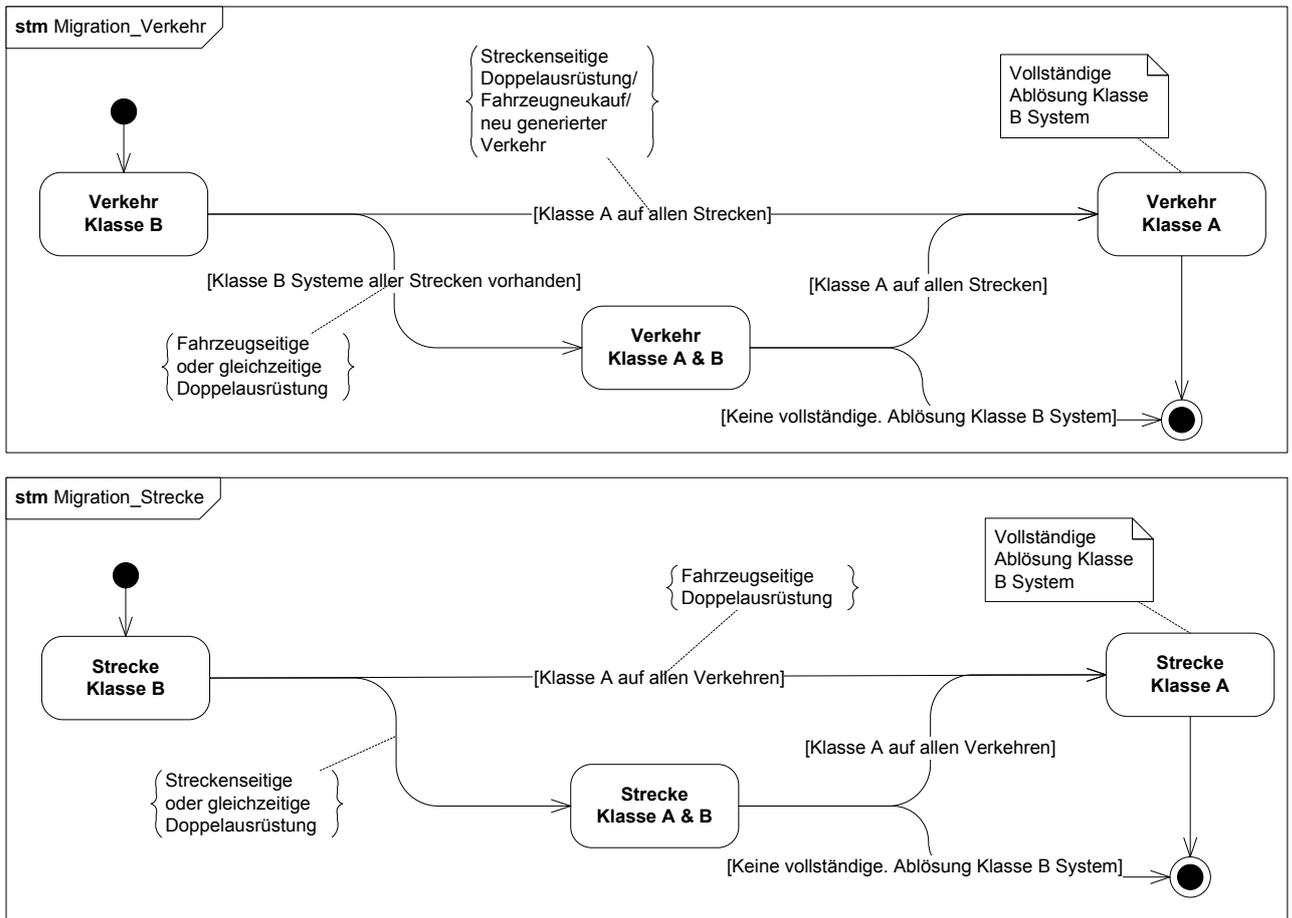


Abbildung 24: Zustände während der Migration

Für die Elemente des Schienenverkehrsnetzes, also die Streckenabschnitte und die damit verknüpften Verkehre, gilt die Randbedingung, dass sie während der Migration den Betrieb aufrechterhalten müssen. Daraus ergeben sich Restriktionen hinsichtlich ihrer erlaubten Ausrüstungszustände. Diese sind getrennt für die Seite des Verkehrs und der Strecke in Abbildung 24 dargestellt. Sie bilden die fahrzeugseitige, streckenseitige und gleichzeitige Doppelausrüstung ab, die in [Mindel 2001] dargestellt sind. Es gilt, dass eine vollständige Ablösung des Klasse B Systems für einen Verkehr erst durchgeführt werden kann, wenn auf allen zugeordneten Strecken bereits das Klasse A System vorhanden ist. Umgekehrt gilt das gleiche. Es kann auf einem Streckenabschnitt erst mit dem Rückbau des Klasse B Systems begonnen werden, wenn alle darüber fahrenden Züge mit ETCS ausgerüstet sind. Die Parallelausrüstung von beiden Systemen ist jedoch nicht an solche Randbedingungen geknüpft. Von einer gleichzeitigen Doppelausrüstung wird gesprochen, wenn auf Fahrzeug- und Streckenseite gleichzeitig mit der Parallelausrüstung von Klasse A und B System begonnen wird. In der Abbildung ist dies ausgehend von dem Ausgangszustand durch verschiedene Zustandsübergän-

ge, die jeweils an die genannten Verknüpfungen gebunden sind, hin zum Zielzustand symbolisiert.

Unterschieden wird auch, ob eine vollständige Ablösung des Klasse B Systems vorgesehen ist. Ist dies nicht der Fall, ist die Migration mit der Parallelausrüstung bereits abgeschlossen. Zu beachten ist, dass eine unvollständige Ablösung der Alttechnik nur innerhalb eines bestimmten Zeitraums oder für definierte Teilbereiche gelten kann. Würde der Erhalt der Alttechnik für das Gesamtsystem gelten, kann nicht mehr von einer Migration gesprochen werden. Dann würde es sich lediglich um die Einführung eines zusätzlichen Systems handeln.

Direkt mit den erlaubten Zuständen während der Migration sind die erlaubten Aktionen verbunden. Sie sind in Abbildung 25 dargestellt. Es ist abgebildet, welche Voraussetzungen für die Durchführung einer Aktion erfüllt sein müssen. Für diese Aktivitätsbeschreibung gelten zwei Perspektiven, eine aus Fahrzeug- und eine aus Streckensicht. Für die Betrachtung jedes individuellen Verkehrs bzw. Streckenabschnitts wird die Gegenseite immer durch alle verknüpften Elemente dargestellt. Aus Perspektive eines Streckenabschnitts sind dies alle ihn befahrenden Verkehre, aus Perspektive eines Verkehrs sind dies alle befahrenen Streckenabschnitte.

Diese Darstellung ist neutral zum gewählten Ausrüstungsziel. Das gilt auf der Streckenseite für die Wahl des ETCS Levels und die Projektierung. Auf Seite des Verkehrs wird hier nicht zwischen Nachrüstung von Altfahrzeugen oder deren Ersatz durch Neukauf unterschieden. Diese Aspekte werden durch die Modellierung der einzelnen Elemente erfasst, wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben.

Hier lässt sich auch die im folgenden Abschnitt behandelte Integration zur Modellierung des strategischen Spielraums erkennen. Immer, wenn eine Aktion durchgeführt wurde, bedeutet dies, dass potenziell ein neuer Zustand im strategischen Spielraum gefunden wurde. Das bedeutet, mit den bis hier hin vorgenommenen Modellierungen lassen sich direkt die möglichen Migrationsstrategien ermitteln. Es liegt also eine durchgängige Methodik beginnend mit der Ermittlung der Anwendungsfälle und Anforderungen, über die Abbildung der Sicherungstechnik und des Verkehrs auf dem Streckennetz hin zur Ermittlung der dafür erlaubten Migrationsstrategien vor.

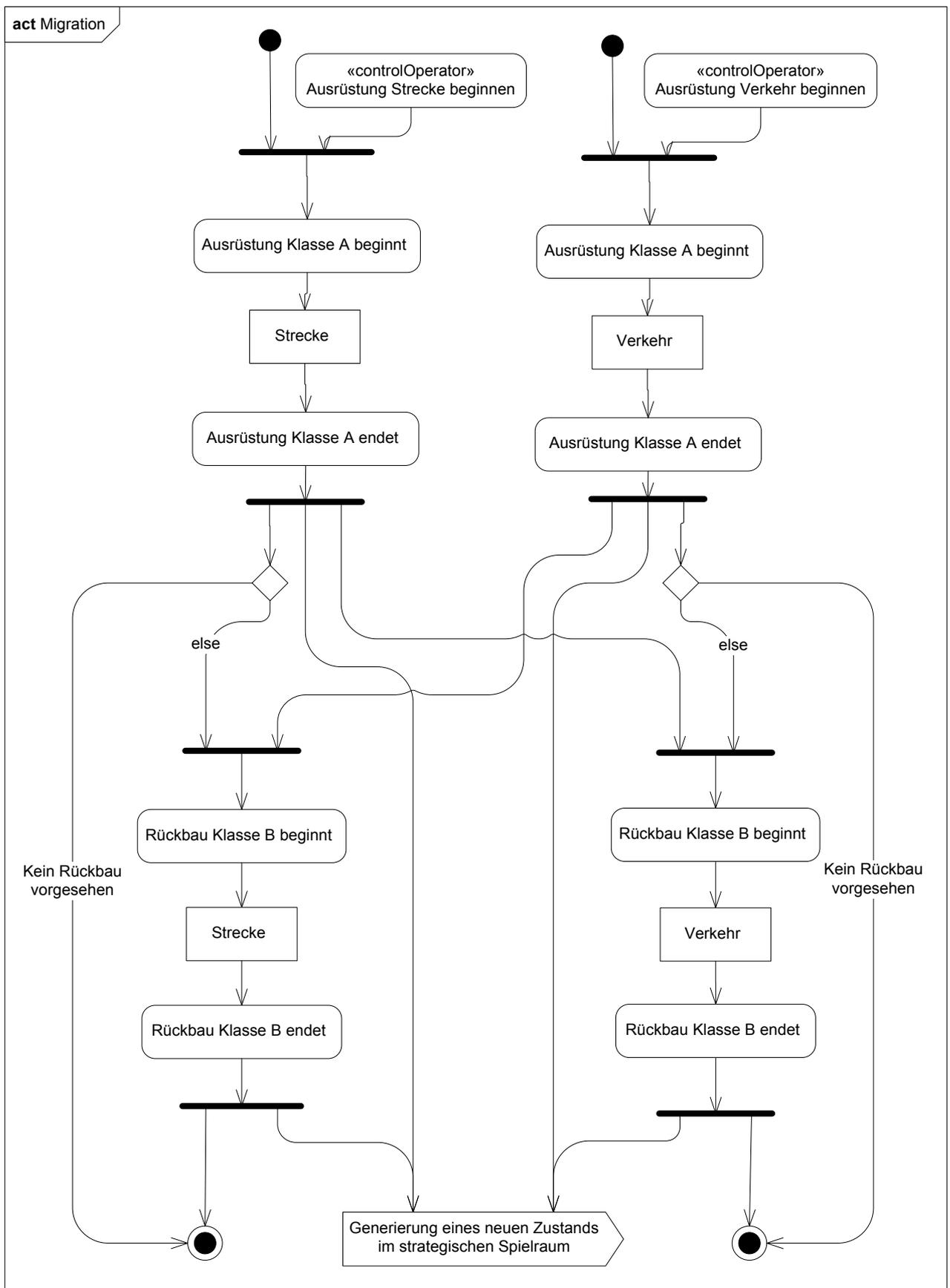


Abbildung 25: Ablauf der Migration

3.3 Modellierung des strategischen Spielraums

Dieser Abschnitt stellt dar, wie aus der vorangegangenen Modellierung in Abschnitt 3.2 die Gesamtzahl der strategischen Optionen eines Modells ermittelt wird. Der strategische Spielraum eines Migrationsvorhabens zeigt alle möglichen Migrationsziele sowie alle Pfade dorthin. Als Migrationsziel ist dabei ein technischer Zustand nach durchgeführter Migration definiert, also ein Zielzustand der Migration. Durch dieses Konstrukt ist die Trennung von Objekt- und Wertsystem möglich, so kann die betriebswirtschaftliche Bewertung auf die technisch möglichen und in diesem Abschnitt behandelten strategischen Optionen angewendet werden. Außerdem bietet sich so der Vorteil, dass bspw. Sensitivitätsanalysen für betriebswirtschaftliche Kennzahlen oder die Gegenüberstellung verschiedener Kostenszenarien auf die selbe Datenbasis zurückgreifen können, ohne dass diese jedes Mal neu erzeugt werden müsste.

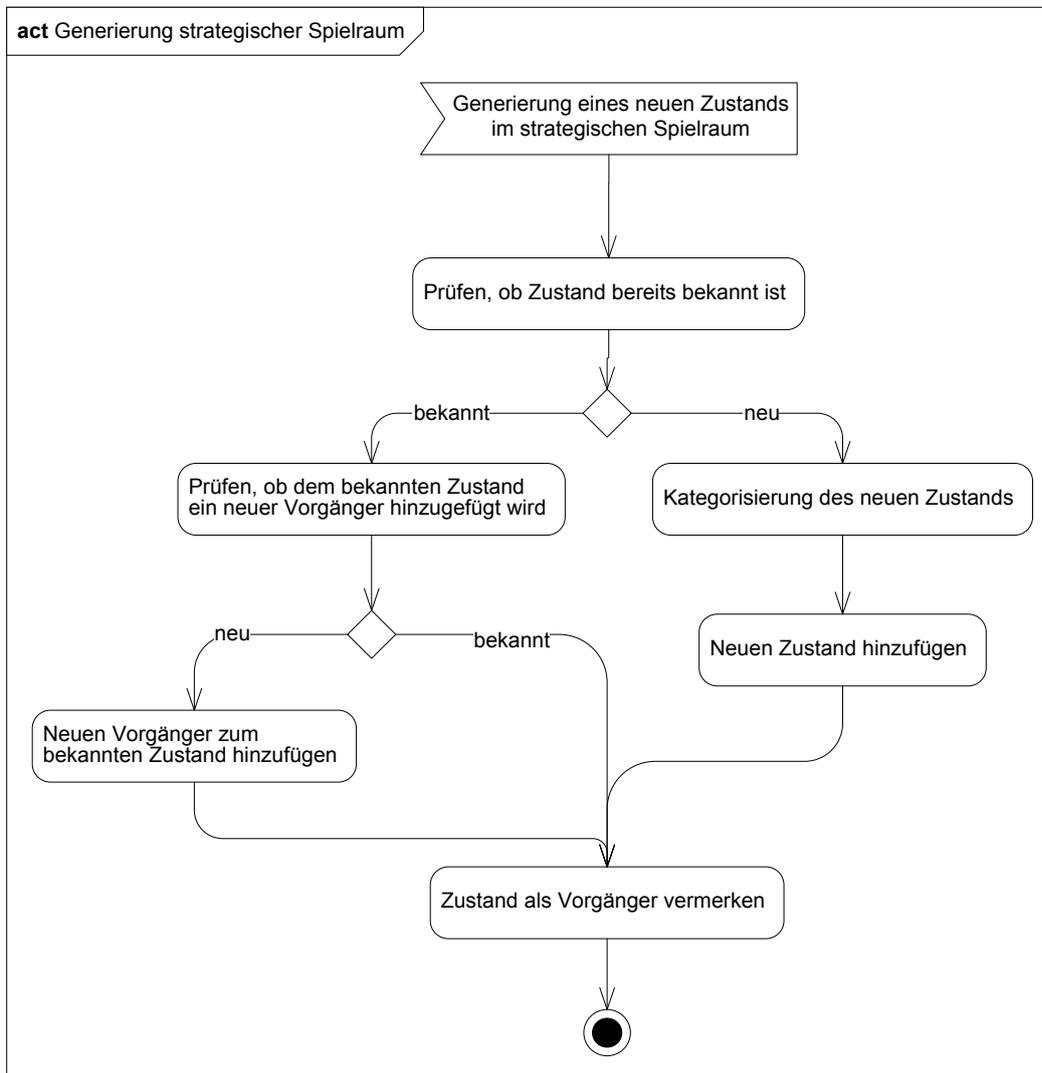


Abbildung 26: Generierung neuer Zustände im strategischen Spielraum

Abbildung 26 zeigt, wie der strategische Spielraum erzeugt wird und nimmt direkten Bezug auf Abbildung 25 im vorangegangenen Abschnitt 3.2.5. Jedes Mal, wenn sich der Ausrüstungszustand des betrachteten Verkehrsnetzes ändert, wird ein potenziell neuer Zustand gefunden. Eine Änderung des Ausrüstungszustands liegt vor, wenn eines der Elemente, also

eine Fahrzeuggruppe oder ein Streckenabschnitt, mit dem Klasse A System ausgerüstet bzw. das jeweilige Klasse B System entfernt wird. Strategische Spielräume realer Problemstellungen umfassen schnell mehrere Tausend verschiedene Zustände, woraus sich mehrere Millionen Zustandsübergänge ergeben. Die tatsächliche Anzahl an Strategien lässt sich im Voraus nicht abschätzen, sie ist maßgeblich vom Zusammenspiel der Randbedingungen, wie bspw. der Umrüstkapazitäten für Fahrzeuge und Streckenabschnitte, abhängig.

Wird ein potenziell neuer Zustand gefunden, wird im ersten Schritt geprüft, ob dieser bereits bekannt ist. Wenn nicht, wird er als neuer Zustand hinzugefügt und als Vorgänger für den nächsten zu generierenden Zustand vermerkt. Um diese Suche zu beschleunigen und auch größere Untersuchungen zu ermöglichen, wird eine zweistufige Suchstrategie verwendet. So wird für jeden Suchvorgang die zu durchsuchende Menge minimiert. Die Umsetzung dieser Suchstrategie ermöglicht die automatische Generierung des strategischen Spielraums auch bei größeren Korridoren oder Streckennetzen, da die Anzahl der Suchdurchläufe stark von der Anzahl bereits gefundener Zustände entkoppelt wird. Die Suchstrategie ist in Abbildung 27 schematisch dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

Für die erste Stufe wird der jeweils aktuelle Gesamtzustand des Netzes in einer Matrix gespeichert, bei dem die Spalten die möglichen Streckenausrüstungen (Klasse B System / ETCS L1 / ETCS L2) und die Zeilen die jeweiligen Streckenabschnitte darstellen, wie beispielhaft in Abbildung 28 zu sehen. Für die Verkehre wird ebenso verfahren. Liegt eine Streckenausrüstung für einen Streckenabschnitt oder Verkehr vor, wird das entsprechende Feld der Matrix auf 1 gesetzt, sonst ist der Wert 0. Ein sehr schneller Zugriff auf Zustände, die potenziell ähnlich sind, wird ermöglicht, indem die Zustände kodiert werden. Dazu werden die Summen über die Spalten der Zustände gebildet. Zustände, bei denen sich dieselben Summen für die Spalten ergeben, werden in einer gemeinsamen Speicherstruktur abgelegt. Für einen aktuell vorliegenden Zustand ist dadurch ein direkter Zugriff auf die zugehörige Speicherstruktur möglich, ähnlich wie durch die Angabe von Koordinaten in einem multidimensionalen Koordinatensystem. Alle dort abgelegten Zustände verfügen also für jeden Streckenabschnitt und Verkehr über dieselbe Anzahl an Umrüstungen. Ist die Speicherstruktur noch nicht angelegt, liegt ein neuer Zustand vor. Die Suche kann sofort beendet werden.

Ist die Struktur bereits angelegt, wird sie durchsucht. Dies ist die zweite Stufe der Suchstrategie. Ziel ist, einen schnellen Vergleich der Zustände zu ermöglichen, ohne einen paarweisen Vergleich jedes einzelnen Felds der Matrix durchzuführen. Dabei werden die Spalten als binäre Zahlen aufgefasst. (D.h., es wird die Summe $\sum x_i \cdot 2^i$ für jede Spalte gebildet, wobei die Elemente x_i in jeder Spalte die Ausrüstungsmerkmale der Zeile i des jeweiligen Zustands darstellen. x_i nimmt also die Werte 0 oder 1 an, je nachdem, ob ein Ausrüstungsmerkmal vorhanden ist, oder nicht.) So ist eine Unterscheidung direkt möglich, ob bspw. Streckenabschnitt 1 mit ETCS L1 ausgerüstet ist und Streckenabschnitt 2 nicht. Abbildung 28 zeigt den Vergleich eines aktuellen Zustands mit einem bereits vorhandenen. Während beim aktuellen Zustand der Abschnitt 1 mit ETCS L1 ausgerüstet ist, ist dieser Abschnitt beim vorhandenen Vergleichszustand mit ETCS L2 ausgerüstet. Ein weiterer Unterschied zeigt sich bei Abschnitt 3, hier ist die Ausrüstung mit ETCS L1 und ETCS L2 wiederum zwischen den beiden Zuständen vertauscht. Aus der Summe der Merkmale über die Spalten kann damit kein Unterschied zwischen beiden festgestellt werden, entsprechend befinden sich beide in derselben Spei-

cherstruktur. Anhand der Binärkodierung ist jedoch schnell ersichtlich, dass die Zustände nicht identisch sind. Die Felder, in denen sich die Unterschiede zeigen, sind in der Abbildung gelb markiert. Werden die Zustände innerhalb der Speicherstruktur nun wiederum der Größe der sich ergebenden Summen nach sortiert, lassen sich Suchstrategien wie Divide and Conquer effektiv anwenden und damit der Suchaufwand wiederum minimieren.

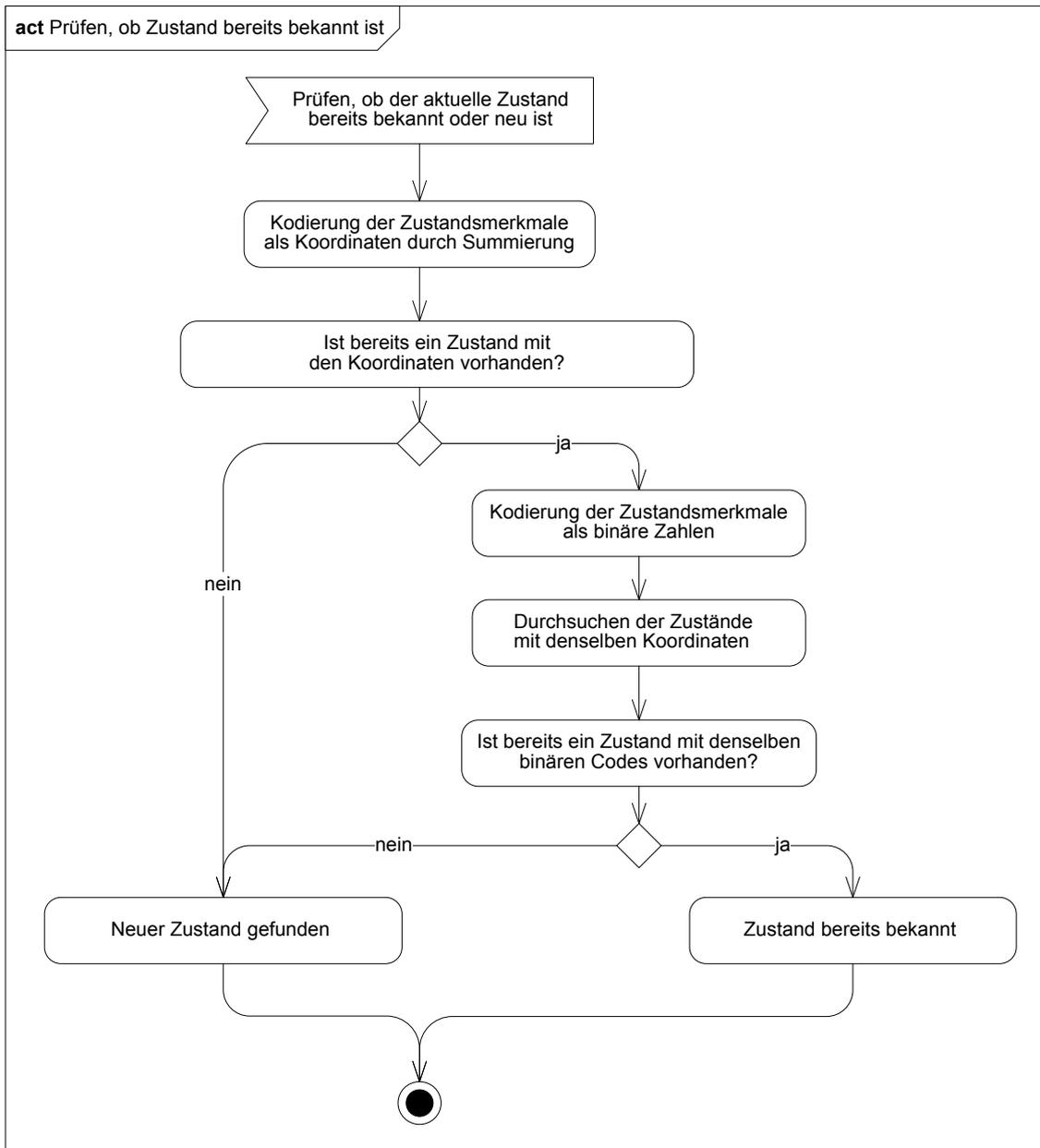


Abbildung 27: Zweistufige Suchstrategie für neue Zustände

Index Abschnitt	Zustand aktuell			Zustand vorhanden		
	Klasse B	ETCS L1	ETCS L2	Klasse B	ETCS L1	ETCS L2
1	0	1	0	0	0	1
2	1	1	0	1	1	0
3	0	0	1	0	1	0
Summe	1	2	1	1	2	1
Binärkodierung	2	3	4	2	5	1

Abbildung 28: Beschreibung und Kodierung zweier Beispielzustände für die Suche nach neuen Zuständen

Ist der erzeugte Zustand bereits im strategischen Spielraum bekannt, muss dennoch geprüft werden, ob dieser auf einem neuen Pfad erreicht wurde. Aufgrund der zu erwartenden Größe des Petrinetzes ist eine Überprüfung aller zu einem Zustand führenden Transitionen anhand einer Inzidenzmatrix ungünstig. Sie würde sehr schnell anwachsen und einen hohen Suchaufwand und Speicherplatzbedarf erzeugen. Es ist effizienter, für jeden Knoten des Petrinetzes eine Liste an Transitionen von den jeweiligen Vorgängerknoten zu erzeugen. Ist der vermerkte Vorgänger noch nicht darunter, liegt ein neuer Pfad vor und er wird hinzugefügt. Bevor der Vorgang abgeschlossen werden kann, wird der Zustand als Vorgänger für den als nächstes generierten vermerkt.

Die Zustände und deren Abfolge werden als Petrinetz, genauer gesagt als Kanal-Instanzen-Netz, gespeichert. Die Wahl auf dieses Beschreibungsmittel ist aus mehreren Gründen gefallen. Der erste und wichtigste ist, dass die Definition von Petrinetzen formal beschrieben, bekannt und weit verbreitet ist. Aus der grafischen Darstellung ist darüber hinaus intuitiv ersichtlich, welche strategischen Optionen es bezüglich der Ziele und Pfade für eine Migration gibt. Jede Stelle des Petrinetzes stellt einen eindeutig identifizierten Zustand während der Migration dar. Jede Transition stellt eine Umrüsthandlung dar, die zwei Zustände miteinander verbindet. Kann ein Zustand über mehrere Transitionen verlassen werden, liegen alternative Umrüstschritte vor. Auf dem Pfad zu einem Migrationsziel entstehen so Verzweigungen. Solche Parallelpfade können sich über viele Ausrüstungszustände erstrecken. Vereinigen sich die Pfade nach einer Verzweigung nicht wieder, liegen alternative Migrationsziele vor. Alternative Vorgehensweisen, also strategische Optionen, werden so direkt gegenübergestellt. Durch die formale Beschreibung ist außerdem eine verlässliche Weiterverarbeitung der einmal im Petrinetz abgelegten Optionen im Rahmen der Optimierung möglich. Ein einfacher strategischer Spielraum ist in Abbildung 29 als Beispiel dargestellt.

Durch die Kategorisierung der Zustände kann das Petrinetz nach verschiedenen Kriterien durchsucht werden. So können in einem ersten Schritt bspw. alle Zustände gesucht werden, bei denen die Migration beendet ist, dies sind die Migrationsziele oder Endzustände. In einem zweiten Schritt können jetzt alle Pfade identifiziert werden, die zu den jeweiligen Endzuständen führen. Weitere Kategorien sind die Herstellung von Interoperabilität und die vollständige Ablösung des Altsystems.

Für die Strategiefindung spannt sich so der gesamte strategische Spielraum auf. Alle technisch möglichen und erlaubten Zustände werden erfasst, sie stellen das Objektsystem dar. Durch das Hinzufügen des Wertsystems können Strategien bewertet, optimiert und gegenübergestellt werden. Dies bietet die Möglichkeit, für jeden Endzustand den optimalen Pfad zu identifizieren, um dann die Endzustände untereinander zu vergleichen. Dafür können Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung herangezogen werden. Die Wahl eines Migrationsziels kann zunächst unabhängig vom Migrationspfad geschehen und hängt maßgeblich von der Entscheidungssituation ab. Ein Kriterium für die Wahl des Migrationsziels wird die geforderte Streckenleistungsfähigkeit auf den Streckenabschnitten sein. Je nachdem, was für eine Nachfrageentwicklung erwartet wird, kann die zukünftige Leistungsfähigkeit über, unter oder auf dem gleichen Niveau liegen, wie die aktuell gegebene. Dies hat direkt Einfluss auf das zu wählende ETCS Level. Ein weiteres Kriterium könnte ein möglichst einheitliches ETCS Level für das Gesamtnetz sein, bspw. um Änderungen während der Fahrt für die Triebfahrzeugführer

oder die technische Vielfalt möglichst gering zu halten. Dieses Ziel kann im Konflikt zur Forderung nach einem Migrationsziel mit möglichst niedrigen Investitionen stehen. Dabei würde stets das minimal benötigte ETCS Level installiert. Mit Hilfe des aufgespannten strategischen Spielraums lassen sich diese Kriterien gegeneinander abwägen. Auf die Auswahl der Pfade zu den relevanten Migrationszielen lassen sich einheitliche Kriterien anwenden. Neben möglichst niedrigen Migrationskosten, können bspw. auch Kriterien wie ein möglichst schnelles Erreichen von Interoperabilität ausschlaggebend sein. Der strategische Spielraum kann entsprechend durchsucht werden, um die Strategien zu identifizieren, die den jeweils relevanten Optimierungskriterien entsprechen.

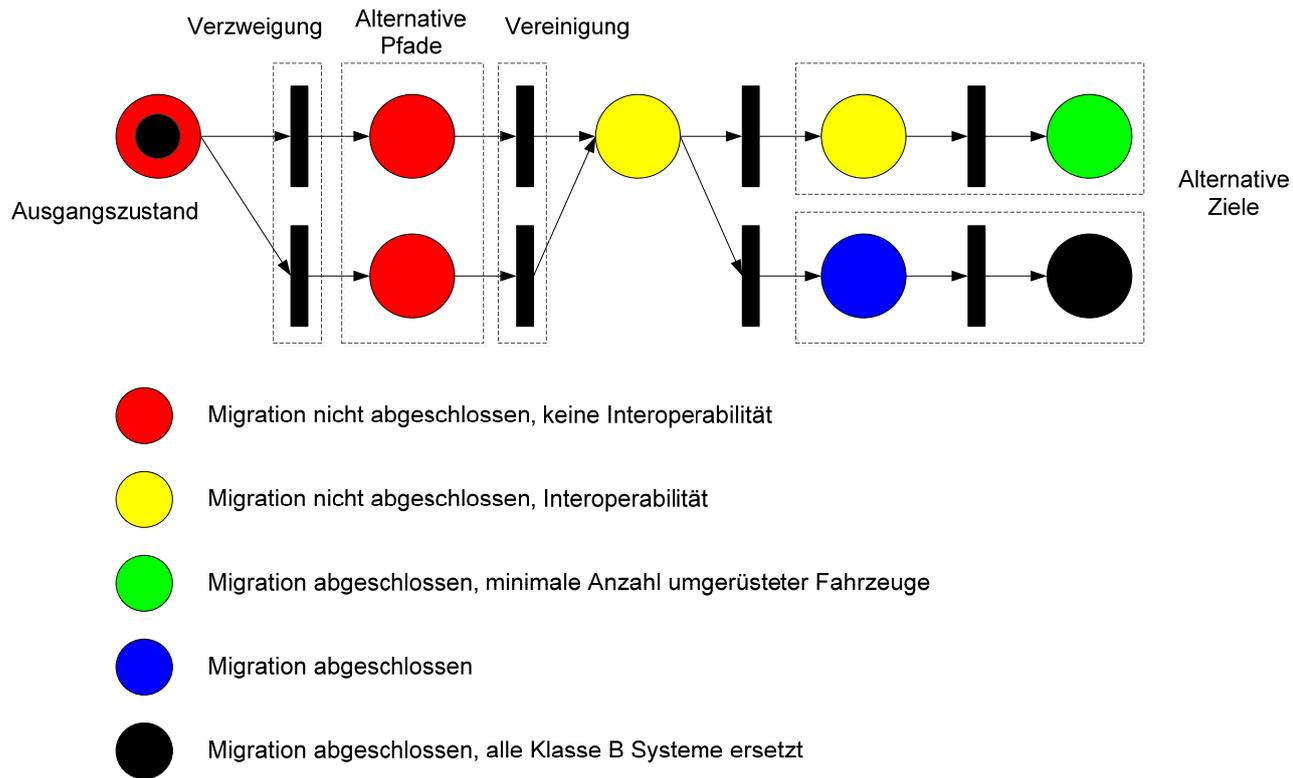


Abbildung 29: Schematische, beispielhafte Darstellung des strategischen Spielraums als Petrinetz

Mit dem Aufstellen und Durchsuchen des strategischen Spielraums zeigen sich große Vorteile der formalisierten Vorgehensweise bei der Migrationsoptimierung. Es werden alle erlaubten Migrationspfade und -ziele erfasst. So ist ausgeschlossen, dass eine Option „vergessen“ wird, wodurch ein Optimum nicht mehr erreichbar sein könnte. Außerdem ist die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Migrationsziele bei der Gegenüberstellung sicher gestellt. Es kommt zu keiner Verzerrung in der Beurteilung verschiedener Zielzustände durch nach unterschiedlichen Kriterien gewählte Migrationspfade. Änderungen in den Entscheidungskriterien während des Auswahlprozesses lassen sich schnell und nachvollziehbar abbilden. Dies sind Elemente, die benötigt werden, um bei der Entscheidungsfindung trotz des großen Problemumfangs ein nachvollziehbares, nachprüfbares und reproduzierbares Ergebnis zu erhalten.

3.4 Zusammenfassung der vorgestellten Modellierungsmethode

Damit ist die Modellbildung abgeschlossen. Abbildung 30 zeigt den Ablauf im Überblick. Dazu wurden erstmals durchgehend formale Methoden angewendet. Ausgangspunkt war die Analyse der an der Migration beteiligten Parteien mit ihren Rollen und Interessen. Auf dieser Basis wurden die Anforderungen an die Migration erfasst. Insbesondere wurde auf geänderte Anforderungen eingegangen, die ein Auslöser für die Migration sein können. Ausgehend von den Anforderungen wurden Funktionen definiert, die zur Anforderungserfüllung dienen. Eine Analyse des technischen Systems stellte den Funktionen Komponenten gegenüber. Anhand dessen konnte die Inkompatibilität von Klasse A und B Systemen nachgewiesen werden. Außerdem können so die Auswirkungen von geänderten Anforderungen für die technischen Systeme und damit auch die Migration nachverfolgt und berücksichtigt werden. Es wurde in diesem Kapitel gezeigt, wie das zu migrierende Eisenbahnnetz und der darüber fließende Verkehr erfasst werden kann.

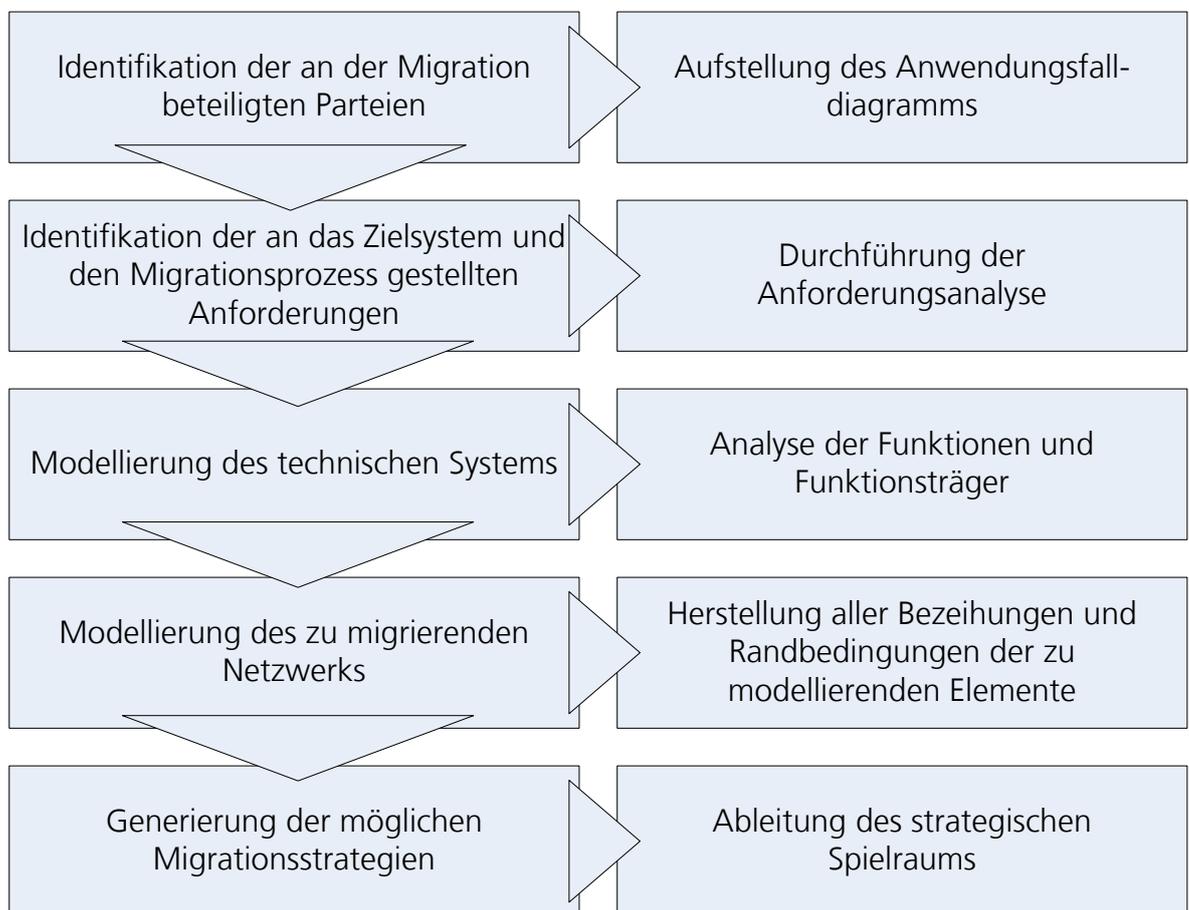


Abbildung 30: Ablauf der Modellierung des Migrationsprozesses

Durch die Verknüpfung der Verkehre, der Infrastruktur, der gestellten Anforderungen und der für deren Erfüllung notwendigen technischen Umsetzungen wurde eine automatisierte Generierung der umsetzbaren Migrationsstrategien ermöglicht. So kann die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der betrachteten Strategien sichergestellt werden. Dem Grundproblem der hohen Komplexität von Migrationsfragestellungen kann so begegnet werden. Auf

dieser Basis kann nun im folgenden Kapitel die Generierung und Optimierung von Migrationsstrategien untersucht werden.

4 Strategiegenerierung und -optimierung

Dieses Kapitel führt die in Kapitel 3 vorgestellte Modellbildung weiter und entwickelt einen geeigneten Ansatz zur Optimierung von Migrationsprozessen. Aus der formalen Systembeschreibung und Generierung von Migrationsstrategien wird es so möglich, eine optimale Umsetzung der ETCS-Migration zu ermitteln. Es ist damit eine durchgängige Systematik und Nachvollziehbarkeit von der Aufnahme der Anforderungen an die Migration bei der Modellierung bis hin zur optimierten Strategie gegeben.

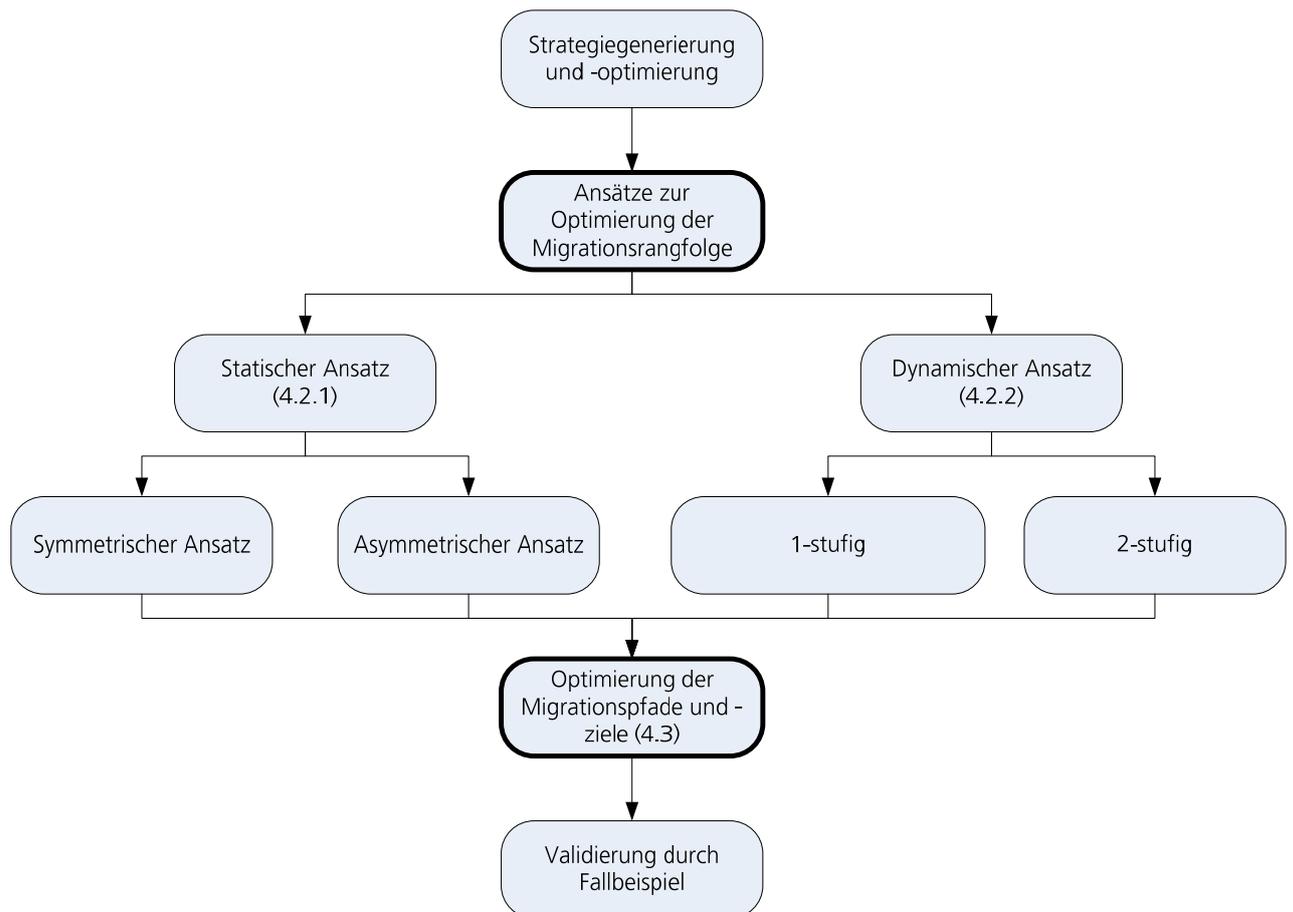


Abbildung 31: Überblick der behandelten Ansätze

Abbildung 31 zeigt die behandelten Ansätze zur Optimierung. In Abschnitt 4.1 wird aufgrund der Charakteristik der Technologiemigration die Netzwerkökonomik als Ausgangspunkt für die Entwicklung von Optimierungsansätzen gewählt. Anhand des modellierten Schienenverkehrsnetzes wird der Umfang der Optimierung ermittelt. In den darauf folgenden Abschnitten wird vorgestellt, wie die sich ergebende Komplexität behandelt und eine gültige Migrationsstrategie ermittelt werden kann. Abschnitt 4.2 behandelt dazu die Optimierung der Reihenfolge von Migrationsaktivitäten um den Nutzen zu maximieren. Hier wird zwischen einem statischen und einem dynamischen Ansatz unterschieden, die sich wiederum weiter untergliedern. Das Vorgehen, mehrere Ansätze zu entwickeln und gegenüber zustellen wurde gewählt, da grundsätzlich verschiedene Wege zur Lösung des Problems beschritten werden können. So kann zum einen die Fortentwicklung von einfachen zu komplexeren Überlegungen nachvollziehbar zu machen. Die jeweils komplexere Lösung versucht immer, eventuelle

Schwachpunkte der vorangegangenen Ansätze zu umgehen. Zum anderen können so im Rahmen des Fallbeispiels Komplexität und Ergebnisgüte der Ansätze gegenübergestellt sowie eventuelle Schwachpunkte identifiziert werden. Dabei wird der Migrationsprozess zunächst rein sequentiell betrachtet. Parallele Prozessabläufe und eine Detaillierung bis hinunter auf Komponentenebene werden in Abschnitt 4.3 behandelt. Dazu werden die Migrationspfade und -ziele hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses optimiert. Die bis zu diesem Punkt dargestellten Betrachtungen haben die Netztopologie, Verkehrsflüsse und technische Randbedingungen berücksichtigt. Externe Planungsvorgaben bspw. durch Politik oder Gesetzgebung werden in Abschnitt 4.4 anhand eines iterativen Prozesses integriert. Dieses Kapitel schließt den theoretischen Teil der Arbeit ab. Es ist damit möglich, ein Kosten-Nutzen-Optimum für die ETCS-Migration auch auf großen Netzwerken zu identifizieren. Auf den Erkenntnissen wird in Kapitel 5 ein Fallbeispiel aufgebaut.

4.1 Optimierungsansatz

Als Ausgangspunkt für die Optimierung wird in diesem Abschnitt die Festlegung des Optimierungskriteriums vorgestellt. Dafür werden Netzwerkeffekte herangezogen, wie es aus der Definition der Technologiemigration in Abschnitt 2.2 naheliegt. Auf dieser Basis soll dann eine Minimierung der Kosten, bzw. eine Optimierung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses durchgeführt werden. Für die weitere Behandlung des Optimierungsproblems wird anschließend der zu erwartende Umfang ermittelt. Damit kann das Problem in Einzelaspekte heruntergebrochen werden. In den Abschnitten 4.2 und 4.3 wird dann eine jeweils passende Optimierungsstrategie auf die Teilprobleme angewendet. So kann das Gesamtziel einer optimierten Migrationsstrategie erreicht werden.

4.1.1 Netzwerkeffekte als Ausgangspunkt

In Abschnitt 3 wurde die Modellierung des Schienenverkehrsnetzes vorgestellt und das System Bahn allgemein als Netzwerk kategorisiert. Auch die Definition der Technologiemigration in Abschnitt 2.2 beschreibt den Netzwerkcharakter. Diese Eigenschaft soll auch als Ausgangspunkt für die Optimierung verwendet werden. Dafür werden in diesem Abschnitt die in der Netzwerkökonomie beschriebenen Netzwerkeffekte herangezogen.



Abbildung 32: Netzebenen (vgl. [Knieps 2007])

Nach Knieps können Netzwerke in vier Ebenen unterteilt werden, siehe Abbildung 32. Es wird zwischen öffentlichen Ressourcen und Netzinfrastrukturen auf der Seite der Vorleistungsmärkte, sowie Infrastrukturmanagement und Netzdienstleistungen auf der Seite der Endkundemärkte unterschieden (vgl. [Knieps 2007]). Auf den Eisenbahnsektor angewendet können für das Infrastrukturmanagement und die Netzinfrastrukturen Netzwerkeffekte gefunden werden, jedoch nicht für die Netzdienstleistungen und öffentliche Ressourcen. Die für die ETCS-Migration in erster Linie zu betrachtende Netzinfrastruktur ist dabei nicht nur als Netzwerkgut, sondern als Systemgut charakterisiert. Ein solches Gut liegt vor, wenn der Nutzen ausschließlich aus der Größe des Netzwerks generiert wird. Damit kann Netzwerkökonomik auf ETCS Migration angewendet werden.

Die Identifikation der Netzinfrastruktur als Systemgut liefert einen Ansatzpunkt für die Wahl des Optimierungskriteriums. Zu jedem Zeitpunkt während der Migrationsphase hängt der durch das neue System zur Verfügung gestellte Nutzen von der jeweiligen zusammenhängenden Netzgröße ab. Daher ist eine reine Kostenminimierung ohne Berücksichtigung des Nutzens nicht zielführend. Ein solches Vorgehen erscheint immer dann angebracht, wenn der Netznutzen für ein Gut bereits feststeht und durch die Kostenminimierung nicht verändert wird, oder durch ein Einzelgut erbracht wird. Im ersten Fall können Netzwerkeffekte vorhanden sein, das Netzwerk liegt aber bereits in seiner endgültigen Größe vor. Im zweiten Fall hingegen liegen keine oder nur geringe Netzwerkeffekte vor. Für beide Situationen stellt eine Kostenminimierung ein sinnvolles Optimierungskriterium dar. Wird die Migrationsstrategie im Falle eines Systemgutes jedoch alleinig unter Kostengesichtspunkten optimiert, hätte dies häufig ein Aufschieben der Migration zur Folge. Konsequenter wäre das Ergebnis einer solchen Optimierung die Nicht-Durchführung der Migration. Dafür bestehen jedoch gerade im Falle von ETCS rechtliche Verpflichtungen. Es scheint statt einer Kostenminimierung eine Maximierung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses angebracht. Der Abschluss der Migration wird dabei als Ziel in die Optimierung integriert.

Ziel des hier vorgestellten Ansatzes ist eine möglichst effiziente Ablösung des Bestandsystems durch ETCS. Der Nutzen von ETCS liegt zum einen in der zur Verfügung gestellten Leistungsfähigkeit und Sicherheit. Die Vorteilhaftigkeit ist dabei stark von den Eigenschaften des vorhandenen Systems abhängig. Zum anderen können durch den alleinigen Einsatz von ETCS die auf grenzüberschreitend verkehrenden Fahrzeugen vorzuhaltenden Systeme reduziert werden. Der ab ETCS Level 2 mögliche Verzicht auf eine streckenseitige ortsfeste Signalisierung senkt die Instandhaltungskosten der Infrastruktur. Der Zeitpunkt der Realisierung dieser Kostenvorteile fällt jedoch häufig nicht mit dem Investitionszeitpunkt zusammen, sondern erfolgt deutlich später. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei der Ausrüstung der Infrastruktur um zentral gesteuerte Prozesse handelt, während Entscheidungen über die fahrzeugseitige Ausrüstung dezentral in den jeweiligen unabhängigen EVU getroffen werden. Elementar für eine erfolgreiche Einführung ist, dass die EVU bereit sind ihre Fahrzeugflotten freiwillig auf ETCS umzurüsten. Dies wird dann der Fall sein, wenn mit Erreichen der kritischen Masse ein hinreichend großer Anteil des Verkehrs, bzw. der gesamte Verkehr auf mit ETCS ausgerüsteten Strecken stattfindet.

An dieser Stelle ist es sinnvoll, die Begriffe „Fahrweite“ und „zusammenhängende Fahrweite“ im Bezug auf ETCS oder ein anderes neues System zu definieren.

Definition II: Fahrweite

*Mit der Fahrweite eines Systems werden die insgesamt gefahrenen Zugkilometer auf diesem System bezeichnet, die Einheit ist entsprechend [Strecke in km * Anzahl Züge]. Der Begriff bezieht sich also auf das Gesamtnetz.*

Definition III: zusammenhängende Fahrweite

Die zusammenhängende Fahrweite wird hingegen die Strecke bezeichnet, die von einem einzelnen Verkehr mit dem neuen System befahren wird. Aufsummiert über alle Verkehre ergibt sich wiederum die Fahrweite für das Gesamtnetz.

Auch Achilles greift auf das Konzept der Fahrweite zurück, vgl. [Achilles 2009] und Abschnitt 2.1. Der hier entwickelte Ansatz hat mit der Entwicklung einer konkreten Strategie eine andere Zielrichtung und berücksichtigt deshalb auch die tatsächliche Netztopologie und den Verkehrsfluss.

Die kritische Masse zur Umrüstung eines Verkehrs definiert sich über die zusammenhängende Fahrweite.

Definition IV: Kritische Masse

Die kritische Masse zur Umrüstung eines Verkehrs ist die zur Verfügung stehende zusammenhängende Fahrweite einer Fahrzeugflotte, ab der der Betreiber die Entscheidung trifft, auf ETCS umzurüsten. Die kritische Masse wird durch den Anteil der mit ETCS ausgerüsteten zusammenhängenden Fahrweite an der Gesamtfahrweite ausgedrückt und kann so Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

Der genaue Wert ist abhängig von für jeden Verkehr individuellen Faktoren, wie dem Alter der Fahrzeugflotte, deren Einsatzbereichen (bspw. Güter-, oder Personenverkehr, national oder international) oder der gewählten Unternehmensstrategie.

Durch die Optimierung soll gezielt auf diesen Zustand hingearbeitet werden. Dann wird auch zunehmend der Fall auftreten, dass auf einem Streckenabschnitt das Klasse B System nicht mehr benötigt wird, weil alle verkehrenden Fahrzeuge mit ETCS ausgerüstet sind. Damit können das Klasse B System außer Betrieb gesetzt und die vollen Kostenvorteile von ETCS realisiert werden. Die Minimierung der Kosten zur Umsetzung der Strategie kann auf dieser Basis in einem zweiten Schritt durchgeführt werden. Gibt es für die Wahl des Migrationsziels mehrere Alternativen, so können diese nun durch einen Nutzen-Kosten-Evaluierung des jeweiligen Zielzustandes verglichen und das Optimum gewählt werden.

Definition V: Nutzenbewertung der Migration

Die Bewertung des Nutzens geschieht anhand der kumulierten Gesamtfahrweite allein auf ETCS über die Migrationsdauer. Strategien, die eine frühzeitige alleinige Nutzung des Neusystems ermöglichen, werden preferiert.

*Damit wird erreicht, dass die Tötigung von Investitionen möglichst schnell einen Nutzen durch das Neusystem nach sich zieht. Zur Vereinfachung wird die kumulierte Gesamtfahrweite durch den Faktor $[1 / (\text{Strecke km} * \text{Anzahl Züge} * 1 \text{ Mio.})]$ normiert..*

Mit der Nutzenmaximierung vor der Kostenminimierung ist eine eindeutige Zielhierarchie gefunden worden, die auch das weitere Vorgehen in diesem Kapitel widerspiegelt. Abbildung 33 zeigt das Vorgehen bei der Optimierung. Zunächst findet in Abschnitt 4.2 eine Maximierung der Wachstumsgeschwindigkeit des zusammenhängenden Netzes des neuen Systems statt. Um dies zu erreichen wird die optimale Reihenfolge der Umrüstung der einzelnen Streckenabschnitte gesucht. Dabei wird noch nicht zwischen verschiedenen Migrationszielen unterschieden. Für die Wahl des Ziels wird in Abschnitt 4.3 das System bewertet, wie es sich nach Abschluss der Migration zeigt. Für jedes Migrationsziel wird dann basierend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2 der kostenminimale Migrationspfad gesucht. Das Ergebnis ist damit Maximierung des Nutzens während der Migrationsphase und ein optimales Nutzen-Kosten-Verhältnis für das Migrationsziel. Zunächst wird jedoch im folgenden Abschnitt 4.1.2 der Umfang des Optimierungsproblems, also des strategischen Spielraums, ermittelt.

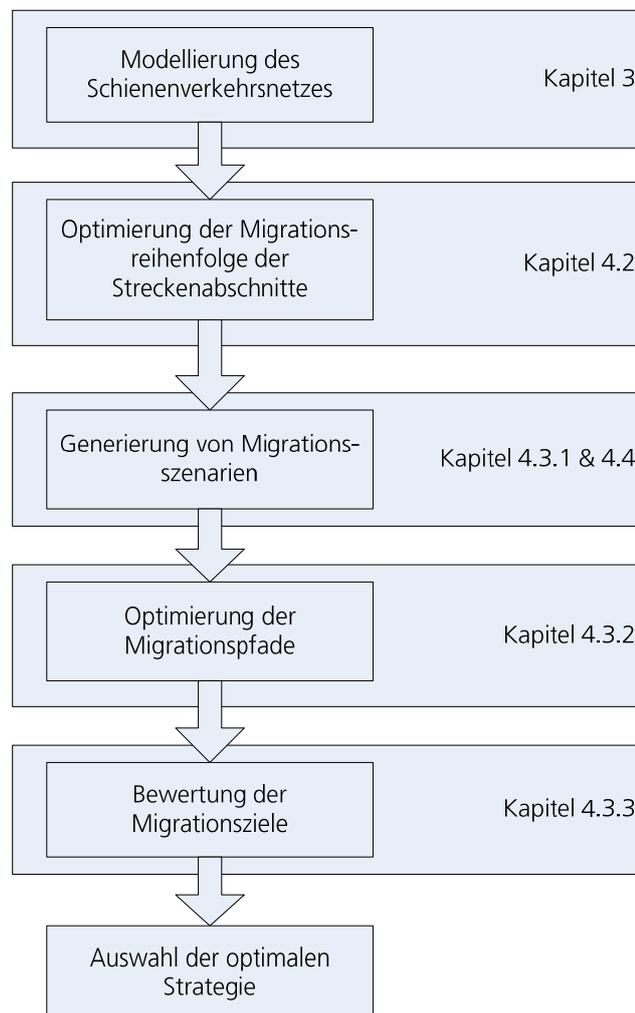


Abbildung 33: Vorgehen bei der Optimierung

4.1.2 Umfang des strategischen Spielraums

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt 4.1.1 die Zielhierarchie und die Optimierungskriterien festgelegt wurden, soll hier der Umfang des strategischen Spielraums ermittelt werden (vgl. im Folgenden insbesondere [Lackhove et al. 2010]). Durch diese Analyse ist es möglich, einen dem Umfang entsprechenden Optimierungsansatz zu finden. Es können gegebenenfalls entsprechende Anpassungen vollzogen werden, die bei einer vergleichbaren Aussagequalität

den Untersuchungsumfang reduzieren. Dieser Schritt ist für das Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung eines praktisch anwendbaren Optimierungsansatzes für Migrationsstrategien, unerlässlich.

Zuerst stellt sich die Frage, wie ein zusammenhängendes Netzwerk entstehen soll. Dies bezieht sich auf die Umrüstreihenfolge der Abschnitte. Ist eine solche gefunden, muss beantwortet werden, wie die Ausrüstung der technisch gestaltet werden soll. Dies bezieht sich auf die möglichen Migrationsziele und -pfade. Es ergibt sich folgender Grundzusammenhang:

$$N_{total} = N_{order} * N_{options} . \quad (6)$$

- N_{total} : Gesamtumfang des strategischen Spielraums
- N_{order} : Anzahl der möglichen Migrationsreihenfolgen
- $N_{options}$: Anzahl der möglichen Pfad/ Ziel Kombinationen

In diesem Ansatz wird die Koordination der Migration auf der Infrastrukturseite gesehen, da Entscheidungen über die Levelwahl oder den Verbleib des Klasse B Systems sich dort unmittelbar auswirken. Bei diesen Entscheidungen werden die Anforderungen des Verkehrs umgesetzt. Für die Koordination werden von Infrastrukturseite aus die Vorgaben für die jeweils im strategischen Spielraum zu generierende Umrüstung gemacht, die Fahrzeugseite folgt diesen. Dieses Vorgehen lässt sich auch aus dem Netzzugangskriterium ableiten. Fahrzeuge müssen ein zur streckenseitig vorhandenen Sicherungstechnik kompatibles System aufweisen um die entsprechende Strecke befahren zu dürfen.

Für die Anzahl der möglichen Migrationsreihenfolgen N_{order} liegt ein kombinatorisches Problem vor, das von der Anzahl an gefundenen Streckenabschnitten bestimmt wird. Für jeden Umrüstschrift wird ein Streckenabschnitt aus der Menge der noch nicht umgerüsteten Abschnitte gewählt. Damit ergibt sich zunächst:

$$N_{order} = s! . \quad (7)$$

- s : Anzahl der Streckenabschnitte

Die Anzahl an möglichen Pfad/ Ziel Kombinationen $N_{options}$ ergibt sich aus den Optionen pro Streckenabschnitt und der Anzahl an Streckenabschnitten. Da für jeden Streckenabschnitt alle Optionen mit allen Optionen der übrigen Streckenabschnitte in Kombination untersucht werden müssen, ergibt sich:

$$N_{options} = (n_{options})^s \quad (8)$$

- $n_{options}$: Anzahl der Optionen pro Streckenabschnitt

Die Anzahl der Optionen pro Streckenabschnitt $n_{options}$ wiederum setzt sich aus den für jeden Abschnitt zur Verfügung stehenden Migrationspfaden und -zielen zusammen. Dabei muss jeder Pfad zunächst mit jedem Ziel kombiniert werden.

$$n_{options} = g * p \quad (9)$$

g : Anzahl der möglichen Migrationsziele pro Abschnitt
 p : Anzahl der möglichen Migrationspfade pro Abschnitt

Die Anzahl Pfad/ Ziel Kombinationen bestimmt sich durch einsetzen von (8) in (9) als:

$$N_{options} = (g * p)^s \quad (10)$$

Damit ergibt sich für den Gesamtumfang des strategischen Spielraums N_{total} durch einsetzen von (10) und (7) in (6):

$$N_{total} = s! * (g * p)^s \quad (11)$$

In der Abbildung 34 wird der Umfang für einen einfachen Beispielkorridor ermittelt.

Generischer Beispielkorridor			
	Abschnitt I	Abschnitt II	Abschnitt III
Migrationsziele g	ETCS L1LS / Klasse B ETCS L1 ETCS L2 / Klasse b ETCS L2 → $g_1 = 4$	ETCS L1LS / Klasse B ETCS L1 ETCS L2 / Klasse b ETCS L2 → $g_2 = 4$	ETCS L1LS / Klasse B ETCS L1 ETCS L2 / Klasse b ETCS L2 → $g_3 = 4$
Migrationspfade p	Streckenseitige, fahrzeugseitige & gleichzeitige Doppelausrüstung → $p_1 = 3$	Streckenseitige, fahrzeugseitige & gleichzeitige Doppelausrüstung → $p_2 = 3$	Streckenseitige, fahrzeugseitige & gleichzeitige Doppelausrüstung → $p_3 = 3$
Optionen n	$n_1 = g_1 * p_1 = 12$	$n_2 = g_2 * p_2 = 12$	$n_3 = g_3 * p_3 = 12$
Anzahl Abschnitte $s = 3$			
Anzahl möglicher Umrüstereihenfolgen $N_{order} = s! = 6$			
Anzahl möglicher strategischer Optionen			
$N_{options} = n_1 * n_2 * n_3 = n^3 = n^s = 12^3 = 1.728$ (mit $n = n_1 = n_2 = n_3$)			
Insgesamt ergeben sich $N_{total} = N_{order} * N_{options} = 10.368$ Optionen			

Abbildung 34: Komplexität eines Beispielkorridors

Die Komplexität der Migrationsbetrachtung lässt sich damit wie folgt in der Landau-Notation ausdrücken:

$$\begin{aligned} N_{total}, N_{order} &\in O(x!) \\ N_{options} &\in O((g * p)^x) \end{aligned} \quad (12)$$

Während für N_{total} genauso wie für N_{order} ein faktorielles Wachstum vorliegt, wächst $N_{options}$ exponentiell. Damit liegen sehr umfangreiche Probleme vor. In den folgenden Abschnitten werden deshalb die Aspekte der Migrationsrangfolge und der möglichen Pfad/ Ziel Kombinationen getrennt betrachtet. So können unterschiedliche Lösungsstrategien auf N_{order} und $N_{options}$ angewendet werden. Dabei entsprechen die Optimierungen des Lösungsraums N_{order} der maximierten Nutzengenerierung während der Migration. Im Lösungsraum von $N_{options}$ wird die Minimierung der Einführungskosten bzw. die Maximierung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses des Zielzustands erreicht.

4.2 Optimierung der Migrationsrangfolge

In diesem Abschnitt wird die Optimierung der Reihenfolge von strecken- und fahrzeugseitigen Migrationsaktivitäten vorgestellt. Dabei wird der Migrationsprozess rein sequentiell betrachtet, parallele Abläufe werden in Abschnitt 4.3 mit einbezogen. Um eine Optimierung der Reihenfolge durchzuführen werden zwei Ansätze dargestellt, wobei der erste, statische Ansatz in Abschnitt 4.2.1 eine Optimierung mittels eines minimal spannenden Baumes erlaubt. Der zweite, in Abschnitt 4.2.2 erläuterte, dynamische Ansatz erlaubt eine Maximierung des Wachstums der zusammenhängenden Fahrweite des Klasse A Systems. Dies ist mit dem statischen Ansatz nicht möglich. Die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2 können dann für eine Optimierung der Migrationspfade- und -ziele in Abschnitt 4.3 verwendet werden.

4.2.1 Statischer Ansatz

Bei der folgenden Darstellung des statischen Ansatzes wird in zunächst auf die grundlegenden Annahmen eingegangen. Der statische Ansatz lässt sich auf eine symmetrische (in Abschnitt 4.2.1.2) und eine asymmetrische (in Abschnitt 4.2.1.3) Problemformulierung anwenden. Ein Algorithmus zur Optimierung auf Basis der Suche nach einem minimal spannenden Baum wird darauf aufbauend vorgestellt. Er kann auf beide Ansätze angewendet werden. Die Ausführungen über den statischen Ansatz werden durch eine Diskussion der Ergebnisse abgerundet. Sie bildet den Ausgangspunkt für den weiterführenden, dynamischen Ansatz. Damit können unterschiedliche Auswirkungen des Migrationsergebnisses auf Optimierungsansätze dargestellt werden.

4.2.1.1 Grundlagen des statischen Ansatzes

Der hier vorgestellte statische Ansatz beschreibt das Schienennetz und den Verkehr darauf in einer Matrix, die den verkehrlichen Verknüpfungsgrad zwischen den Streckenabschnitten wiedergibt. Der Verknüpfungsgrad gibt an, welchen Anteil der gemeinsame Verkehr am jeweils auftretenden Gesamtverkehr hat. Ein hoher Verknüpfungsgrad bedeutet also eine im relativen Vergleich gesehene hohe Fahrweite des Verkehrs. Ein Ziel der Optimierung ist es, die Fahrweite möglichst schnell wachsen zu lassen. Damit soll möglichst effizient ein Zustand erreicht werden, bei dem auf allen Abschnitten nur noch mit ETCS ausgerüsteter Verkehr vorhanden ist. Zudem ist in Bezug auf die verknüpften Abschnitte von einer zusammenhängen-

den Fahrweite zu sprechen. Dieses Vorgehen bildet die Grundlage sowohl für die symmetrische als auch für die asymmetrische Problemformulierung in den folgenden Abschnitten.

Basis für die Erstellung der Verknüpfungsmatrix sollen die gefahrenen Zugkilometer ZK sein. Sie sind hier definiert als das Produkt der Anzahl n an Zügen bzw. Loks des Verkehrs und der Streckenlänge des Abschnitts l :

$$ZK = n * l. \quad (13)$$

ZK: gefahrene Zugkilometer
 n : Anzahl an Zügen bzw. Loks eines Verkehrs
 l : Streckenlänge des Abschnitts

Auch Achilles verwendet in [Achilles 2008] und [Achilles 2009] ein Konzept der Fahrweite. Im Unterschied zum hier vorgestellten Ansatz wird dabei allerdings nicht auf den tatsächlichen Streckenverlauf und den darüber fließenden Verkehr eingegangen, da keine konkrete Strategie zur optimalen Migration ermittelt werden soll. Stattdessen wird zur Simulation des Lebenszyklus auf die Summe der Streckenkilometer einer Kategorie und der Summe der dazu passenden Fahrzeuge verwendet. Eine Abbildung des tatsächlich vorliegenden Verkehrsflusses muss dabei nicht stattfinden.

Basis für die Berechnung der Fahrweite ist folgende Matrix $\underline{\underline{C}}$, die sich aus der Anzahl der Fahrzeuge für jeden Verkehr \underline{N} aus Gleichung (3), der Verknüpfungsmatrix \underline{X} zwischen den Verkehr und Streckenabschnitten aus Gleichung (4) und den Längen der Streckenabschnitte \underline{L} (5) ergibt:

$$\underline{\underline{C}} = \underline{N} \times \underline{X} \times \underline{L}^T = \begin{pmatrix} n_1 x_{11} l_1 & \cdots & n_1 x_{i1} l_i & \cdots & n_1 x_{s1} l_s \\ \vdots & \ddots & & & \\ n_k x_{1k} l_1 & & n_{ik} x_{ik} l_i & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ n_o x_{1o} l_1 & & & & n_o x_{so} l_s \end{pmatrix} \quad (14)$$

In den folgenden beiden Abschnitten werden zwei Alternativen zur Darstellung der verkehrlichen Verknüpfung der Abschnitte und damit zur Berechnung der Kantengewichte vorgestellt. Der symmetrischen Verknüpfungsmatrix in Abschnitt 4.2.1.2 liegt dabei ein ungerichteter Graph zugrunde, während die asymmetrische Verknüpfungsmatrix in Abschnitt 4.2.1.3 auf einem gerichteten Graphen basiert.

4.2.1.2 Symmetrische Verknüpfungsmatrix

Auf Basis der im vorangegangenen Abschnitt formulierten Grundlagen des statischen Ansatzes wird im Folgenden als erstes die symmetrische Problemformulierung dargestellt. Dabei haben zwei Abschnitte wechselseitig immer denselben Einfluss aufeinander. Dieser wird im Weiteren die asymmetrische Formulierung gegenübergestellt um Rückschlüsse auf die Eignung unterschiedlicher Vorgehensweisen und Formulierungen geben zu können.

Im symmetrischen Fall wird durch die Verknüpfung zwischen Abschnitt i und Abschnitt j beschrieben mit der Wichtung ws_{ij} , wie groß die gemeinsamen Zugkilometer der Abschnitte ZK_{ij} im Verhältnis zu den Gesamtzugkilometern ZK_i und ZK_j beider Abschnitte ist:

$$ws_{ij} = \frac{ZK_{ij}}{ZK_i + ZK_j}. \quad (15)$$

ws_{ij} : Symmetrischer Verknüpfungsgrad als Wichtung zwischen den Abschnitten i und j
 ZK_{ij} : Zugkilometer zwischen Abschnitt i und j
 ZK_i : Zugkilometer insgesamt auf Abschnitt i
 ZK_j : Zugkilometer insgesamt auf Abschnitt j

Dabei gilt mit l_i und l_j analog zu (4), x_{ik} und x_{jk} analog zu (3), sowie n_k analog zu (5):

$$ZK_{ij} = N_{ij}(l_i + l_j), \quad ZK_i = N_i l_i, \quad ZK_j = N_j l_j \quad (16)$$

$$N_{ij} = \sum_k x_{ik} x_{jk} n_k, \quad N_i = \sum_k x_{ik} n_k, \quad N_j = \sum_k x_{jk} n_k$$

$$\Rightarrow ws_{ij} = \frac{N_{ij}(l_i + l_j)}{N_i l_i + N_j l_j}. \quad (17)$$

Die entstehende Matrix $\underline{\underline{ES}}$ ist symmetrisch, der darauf basierende Graph dementsprechend ungerichtet.

$$\underline{\underline{ES}} = \begin{pmatrix} ws_{11} & \cdots & ws_{i1} & \cdots & ws_{s1} \\ \vdots & \ddots & & & \\ ws_{1j} & & ws_{ij} & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ ws_{1s} & & & & ws_{ss} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Das Verhalten dieser Definition von w_{ij} wird im Folgenden verdeutlicht. Für den Fall, dass zwischen den Abschnitten i und j keine verkehrliche Verknüpfung besteht, gilt:

$$N_{ij} = 0 \Rightarrow ws_{ij} = 0. \quad (19)$$

Fließt hingegen über beide Abschnitte derselbe Verkehr, ergibt sich:

$$N_{ij} = N_i = N_j \Rightarrow ws_{ij} = 1. \quad (20)$$

Für den Fall, dass der gemeinsame Anteil des Verkehrs auf einem oder beiden Abschnitten i und j sehr gering ist, ergibt sich:

$$N_i, N_j \gg N_{ij} \Rightarrow ws_{ij} \rightarrow 0. \quad (21)$$

In allen Fällen gelten folgende Randbedingungen:

$$N_{ij} \leq N_i \text{ und } N_{ij} \leq N_j. \quad (22)$$

Der Umfang der Optimierung dieser Problemformulierung ergibt sich zu (vgl. [Lackhove et al. 2010], (7)):

$$N_{order} = \frac{s!}{2}. \quad (23)$$

4.2.1.3 Asymmetrische Verknüpfungsmatrix

Die im vorangegangenen Textabschnitt gezeigte symmetrische Verknüpfungsmatrix basiert auf der Annahme, dass der wechselseitige Einfluss zwischen Streckenabschnitten sich immer gleich ist. Durch eine Formulierung als asymmetrische Matrix kann eine detailliertere Betrachtung erfolgen. Der Einfluss zwischen zwei Abschnitten wird dabei je nach Betrachtungsrichtung unterschieden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird geprüft, ob diese stärkere Detaillierung im Vergleich zum symmetrischen Ansatz ein besseres Optimierungsergebnis liefern kann.

Die asymmetrische Formulierung des verkehrlichen Verknüpfungsgrades für den Einfluss von Abschnitt i auf Abschnitt j mit dem Wichtungsfaktor wa_{ij} , bzw. wa_{ji} für den Einfluss des Abschnitts j auf den Abschnitt i geschieht wie folgt:

$$wa_{ij} = \frac{ZK_{ij}}{ZK_j}, \quad wa_{ji} = \frac{ZK_{ij}}{ZK_i}. \quad (24)$$

Dabei gilt mit l_i und l_j analog zu (4), x_{ik} und x_{jk} analog zu (3), sowie n_k analog zu (5):

$$\begin{aligned} ZK_{ij} &= N_{ij}(l_i + l_j), \quad ZK_i = N_i l_i, \quad ZK_j = N_j l_j \\ N_{ij} &= \sum_k x_{ik} x_{jk} n_k, \quad N_i = \sum_k x_{ik} n_k, \quad N_j = \sum_k x_{jk} n_k \end{aligned} \quad (25)$$

$$\Rightarrow wa_{ij} = \frac{N_{ij}(l_i + l_j)}{N_j l_j}, \quad wa_{ji} = \frac{N_{ij}(l_i + l_j)}{N_i l_i}. \quad (26)$$

Die entstehende Matrix $\underline{\underline{Ea}}$ ist asymmetrisch, der darauf basierende Graph dementsprechend gerichtet.

$$\underline{\underline{Ea}} = \begin{pmatrix} wa_{11} & \cdots & wa_{i1} & \cdots & wa_{s1} \\ \vdots & \ddots & & & \\ wa_{1j} & & wa_{ij} & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ wa_{1s} & & & & wa_{ss} \end{pmatrix} \quad (27)$$

Für den Fall, dass zwischen den Abschnitten i und j keine Verknüpfung besteht, ergibt sich analog zu (19):

$$N_{ij} = 0 \Rightarrow wa_{ij} = wa_{ji} = 0. \quad (28)$$

Im anderen Extrem, wenn über beide Abschnitte ausschließlich derselbe Verkehr fließt, ergibt sich:

$$N_{ij} = N_i = N_j \Rightarrow wa_{ij} = \frac{l_i + l_j}{l_j} > 1, \quad wa_{ji} = \frac{l_i + l_j}{l_i} > 1. \quad (29)$$

Die Bedingung (22) bleibt bei der asymmetrischen wie bei der symmetrischen Problemformulierung unverändert bestehen.

Die wechselseitige Einflussnahme wird deutlich, wenn auf einem der Abschnitte i und j der gemeinsame Verkehr nur einen geringen Anteil am Gesamtverkehr des Abschnittes hat. Im Gegensatz zu (21) bleibt der Einfluss weiter einseitig bestehen:

$$\begin{aligned} ZK_j \gg ZK_{ij} &\Rightarrow wa_{ij} \rightarrow 0, \quad wa_{ji} = \frac{ZK_{ij}}{ZK_i} \\ ZK_i \gg ZK_{ij} &\Rightarrow wa_{ji} \rightarrow 0, \quad wa_{ij} = \frac{ZK_{ij}}{ZK_j} \end{aligned} \quad (30)$$

Der Umfang dieser Problemformulierung ergibt sich zu (vgl. [Lackhove et al. 2010], (7)):

$$N_{order} = \frac{s!}{2}. \quad (31)$$

Damit ist (31) bzw. (24) sowohl für die symmetrische als auch für die asymmetrische Formulierung gültig. Jeder Knoten muss nur einmal erreicht werden, das Verlassen des Knotens wird anders als bspw. beim Traveling-Salesman-Problem nicht betrachtet. Die jeweils nächste dem Baum hinzuzufügende Kante ist vom gesamten zu diesem Zeitpunkt bestehenden Baum abhängig und nicht allein vom zuletzt erreichten Knoten.

4.2.1.4 Minimal spannender Baum als Basis für einen Algorithmus

In den vorangegangenen Abschnitten wurde der statische Optimierungsansatz in zwei Ausprägungen, als symmetrische und als asymmetrische Problemformulierung, vorgestellt. Darauf aufbauend wird jetzt ein minimal spannender Baum mit maximalem Kantengewicht als Algorithmus zur Optimierung vorgeschlagen. So wird es möglich im Rahmen eines Fallbeispiels die Qualität der Ansätze zu vergleichen und Empfehlungen für die Anwendung zu geben.

Um den minimal spannenden Baum zu erhalten werden nach dem Algorithmus von Kruskal die Kanten aufsteigend nach ihrem Gewicht sortiert, siehe Abbildung 35. Dem Baum wird schrittweise die Kante mit dem maximalen Kantengewicht hinzugefügt, die keinen Kreis erzeugt. Dies wird durchgeführt, bis keine Kante mehr hinzugefügt werden kann, ohne dass ein

Kreis entsteht und damit alle Knoten berührt sind. Das Ergebnis ist ein globales Optimum. (Vgl. [Korte und Vygen 2008], [Krumke und Noltemeier 2009])

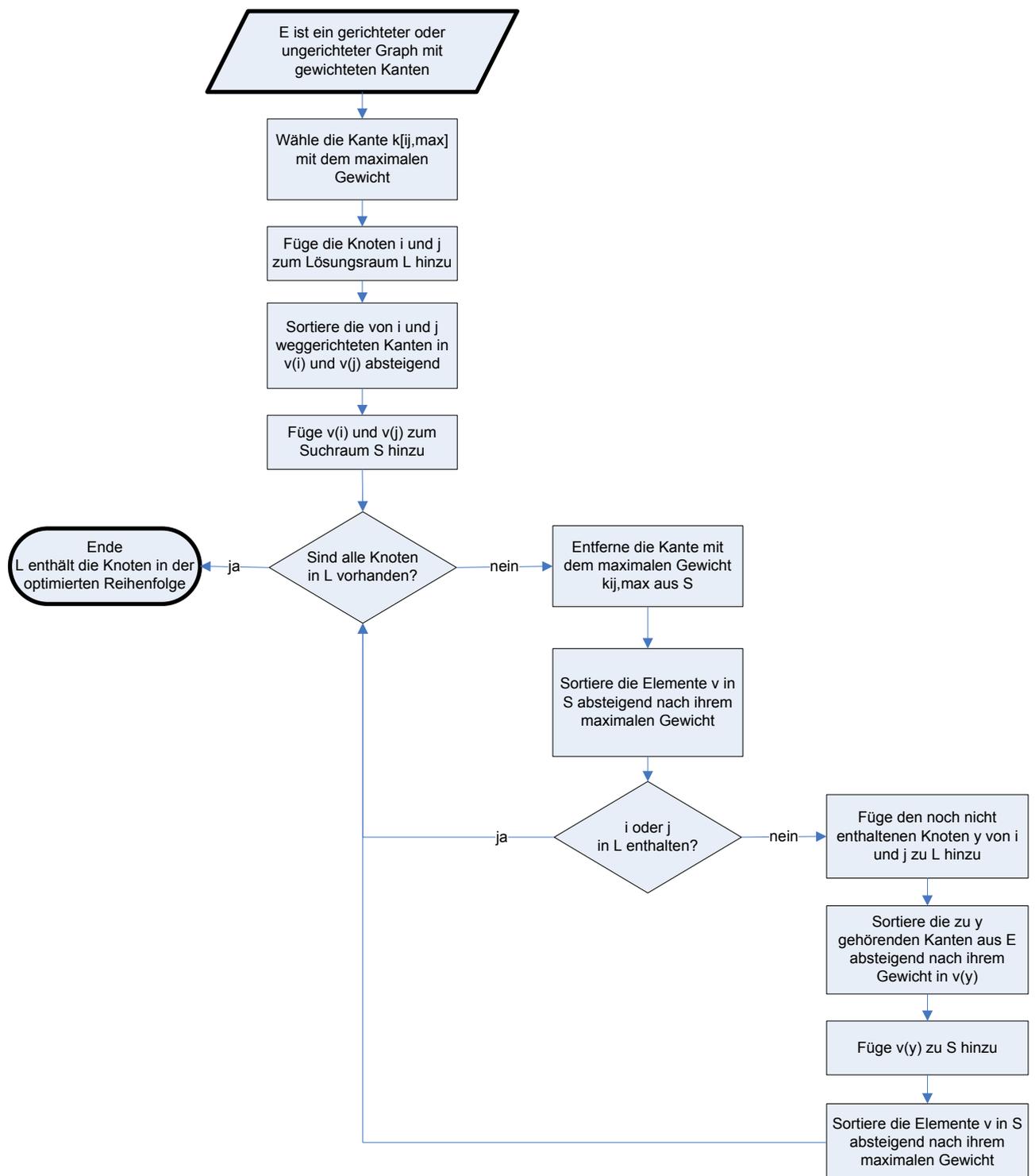


Abbildung 35: Ablaufdiagramm statische Optimierung

Auf ein großes Schienenverkehrsnetz gesehen hätte dieses Vorgehen jedoch kein zusammenhängendes Wachsen des mit ETCS befahrbaren Netzes zur Folge. Stattdessen bilden sich verteilte ETCS-Inseln, die sich erst im Laufe der Migration verbinden. Unter dem Gesichtspunkt der Maximierung der Wachstumsgeschwindigkeit des Netzes des neuen Systems soll stattdessen die Umrüstreihenfolge der Abschnitte gewählt werden, die in jedem Schritt das maximale

Wachstum der zusammenhängenden Fahrweite darstellt. Dazu wird der Optimierungsalgorithmus der Suche nach minimal spannenden Bäumen mit maximalem Kantengewicht modifiziert.

Für die als nächstes hinzuzufügende Kante darf entsprechend dieser Vorgabe nicht der gesamte Graph durchsucht werden. Stattdessen muss es sich um die Kante mit dem maximalen Gewicht handeln, bei der bereits genau ein Knoten Teil des bestehenden Baums ist. Der Verknüpfungsgrad zwischen zwei Abschnitten i und j wird durch den Wichtungsfaktor W_{ij} beschrieben. In einem ungerichteten oder gerichteten Graphen E stellt W_{ij} das Kantengewicht der Kante zwischen den Knoten i und j dar. Die Wahl einer Kante K_{ij} mit der Wichtung W_{ij} bedeutet, dass der zuvor noch nicht zum Baum gehörende Knoten, also der Abschnitt i oder j , umgerüstet wird. Es ergibt sich folgendes Ablaufdiagramm:

Der Umfang dieses Algorithmus F ist allein abhängig von der Anzahl der betrachteten Abschnitte s . Ausgedrückt als Komplexitätsfunktion mit Landau-Symbolen ergibt sich, dass F nicht wesentlich schneller wächst als s :

$$F \in O(s). \tag{32}$$

		Verkehrsmatrix										
Bereich		P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab		
Streckennummer		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Streckenlänge		20	50	40	60	75	50	25	40	100		
Verkehr											Anzahl Loks	Zugkilometer
SGV 1							1	1		1	20	3500
SGV 2						1	1	1		1	20	5000
SGV 3			1	1	1	1	1	1		1	40	16000
SGV 4										1	40	4000
SGV 5							1	1		1	40	7000
SGV 6								1		1	50	6250
SGV 7								1		1	20	2500
SGV 8			1	1	1	1	1	1		1	40	16000
SGV 9								1	1	1	20	3500
SGV 10					1	1	1	1		1	70	21700
SGV 11										1	20	2000
SGV 12			1	1	1	1	1	1		1	20	8000
SGV 13			1	1	1	1	1	1		1	300	120000
HGV 1		1		1	1	1	1	1	1		40	12400
HGV 2		1		1	1	1	1	1	1		70	21700
HGV 3				1	1	1	1	1		1	50	2000
HGV 4										1	60	2400
SPNV 1		1		1	1	1	1	1	1		40	12400
SPNV 2		1		1	1						20	2400
SPNV 3								1	1		15	975
SPNV 4									1		20	800
SPNV 5									1		40	1600
Zugkilometer		3400	20000	22800	38400	48000	36000	20125	13400	70000		

Abbildung 36: Beispiel einer Verkehrsmatrix

Ein kleines Beispiel soll das Vorgehen beim vorgestellten Algorithmus verdeutlichen und auch die Unterschiede zwischen dem symmetrischen und dem asymmetrischen Optimierungsansätzen herausstellen. Die Grundlage dafür stellt die modellierte Strecke in Abbildung 36 dar.

Bei den über die Strecke fahrenden Verkehren handelt es sich um Güterverkehre (SGV), Hochgeschwindigkeitsverkehre (HGV) und Schienenpersonennahverkehre (SPNV). In der Matrix sind die Felder mit 1 belegt, bei denen die entsprechenden Verkehre dem jeweiligen Abschnitt zugeordnet sind. Als weitere relevante Informationen sind die Streckenlängen der Abschnitte, die Anzahl der Fahrzeuge der jeweiligen Verkehre sowie die Zugkilometer jedes Verkehrs und jedes Abschnitts angegeben. Abbildung 37 stellt als Zwischenergebnis die Anzahl der Fahrzeuge dar, die von den Abschnitten paarweise geteilt werden.

Bereich	P-Bhf aa					G-Bhf aa			
	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab		
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	170	0	170	170	150	150	150	150	0
2	0	400	400	400	400	400	400	0	400
3	170	400	570	570	550	550	550	150	400
4	170	400	570	640	620	620	620	150	470
5	150	400	550	620	640	640	640	150	490
6	150	400	550	620	640	720	720	150	570
7	150	400	550	620	640	720	805	165	640
8	150	0	150	150	150	150	165	335	0
9	0	400	400	470	490	570	640	0	700

Abbildung 37: Anzahl der Fahrzeuge, die zwischen Abschnitten geteilt werden

Abbildung 38 stellt die Streckenkilometer dar, die sich als Summe zweier verknüpfter Abschnitte ergeben.

Bereich	P-Bhf aa					G-Bhf aa			
	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab		
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	40	70	60	80	95	70	45	60	120
2	70	100	90	110	125	100	75	90	150
3	60	90	80	100	115	90	65	80	140
4	80	110	100	120	135	110	85	100	160
5	95	125	115	135	150	125	100	115	175
6	70	100	90	110	125	100	75	90	150
7	45	75	65	85	100	75	50	65	125
8	60	90	80	100	115	90	65	80	140
9	120	150	140	160	175	150	125	140	200

Abbildung 38: Streckenkilometer verknüpfter Abschnitte

Zur Berechnung der symmetrischen Verknüpfungsmatrix wird nun noch die Summe der Zugkilometer zweier Streckenabschnitte benötigt. Sie sind in Abbildung 39 dargestellt.

Die so zu berechnende symmetrische Verknüpfungsmatrix zeigt Abbildung 40. Die Abschnitte, die die größte Verknüpfung aufweisen sind markiert. Sie bilden den Ausgangspunkt für die Optimierung und werden als erstes umgerüstet. Das weitere Vorgehen wird anhand von Abbildung 41 und Abbildung 42 verdeutlicht. Ausgehend von den bereits umgerüsteten Ab-

schnitten, werden die Abschnitte dargestellt, die noch nicht umgerüstet sind. Der Abschnitt, zu dem die größte Verknüpfung besteht wird markiert und als nächstes gewählt.

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	6.800	23.400	26.200	41.800	51.400	39.400	23.525	16.800	73.400
2	23.400	40.000	42.800	58.400	68.000	56.000	40.125	33.400	90.000
3	26.200	42.800	45.600	61.200	70.800	58.800	42.925	36.200	92.800
4	41.800	58.400	61.200	76.800	86.400	74.400	58.525	51.800	108.400
5	51.400	68.000	70.800	86.400	96.000	84.000	68.125	61.400	118.000
6	39.400	56.000	58.800	74.400	84.000	72.000	56.125	49.400	106.000
7	23.525	40.125	42.925	58.525	68.125	56.125	40.250	33.525	90.125
8	16.800	33.400	36.200	51.800	61.400	49.400	33.525	26.800	83.400
9	73.400	90.000	92.800	108.400	118.000	106.000	90.125	83.400	140.000

Abbildung 39: Paarweise Summe der Zugkilometer pro Abschnitt

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		0	0,39	0,33	0,28	0,27	0,29	0,54	0,00
2	0		0,84	0,75	0,74	0,71	0,75	0,00	0,67
3	0,39	0,84		0,93	0,89	0,84	0,83	0,33	0,60
4	0,33	0,75	0,93		0,97	0,92	0,90	0,29	0,69
5	0,28	0,74	0,89	0,97		0,95	0,94	0,28	0,73
6	0,27	0,71	0,84	0,92	0,95		0,96	0,27	0,81
7	0,29	0,75	0,83	0,90	0,94	0,96		0,32	0,89
8	0,54	0,00	0,33	0,29	0,28	0,27	0,32		0,00
9	0	0,67	0,60	0,69	0,73	0,81	0,89	0,00	

Abbildung 40: Symmetrische Verknüpfungsmatrix, Markierung der maximalen Verknüpfung

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab	
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Rangfolge
1				0,33	0,28					
2				0,75	0,74					
3				0,93	0,89					
4	-0,33	-0,75	-0,93			-0,92	-0,90	-0,29	-0,69	1
5	-0,28	-0,74	-0,89			-0,95	-0,94	-0,28	-0,73	2
6				0,92	0,95					3
7				0,90	0,94					
8				0,29	0,28					
9				0,69	0,73					

Abbildung 41: Durchführung des symmetrischen Ansatzes, Schritt 3

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab	Rangfolge
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1								-0,54		8
2										7
3								-0,33		5
4								-0,29		1
5								-0,28		2
6								-0,27		3
7								-0,32		4
8	0,54		0,33	0,29	0,28	0,27	0,32			9
9										6

Abbildung 42: Durchführung des symmetrischen Ansatzes, Schritt 9 (letzter)

Das Vorgehen für den asymmetrischen Ansatz ist ähnlich. Zunächst wird auf Basis von Abbildung 37 und Abbildung 38 sowie der Zugkilometer des jeweiligen Abschnitts aus Abbildung 36 die asymmetrische Verknüpfungsmatrix gebildet. Sie ist in Abbildung 43 zu sehen. Dort ist wiederum der Abschnitt markiert, auf den ein anderer den größten Einfluss hat. Dies ist der Ausgangspunkt für die folgende Optimierung.

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	0	3,00	4,00	4,19	3,09	1,99	2,65	0,00
2	0	2	1,80	2,20	2,50	2,00	1,50	0,00	3,00
3	0,45	1,58	2,00	2,50	2,77	2,17	1,57	0,53	2,46
4	0,35	1,15	1,48	2,00	2,18	1,78	1,37	0,39	1,96
5	0,30	1,04	1,32	1,74	2,00	1,67	1,33	0,36	1,79
6	0,29	1,11	1,38	1,89	2,22	2,00	1,50	0,38	2,38
7	0,34	1,49	1,78	2,62	3,18	2,68	2,00	0,53	3,98
8	0,67	0,00	0,90	1,12	1,29	1,01	0,80	2,00	0,00
9	0	0,86	0,80	1,07	1,23	1,22	1,14	0,00	2,00

Abbildung 43: Asymmetrische Verknüpfungsmatrix, Markierung der maximalen Verknüpfung

Nachdem der erste Abschnitt zur Umrüstung ausgewählt wurde, wird im nächsten Schritt jeweils der Abschnitt gewählt, der zu den bereits umgerüsteten Abschnitten die größte Verknüpfung besitzt. Abbildung 44 zeigt hierbei einen Zwischenschritt, wieder ist der zu wählende Abschnitt grün markiert. Die Wahl des letzten Abschnitts wird in Abbildung 45 gezeigt. Es zeigt sich, dass wie erwartet der symmetrische und der asymmetrische Ansatz zu unterschiedlichen Ergebnissen für die Umrüstrangfolge kommen.

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1			3,00	4,00		3,09	1,99	2,65	
2					-2,50				
3	-0,45				-2,77				
4	-0,35				-2,18				
5		1,04	1,32	1,74		1,67	1,33	0,36	1,79
6	-0,29				-2,22				
7	-0,34				-3,18				
8	-0,67				-1,29				
9					-1,23				
Rangfolge	1			3	2				

Abbildung 44: Durchführung des asymmetrischen Ansatzes, Schritt 3

Bereich	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab
Streckennummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1									
2			-1,80	-2,20	-2,50	-2,00	-1,50		-3,00
3		1,58							
4		1,15							
5		1,04							
6		1,11							
7		1,49							
8									
9		0,86							
Rangfolge	1	9	5	3	2	4	8	6	7

Abbildung 45: Durchführung des asymmetrischen Ansatzes, Schritt 9 (letzter)

4.2.1.5 Diskussion des statischen Ansatzes

Nachdem bis hier hin der statische Optimierungsansatz entwickelt wurde, findet jetzt eine kritische Beurteilung der Eigenschaften statt. Die Ergebnisse werden für die Entwicklung eines weiteren, dynamischen Ansatzes verwendet.

Aus (21) wird eine Schwachstelle der symmetrischen Problemformulierung sichtbar. Sie tritt auf, wenn bei zwei verknüpften Abschnitten ein sehr unausgeglichenes Verhältnis des jeweils vorhandenen Gesamtverkehrs vorliegt. Wenn bspw. ein Großteil des Verkehrs des Abschnitts mit dem geringeren Aufkommen über den Abschnitt mit dem deutlich erhöhten Aufkommen fließt, tendiert die Verknüpfung beider Abschnitte gegen Null. Dies geschieht, obwohl der einseitige Einfluss des vielbefahrenen Abschnitts auf den weniger befahrenen hoch ist. Insbesondere bei der Betrachtung von Eisenbahnknoten kann dieser Effekt auftreten. Dies führt in der Migrationsstrategie zu einer sehr späten Umrüstung großer Knoten. Dadurch wird die

frühzeitige Entstehung eines zusammenhängenden Netzes verhindert. Die Problematik wird durch die asymmetrische Formulierung beseitigt.

Eine grundsätzliche Kritik an diesem Ansatz bleibt jedoch bestehen. Es wird zwar das Ziel einer wachsenden zusammenhängenden Fahrweite erreicht, jedoch findet keine gezielte Ablösung des Altsystems bzw. der Altsysteme statt. Um die Migrationskosten zu minimieren und möglichst frühzeitig die vollständige Nutzung der Vorteile des neuen Systems zu ermöglichen wird im folgenden Abschnitt 4.2.2 ein dynamischer Ansatz entwickelt. Dieser berücksichtigt die tatsächliche, zusammenhängende Fahrweite.

4.2.2 Dynamischer Ansatz

Der in diesem Abschnitt vorgestellte dynamische Ansatz basiert auf den Erkenntnissen um die Schwächen des statischen Ansatzes. Zunächst werden in Abschnitt 4.2.2.1 die grundlegenden Annahmen erläutert und begründet. Die mathematische Beschreibung erfolgt in Abschnitt 4.2.2.2. Für die Durchführung der Optimierung bieten sich eine Vielzahl von Algorithmen an. In Abschnitt 4.2.2.3 wird ein gieriger Algorithmus vorgeschlagen. Die Vorstellung des dynamischen Ansatzes wird durch eine kritische Betrachtung des vorgestellten Ansatzes in Abschnitt 4.2.2.4 abgeschlossen. Im Rahmen des Fallbeispiels im folgenden Kapitel wird der dynamische mit dem statischen Ansatz verglichen und eine Empfehlung für die Anwendung gegeben.

4.2.2.1 Grundlagen des dynamischen Ansatzes

Es hat sich in den vorangegangenen Ausführungen gezeigt, dass mit einem statischen Optimierungsansatz keine gezielte Ablösung des Altsystems erreicht werden kann. Dazu ist es notwendig, zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Umrüstungszustand für die Entscheidung über den nächsten Schritt mit in Betracht zu ziehen. Der Ansatz muss also dynamisch gewählt werden. Dieser Abschnitt erläutert das Grundkonzept, auf dem dann in den folgenden Abschnitten mathematisch beschrieben und algorithmisch umgesetzt wird.

Dazu wird zunächst der gesamte Verkehrsfluss auf der vorhandenen Infrastruktur abgebildet. Wird ein Abschnitt mit ETCS ausgerüstet, wachsen die auf ETCS gefahrenen Zugkilometer um die umgerüsteten Streckenkilometer für jeden betroffenen Zug, bzw. jede Lok. Ist für einen Verkehr die hinreichende Fahrweite erreicht, werden die zugehörigen Fahrzeuge umgerüstet. Sobald ein Abschnitt nur noch von mit ETCS ausgerüsteten Fahrzeugen befahren wird, kann das Klasse B System außer Betrieb genommen werden.

Sobald ein Abschnitt alleinig mit ETCS ausgerüstet ist, fällt der damit erzielte Nutzen dauerhaft an. Um den durch eine gewählte Strategie realisierten Nutzen auszudrücken, muss also der zu den jeweiligen Migrationsschritten anfallende Nutzen integriert werden. Eine Strategie ist optimal, wenn das Integral der Fahrweite auf alleinig mit ETCS ausgerüsteten Abschnitten maximal ist. Die Optimierung anhand dieses Kriteriums spiegelt Kategorisierung der Eisenbahninfrastruktur als Systemgut wider. Die Komplementarität von Infrastruktur und Fahrzeugen sowie die Nutzengenerierung durch die Größe des Netzes sind berücksichtigt.

Für die Wahl der Umrüstereihenfolge der Abschnitte scheint es also sinnvoll zu sein, die zusammenhängende Fahrweite auf ETCS als Grundlage zu nehmen. Betrachtet werden die ge-

samten Fahrweiten der dem jeweiligen Abschnitt zugeordneten Verkehre im Verhältnis zur Fahrweite der Verkehre auf ETCS.

Die Berechnung der relativen Fahrweite mit ETCS auf jedem Abschnitt erfolgt in jedem Migrationsschritt neu. Damit ist keine statische Struktur der Wichtungsmatrix mehr vorhanden. Im Gegensatz zum statischen Ansatz kann eine Optimierung mittels eines abgewandelten minimal spannenden Baumes mit maximalem Kantengewicht nicht mehr durchgeführt werden. Durch den über sie fließenden Verkehr besteht eine mittelbare Einflussnahme der Abschnitte untereinander. So besteht keine lineare Unabhängigkeit für die Ausrüstung der Streckenabschnitte. Die Anwendung eines gierigen Algorithmus führt also nicht zwangsweise zu einem globalen Optimum. Dennoch bietet dieser einen guten Ausgangspunkt für die Wahl einer Strategie, da die relative Fahrweite jedes Abschnitts mit fortschreitender Migration niemals sinken kann. Im schlechtesten Fall bleibt sie zwischen zwei Schritten unverändert. Dies tritt auf, wenn zwischen Abschnitten kein gemeinsamer Verkehr besteht. Damit liegen keine Rundreise wie beim Traveling-Salesman-Problem und kein klassisches Routenfindungsproblem vor.

Nachdem hier die Grundlagen des dynamischen Ansatzes dargestellt wurden, soll er in den folgenden Abschnitten tiefer gehend ausgearbeitet werden.

4.2.2.2 Bestimmung der dynamischen Optimierungsfunktion

In diesem Abschnitt wird der zuvor skizzierte dynamische Ansatz mathematisch formuliert. Dabei werden die Zustände während der Migration, die relevanten Randbedingungen und die Zielfunktion der Optimierung definiert. Dies ist die Voraussetzung für die algorithmische Umsetzung des dynamischen Ansatzes im darauf folgenden Abschnitt und die Durchführung des Fallbeispiels im folgenden Kapitel.

Basis für die Betrachtung ist wiederum die Matrix der Fahrweite \underline{C} , ebenso wie in Abschnitt 4.2.1.

$$\underline{C} = \underline{N} \times \underline{X} \times \underline{L}^T = \begin{pmatrix} n_{11}x_{11}l_{11} & \cdots & n_{i1}x_{i1}l_{i1} & \cdots & n_{s1}x_{s1}l_{s1} \\ \vdots & \ddots & & & \\ n_{1k}x_{1k}l_{1k} & & n_{ij}x_{ij}l_{ij} & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ n_{1s}x_{1s}l_{1s} & & & & n_{ss}x_{ss}l_{ss} \end{pmatrix} \quad (33)$$

Daraus ist ersichtlich, wie viele Zugkilometer jeder Verkehr j auf jedem Abschnitt i zur Fahrweite beiträgt. Ausgangspunkt für die Optimierung soll jedoch die zusammenhängende Gesamtfahrweite für jeden Abschnitt i GF_i sein. Dies ist die Summe aller Zugkilometer, die die einem Abschnitt i zugeordneten Verkehre zurücklegen. Die Berechnung ergibt sich wie folgt:

$$GF_i = \sum_j x_{ij} n_j \sum_k x_{kj} l_k. \quad (34)$$

Die Optimierung soll unter Berücksichtigung des jeweiligen Umrüstungszustands geschehen. Dazu soll eine Zeitachse verwendet werden, in der ein Zeitschritt immer genau der Dauer der Ausrüstung eines Streckenabschnitts entspricht. Diese Annahme lässt zunächst unberücksichtigt, dass die real durchgeführten Projekte der Streckenausrüstung vollkommen unterschiedliche Zeiten in Anspruch nehmen können. Die Umrüstung $u_i(t)$ einer Strecke i zum Umrüstzeitpunkt t_i stellt sich somit folgendermaßen dar:

$$u_i(t) \in \{0;1\}, u_i(t_i - 1) = 0 \rightarrow u_i(t_i) = 1. \quad (35)$$

Der Umrüstverlauf des gesamten Streckennetzes über die Zeit kann durch den Umrüstungsvektor der Infrastruktur $\underline{U}(t)$ dargestellt werden. Durch die oben angeführte Definition der Zeitachse nimmt der Gesamtausrüstungsstand des Streckennetzes mit jedem Zeitschritt zu:

$$\underline{U}(t) = \begin{pmatrix} u_1(t) \\ \vdots \\ u_i(t) \\ \vdots \\ u_s(t) \end{pmatrix}, \|\underline{U}(t)\| < \|\underline{U}(t+1)\|. \quad (36)$$

Der aktuelle Ausrüstungsstatus des Streckennetzes und damit die Fahrweite auf ETCS kann durch die Matrix $\underline{D}(t)$ ausgedrückt werden.

$$\underline{D}(t) = \underline{C} \times \underline{U}(t)^T = \begin{pmatrix} n_{11}x_{11}l_{11}u_1 & \cdots & n_{i1}x_{i1}l_{i1}u_i & \cdots & n_{s1}x_{s1}l_{s1}u_s \\ \vdots & \ddots & & & \\ n_{1j}x_{1j}l_{1j}u_1 & & n_{ij}x_{ij}l_{ij}u_i & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ n_{1s}x_{1s}l_{1s}u_1 & & & & n_{ss}x_{ss}l_{ss}u_s \end{pmatrix} \quad (37)$$

Für die Bewertung jedes Migrationsschrittes kann jetzt die zusammenhängende Fahrweite auf ETCS für einen Abschnitt i gefunden werden. Sie ist definiert als die Summe der Gesamtfahrweite $GFN_i(t)$ der dem Abschnitt i zugeordneten Verkehre, die insgesamt zu einem Zeitpunkt t auf ETCS zurücklegt werden.

$$GFN_i(t) = \sum_j x_{ij} n_j \sum_k x_{kj} l_k u_k(t) \quad (38)$$

Die Wichtung $wd_i(t)$ eines Abschnitts i zum Zeitpunkt t ergibt sich als Quotient der zusammenhängenden Fahrweite auf ETCS (38) und der zusammenhängenden Gesamtfahrweite (34):

$$wd_i(t) = \frac{GFN_i(t)}{GF_i}. \quad (39)$$

Aus den Definitionen (36) und (38) ergibt sich, dass die Wichtung eines Abschnitts im Verlauf der Migration niemals kleiner werden kann. Im schlechtesten Fall verändert sie sich von t zu

$t+1$ nicht. Dies ist für die Abschnitte der Fall, für die mit dem im letzten Zeitschritt umgerüsteten Abschnitt keine verkehrliche Verknüpfung besteht. Sobald eine solche Verknüpfung jedoch vorhanden ist, steigt die Wichtung des betrachteten Abschnitts.

$$\begin{aligned}
 u_i(t) = 0 &\rightarrow u_i(t+1) = 1 \\
 \Rightarrow wd_l(t) &= wd_l(t+1), \text{ wenn } \sum_j x_{ij}x_{lj} = 0 \\
 \Rightarrow wd_l(t) &> wd_l(t+1), \text{ wenn } \sum_j x_{ij}x_{lj} > 0
 \end{aligned} \tag{40}$$

Die Wichtungen aller Abschnitte zum Zeitpunkt t können durch den Wichtungsvektor $\underline{W}(t)$ ausgedrückt werden:

$$\underline{W}(t) = \begin{pmatrix} wd_1(t) \\ \vdots \\ wd_i(t) \\ \vdots \\ wd_s(t) \end{pmatrix}, \|\underline{W}(t)\| < \|\underline{W}(t+1)\|. \tag{41}$$

Für die Entscheidung eines EVU über die Ausrüstung eines Verkehrs mit ETCS ist die von dem Verkehr befahrene Strecke ausschlaggebend, die bereits mit ETCS ausgerüstet ist. Der benötigte umgerüstete Anteil m_k wird als kritische Masse des Verkehrs k bezeichnet und mit dem zum Zeitpunkt t vorhandenen Anteil $f_k(t)$ verglichen.

$$f_k(t) = \frac{\sum_i x_{ik}l_i u_i(t)}{\sum_i x_{ik}l_i} \leq 1 \tag{42}$$

$$m_k \leq f_k(t) \Rightarrow \text{Umrüstung des Verkehrs } k \text{ zum Zeitpunkt } t$$

Die kritischen Massen m_k aller Verkehre k können durch den Vektor \underline{M} dargestellt werden.

$$\underline{M} = \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_k \\ \vdots \\ m_o \end{pmatrix} \tag{43}$$

Die anteilige Erfüllung der kritischen Masse m_k durch $f_k(t)$ kann für alle Verkehre k zum Zeitpunkt t durch den Vektor $F(t)$ zusammengefasst werden.

$$\underline{\underline{F}}(t) = \begin{pmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_k(t) \\ \vdots \\ f_o(t) \end{pmatrix} \quad (44)$$

An dieser Stelle soll noch nicht festgelegt werden, wie die Ausrüstung technisch umgesetzt werden soll. Eine Entscheidung über Nachrüstung, Neukauf, Doppel- oder Einfachausrüstung wird in Abschnitt 4.3 behandelt. Vielmehr ist relevant, ob es sich bei einem betrachteten Verkehr um einen Vorreiter der ETCS-Migration handelt oder nicht. Nimmt ein Verkehr eine solche Vorreiterrolle ein, ist eine niedrige kritische Masse zu erwarten. Gründe hierfür können bspw. der internationale Einsatz der Fahrzeuge oder eine kurz bevorstehende Ablösung der Fahrzeugreihe sein. Im letzteren Fall ist davon auszugehen, dass bei der Neubeschaffung eine Ausrüstung mit ETCS vorgesehen ist.

Die Umrüstung eines Verkehrs k zum Zeitpunkt t in Abhängigkeit von der kritischen Masse m_k wird durch $v_k(t)$ entsprechend (42) dargestellt:

$$v_k(t) = \begin{cases} 1, & \text{falls } m_k \leq f_k(t) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (45)$$

Der Umrüstungsstand $v_k(t)$ aller Verkehre zum Zeitpunkt t wird durch den Vektor $\underline{V}(t)$ wiedergegeben:

$$\underline{V}(t) = \begin{pmatrix} v_1(t) \\ \vdots \\ v_k(t) \\ \vdots \\ v_o(t) \end{pmatrix} \quad (46)$$

Über die kritische Masse m_k und den Anteil der umgerüsteten Streckenkilometer $f_k(t)$ zum Zeitpunkt t für einen Verkehr k besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Umrüstung der Strecke $\underline{U}(t)$ und der Fahrzeuge $\underline{V}(t)$. Dies ist direkt ersichtlich, setzt man die Definition des Anteils der umgerüsteten Streckenkilometer $f_k(t)$ aus (42) in die Umrüstung des Verkehrs k zum Zeitpunkt t (45) ein:

$$v_k(t) = \begin{cases} 1, & \text{falls } m_k \leq f_k(t) = \frac{\sum_i x_{ik} l_i u_i(t)}{\sum_i x_{ik} l_i} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Ziel der Optimierung ist es, das Altsystem möglichst schnell und effizient abzulösen. Damit dies auf einem Streckenabschnitt i geschehen kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein. Zunächst muss Abschnitt i mit ETCS ausgerüstet sein, es muss also $u_i(t)=1$ gelten. Darüber hinaus muss der gesamte, über i fahrende Verkehr ebenfalls ausgerüstet sein. Für den Rückbau $r_i(t)$ bzw. die Ablösung des Klasse B Systems auf einem Abschnitt i zum Zeitpunkt t gelten damit:

$$r_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \frac{\sum_k x_{ik} n_k v_k(t)}{\sum_k x_{ik} n_k} = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (47)$$

Der Stand der Ablösung des Altsystems auf dem gesamten betrachteten Netz zum Zeitpunkt t kann durch den Vektor $\underline{R}(t)$ ausgedrückt werden:

$$\underline{R}(t) = \begin{pmatrix} r_1(t) \\ \vdots \\ r_i(t) \\ \vdots \\ r_s(t) \end{pmatrix} \quad (48)$$

Es kann dabei der Fall auftreten, dass ein Abschnitt ausschließlich von mit ETCS ausgerüsteten Fahrzeugen befahren wird - $r_i(t)=1$ -, ohne dass dieser bisher mit ETCS ausgestattet wurde - $u_i(t)=0$ -. Eine Ausrüstung des betreffenden Abschnitts i ist sofort, also zum aktuellen Zeitpunkt t , notwendig. Sie soll als sekundär ausgelöste Ausrüstung bezeichnet werden, da sie als Sachzwang einer vorher getätigten folgt. Es gilt zusammengefasst:

$$r_i(t) = 1 \wedge u_i(t) = 0 \rightarrow u_i(t) = 1. \quad (49)$$

Damit kann die rein auf ETCS erbrachte Fahrweite zum Zeitpunkt t , ohne dass auf diesen Strecken noch ein Klasse B System vorhanden ist, durch die Matrix $\underline{Z}(t)$ dargestellt werden.

$$\underline{Z}(t) = C \times R(t)^T = \begin{pmatrix} n_{11} x_{11} l_{11} r_1 & \cdots & n_{i1} x_{i1} l_{i1} r_i & \cdots & n_{s1} x_{s1} l_{s1} r_s \\ \vdots & \ddots & & & \\ n_{1k} x_{1k} l_{1k} r_1 & & n_{ik} x_{ik} l_{ik} r_i & & \\ \vdots & & & \ddots & \\ n_{1o} x_{1o} l_{1o} r_1 & & & & n_{so} x_{so} l_{so} r_s \end{pmatrix} \quad (50)$$

Die gesamte Fahrweite auf alleinig mit ETCS ausgerüsteten Strecken zu Zeitpunkt t $GFR(t)$ ergibt sich zu:

$$GFR(t) = \sum_i \sum_k x_{ik} n_k l_i r_i(t) \quad (51)$$

Wenn das Altsystem vollständig abgelöst werden soll, ist es nach Abschluss der Migration auf allen Abschnitten zurückgebaut. Damit kann der Zielzustand zum Endzeitpunkt t_E wie folgt hinreichend beschrieben werden:

$$r_i(t_E) = 1, \forall i = 1 \dots s. \quad (52)$$

Die Migration ist beendet, wenn für alle Elemente des Umrüstungsvektors der Infrastruktur $\underline{U}(t_E)$ zum Zeitpunkt t_E aus (36) gilt:

$$u_i(t_E) = 1, \forall i = 1 \dots s. \quad (53)$$

Für den Fall, dass der Rückbau des Altsystems vorgesehen ist und das betrachtete Schienennetz geschlossen ist, gilt dabei gleichzeitig (52).

Der in (53) beschriebene Zustand soll so erreicht werden, dass möglichst früh eine möglichst große Fahrweite auf alleinig mit ETCS ausgerüsteten Abschnitten besteht. Dabei gibt die Fahrweite ein besseres Bild über den Migrationsfortschritt, als bspw. die alleinig mit ETCS ausgerüsteten Streckenkilometer. Sie berücksichtigt die komplementären Bestandteile des Schienenverkehrsnetzes, anstatt nur eine Aussage über den Zustand der Infrastruktur zu machen. Damit gilt es die folgende Optimierungsfunktion zu erfüllen:

$$\max_t \sum GFR(t) \quad (54)$$

Der Problemumfang des dynamischen Ansatzes ergibt sich zu:

$$N_{order} = s!. \quad (55)$$

Ein geeigneter Algorithmus bestimmt den Verlauf $\underline{U}(t)$ über $t=t_0 \dots t_E$ aus (36) in der Form, dass (54) erfüllt ist. Damit wird ein Algorithmus gesucht, der eine gültige, gute Lösung liefert. Der folgende Abschnitt stellt dazu einen gierigen Algorithmus vor.

4.2.2.3 Anwendung eines gierigen Algorithmus

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die dynamische Optimierungsfunktion entwickelt. Auf diese soll nun ein gieriger Algorithmus zur optimalen Wahl der Migrationsreihenfolge angewendet werden. Dabei entstehend zwei verschiedene Verfahren, ein 1-stufiges und ein 2-stufiges. So können die Ergebnisse des dynamischen Ansatzes zur Optimierung der Migrationsrangfolge von Streckenabschnitten mit denen der Varianten des statischen Ansatzes im Rahmen eines Fallbeispiels verglichen werden. Damit kann auch eine Empfehlung für die praktische Anwendung gegeben werden.

Dabei ist $u_e(t)$ der Abschnitt e , der zum Zeitpunkt t umgerüstet wird. Als problematisch stellt sich dabei heraus, dass das Kriterium der rein auf ETCS erbrachten Fahrweite in der Regel nicht von Anfang an zur Verfügung steht. Erst im Migrationsverlauf wird sich die Situation

einstellen, dass genügend Fahrzeuge umgerüstet sind um das Altsystem partiell zurückzubauen.

$$\|\underline{R}(t)\| \neq 0 \text{ für } t \geq t_0 \quad (56)$$

Auch wird sich, nachdem der erste Abschnitt alleinig mit ETCS ausgerüstet ist, nicht zwangsläufig mit jedem Migrationsschritt ein Rückbau des Altsystems auf weiteren Abschnitten ergeben. Würde (54) strikt angewendet, müsste nach klassischer Vorgehensweise der nächste Migrationsschritt immer zufällig gewählt werden, wenn gilt:

$$\underline{R}(t-1) = \underline{R}(t) \text{ für } u_e(t) = 1. \quad (57)$$

Da dieser Fall häufig zu erwarten ist, würde dies entweder zu einer sehr großen Anzahl von Wiederholungen der Optimierung oder, bei einmaliger Durchführung der Optimierung, zu einer geringen Belastbarkeit und Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses führen. Die Anwendung eines relativ einfachen, gierigen Algorithmus wäre so nicht zu rechtfertigen. Aus diesem Grund soll hier ein zweites Optimierungskriterium gewählt werden, das (54) untergeordnet ist. Es soll die Erfüllung von (54) unterstützen und immer verfügbar sein, wenn (57) gilt. So entsteht das 2-stufige Verfahren. In Betracht kommen verschiedene Alternativen, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Die erste Alternative stellt ein einfaches Verfahren dar. Es wird der Abschnitt mit der höchsten Wichtung zum Zeitpunkt t gewählt, vgl. (39).

$$\max w d_e(t) \text{ für } u_e(t) = 1 \quad (58)$$

Die Schwäche dieses Ansatzes besteht jedoch darin, dass die Auswirkungen der Umrüstung nur lokal und nicht netzweit betrachtet werden. Um die netzweiten Auswirkungen einer streckenseitigen Ausrüstung zu berücksichtigen, kann für die Entscheidung die Summe aller Wichtungen herangezogen werden.

$$\max \sum_i w d_i(t) \text{ für } u_e(t) = 1 \quad (59)$$

Dieses Kriterium bildet jedoch nicht ab, dass möglichst schnell die Ablösung des Altsystems erreicht werden soll. Abschnitte, die bereits kurz vor der Ablösung des Altsystems stehen, werden in diesem Ansatz nicht bevorzugt ausgewählt. Stattdessen wird eine schnelle Verbreitung ähnlich wie in Abschnitt 4.2.1 forciert. Somit wird die Erfüllung von (54) nicht vollumfänglich unterstützt.

Dies kann jedoch durch eine Gewichtung der einzelnen Faktoren $w d_i(t)$ erreicht werden. Ziel ist, dass Wichtungsfaktoren $w d_i(t)$, die bereits einen Wert nahe eins besitzen, stärker in die Bewertung eingehen. Niedrige Werte von $w d_i(t)$ sollen hingegen weniger stark berücksichtigt werden. Das entspricht einem hyperbolischen Verlauf. Damit wird der Abschnitt für die Umrüstung gewählt, durch den die Voraussetzung für eine Ablösung des Altsystems am schnellsten erreicht wird. Der folgende Ansatz erreicht dies durch die Gewichtung des Wichtungsfaktoren $w d_i(t)$ mit sich selbst, also eine Quadratur von $w d_i(t)$.

$$\max \sum_i w d_i^2(t) = WK \text{ für } u_e(t) = 1 \quad (60)$$

Damit lassen sich die Optimierungskriterien in einen gierigen Algorithmus für das 2-stufige Verfahren als Ablaufdiagramm wie in Abbildung 46 darstellen

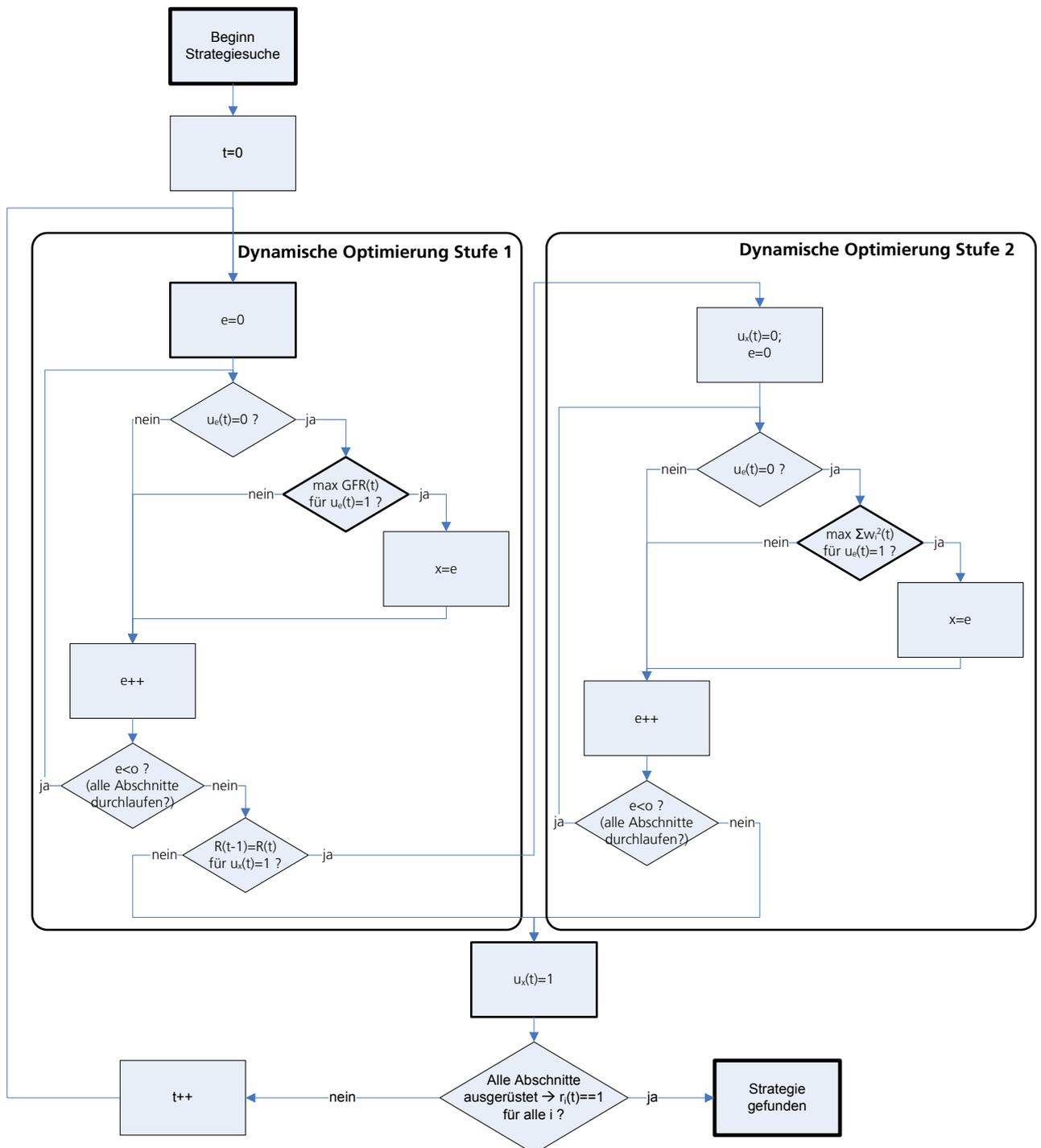


Abbildung 46: Ablaufdiagramm 2-stufige dynamische Optimierung

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, im Rahmen eines 1-stufigen Verfahrens allein nach dem Kriterium (60) zu optimieren. Damit wird indirekt eine Maximierung der zusammenhängenden Fahrweite auf ETCS angestrebt, ohne dass nach Art eines gierigen Algorithmus die zum jeweils aktuellen Optimierungsschritt verfügbare maximale zusammenhängende Fahrweite gewählt wird. So soll ein Problem vermieden werden, dass bei einer Netzstruktur, die eine

inhomogene verkehrliche Verknüpfung aufweist, auftreten kann. Das 2-stufige Verfahren kann in diesem Fall dazu führen, dass ein in sich stark verknüpfter Bereich des Netzes sehr schnell umgerüstet wird. Es besteht die Gefahr, dass der Rest des Netzes dabei unberücksichtigt bleibt, bis die Migration in diesem Teilbereich abgeschlossen ist. Dies kann zu einer für das Gesamtnetz ineffizienten Migrationsstrategie führen. Damit ergibt sich für das 1-stufige Verfahren das in Abbildung 47 dargestellte Ablaufdiagramm.

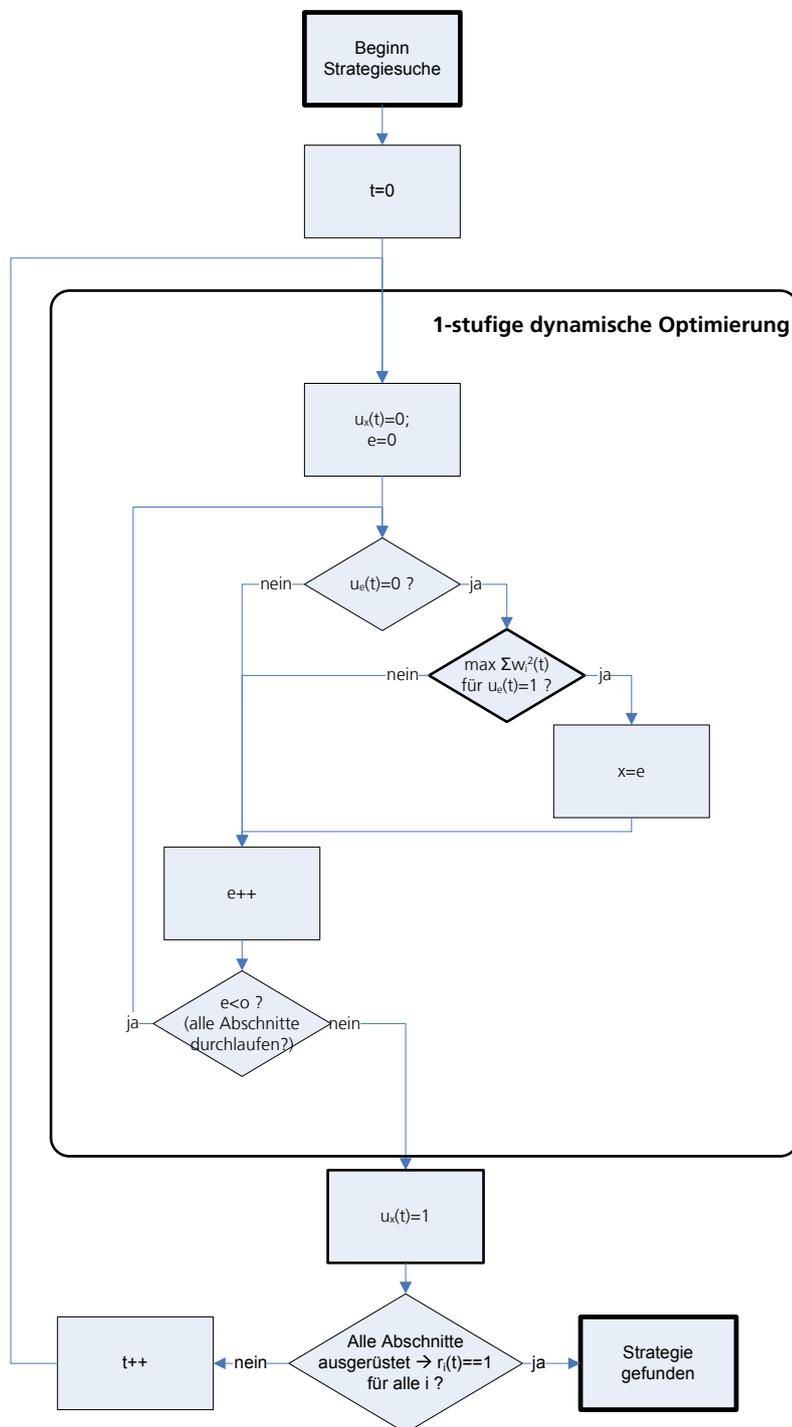


Abbildung 47: Ablaufdiagramm 1-stufige dynamische Optimierung

Der Umfang dieses Algorithmus F ist abhängig von der Anzahl der betrachteten Abschnitte s . Ausgedrückt als Komplexitätsfunktion mit Landau-Symbolen ergibt sich, dass F langsamer wächst als s^2 , jedoch schneller als s (vgl. 32).

$$\begin{aligned}
 F &\in \omega(s), \\
 F &\in O\left(\frac{s(s+1)}{2}\right), \\
 F &\in o(s^2)
 \end{aligned} \tag{61}$$

4.2.2.4 Diskussion des dynamischen Ansatzes

Dieser Abschnitt fasst kurz die Stärken und Schwächen des dynamischen Ansatzes zusammen und gibt einen Ausblick auf die weitere Entwicklung. Die hier getroffenen Rückschlüsse werden im Rahmen des Fallbeispiels überprüft.

Ein Nachteil des statischen Ansatzes aus Abschnitt 4.2.1 ist, dass für die jeweiligen Entscheidungen über den nächsten Migrationsschritt nicht die Auswirkungen im Gesamtnetz und der jeweilige Ausrüstungsstand berücksichtigt werden können. Der dynamische Ansatz nimmt beides in Betracht und kann die Migrationsproblematik besser fassen. Die Fahrzeugseite ist in ausreichender Detailtiefe berücksichtigt. Es ist möglich, unterschiedliche Anreize und Situationen der EVU und der durchgeführten Verkehre über individuelle kritische Massen einzubeziehen. Fahrzeuge werden erst als mit ETCS ausgerüstet angenommen, wenn die individuelle kritische Masse erreicht wurde. Damit wird das Migrationsverhalten der Fahrzeuge in realistischer Weise einbezogen und für die Optimierung der Strategie genutzt. Durch diese Eigenschaften wird eine deutliche Verbesserung gegenüber dem statischen Ansatz erreicht.

Der vorgestellte gierige Algorithmus verspricht aufgrund der Eigenschaften der Problemformulierung gute Ergebnisse zu liefern. Dies ist vor allem darin begründet, dass kein klassisches Travelling-Salesman-Problem, also keine Rundreiseproblematik, vorliegt. Das Vorgehen und die Ergebnisse sind relativ einfach nachvollziehbar. Aufgrund von nichtlinearen Zusammenhängen, insbesondere bei der Fahrzeugausrüstung, und fehlender linearer Unabhängigkeit ist mit einem gierigen Algorithmus allerdings kein globales Optimum zu erwarten.

Abhängig von der Netzstruktur sind beim 2-stufigen und beim 1-stufigen Verfahren unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten. Beim 2-stufigen Verfahren ist davon auszugehen, dass bei einem Netz mit einer weitgehend homogenen verkehrlichen Verknüpfung unter den Streckenabschnitten sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Liegen hingegen inhomogene verkehrliche Verknüpfungen vor, kann der 1-stufige Ansatz bessere Ergebnisse liefern. Dies kann bspw. bei einem Korridor der Fall sein, bei dem zwischen den Abschnitten eines Bereiches eine deutlich stärkere verkehrliche Verknüpfung vorliegt als zu Abschnitten außerhalb dieses Bereiches. Das Auftreten eines solchen Phänomens kann ein Hinweis auf das Vorhandensein von Teilnetzen sein, wie sie im folgenden Abschnitt 4.2.3 behandelt werden.

Durch den Vergleich von (31) und (55) wird deutlich, dass der dynamische Ansatz mit der Anzahl der betrachteten Streckenabschnitte schneller in seiner Komplexität wächst wie der statische Ansatz.

Als Ausblick kann das Ergebnis der Optimierung weitergeführt und als Eröffnungsstrategie für heuristische Optimierungsansätze verwendet werden. So würde eine weitere Verbesserung vor dem Hintergrund möglich, dass durch den gierigen Algorithmus kein globales Optimum

zu erwarten ist. Mögliche Verfahren können Genetische Algorithmen, Simulated Annealing oder Ameisenalgorithmen sein.

4.2.3 Finden von Teilnetzen

Bis hier wurden Algorithmen vorgestellt, die für jeden Migrationsschritt einen umzurüstenden Abschnitt auf Basis der verkehrlichen Verknüpfung wählen. Da die gegenseitige Einflussnahme der Abschnitte unterschiedlich stark ausgeprägt ist, können Teilnetze identifiziert werden. Diese haben einen großen Einfluss auf die Umsetzung der Migrationsstrategie, wie im Folgenden erläutert wird. Insbesondere bei der Anwendung auf große Streckennetze, bspw. das Netz eines oder mehrerer Länder bzw. das europäische Eisenbahnnetz, hat dieser Abschnitt praktische Relevanz.

Ein Teilnetz ist vorhanden, wenn der aktuelle Ausrüstungsstand unverhältnismäßig wenig Einfluss auf eine Gruppe von Abschnitten hat. So lange die Umrüstvorgänge innerhalb eines Teilnetzes stattfinden, gilt für den jeweiligen Wichtungsfaktoren $wd_{Teilnetz}(t)$ des zuletzt umgerüsteten Abschnitts:

$$wd_{Teilnetz}(t) < wd_{Teilnetz}(t+1). \quad (62)$$

Sobald die Ausrüstung eines Teilnetzes mit dem letzten Abschnitt $u_{Teilnetz}(t-1)$ fertig ausgerüstet ist, gilt für den Wichtungsfaktor $wd_{unabhängig}(t)$ des ersten Abschnitts $u_{unabhängig}(t)$ des darauffolgend ausgerüsteten Teilnetzes:

$$wd_{unabhängig}(t-1) \approx wd_{unabhängig}(t) < wd_{Teilnetz}(t). \quad (63)$$

Diese Eigenschaft spiegelt sich auch in (40) wider. Dementsprechend liegt eine vollständige Entkopplung zwischen zwei Teilnetzen vor, wenn gilt:

$$wd_{Teilnetz}(t) = 1, wd_{unabhängig}(t) = 0. \quad (64)$$

Abgesehen von diesem Extremfall scheint es sinnvoll für jede Untersuchung einen Schwellenwert $\Delta_{Teilnetz}$ festzulegen, ab dem ein Teilnetz als identifiziert gilt.

$$\Delta_{Teilnetz} \leq wd_{Teilnetz}(t) - wd_{unabhängig}(t) \quad (65)$$

Für jedes gefundene Teilnetz ist zu prüfen, ob die Migration parallelisiert werden soll bzw. kann. Das gilt insbesondere für gleichberechtigte oder gleichgroße Netze, wenn sie über unabhängige Ressourcen zur Umrüstung verfügen und sie sich somit nicht in direkter Konkurrenz um finanzielle Mittel und Arbeitskräfte befinden. Liegt keine Unabhängigkeit der Ressourcen vor, müssen Prioritäten für die Umrüstung gesetzt werden. Für die gefundenen Teilnetze gelten unter Umständen unterschiedliche Anreize für eine Migration. Sie lassen sich anhand unterschiedlicher kritischer Massen identifizieren. Für die Prioritätensetzung gilt, dass Teilnetze mit EVU, die tendenziell ein niedriges m_j für ihre Verkehre angeben, bevorzugt auszurüsten sind.

Wurden Teilnetze identifiziert, die in der Migration zwar parallelisiert werden können, jedoch nicht vollständig entkoppelt sind, ist die gegenseitige Einflussnahme von Interesse. Für eine

verzahnte Migrationsstrategie sollte der Einfluss des jeweils anderen Teilnetzes in den Migrationsplan integriert werden. Dazu wird für jedes Teilnetz einzeln die optimierte Migrationsreihenfolge gesucht und die dabei entstehenden Änderungen der Wichtungsfaktoren in den anderen Teilnetzen erfasst. Auf diese Weise können entweder Korridore zwischen den Netzen oder externe, aus dem jeweiligen Netz nicht beeinflussbare Randbedingungen identifiziert werden. In Abschnitt 4.4 wird im Detail auf Planungsrandbedingungen eingegangen.

Damit ist der Abschnitt zur Optimierung der Migrationsrangfolge abgeschlossen. Es wurde vorgestellt wie für das umzurüstende Streckennetz ermittelt wird, in welcher Reihenfolge die Streckenabschnitte mit ETCS ausgerüstet werden müssen, um den EVU einen optimalen Anreiz zur fahrzeugseitigen Umrüstung und damit zur Ablösung des Altsystems zu bieten. Diese Erkenntnisse werden im Anschluss verwendet, um die Planung weiter zu detaillieren. Im folgenden Abschnitt 4.3 wird der tatsächliche Projektverlauf und die technische Zielausrüstung betrachtet.

4.3 Optimierung der Migrationspfade und –ziele

Der in Abschnitt 4.1 beschriebene Optimierungsansatz wurde in zwei Phasen durchgeführt. Als erstes wurde dafür in Abschnitt 4.2 eine Optimierung der Reihenfolge der streckenseitig durchzuführenden Ausrüstungsschritte vorgenommen. In diesem Abschnitt werden als zweiten Schritt Migrationspfade und –ziele optimiert. Dabei werden die tatsächlichen Projektablaufe, sowie die unterschiedlichen technischen Ausrüstungen einbezogen. In Abschnitt 4.3.2 wird eine kostenmäßige Optimierung der Migrationspfade für alle möglichen Migrationsziele durchgeführt. Diese können dann in Abschnitt 0 als Szenarien für eine Entscheidung gegenüber gestellt werden. Dabei können neben der Höhe der zu tätigen Investitionen und der Lebenszykluskosten auch Aspekte wie die Leistungsfähigkeit der Strecken und Knoten einbezogen werden. Zunächst wird jedoch in Abschnitt 4.3.1 auf die Reduzierung des Umfangs der zu betrachteten Pfad-Ziel-Kombinationen eingegangen. Damit soll die Betrachtung auf die tatsächlich entscheidungsrelevanten Varianten eingeschränkt werden.

4.3.1 Reduzierung der Pfad-Ziel-Kombinationen

Dieser Abschnitt erläutert, wie Planungsvorgaben und Randbedingungen genutzt werden können, um den Umfang der Untersuchung zu begrenzen (vgl. [Lackhove et al. 2010]). Dadurch wird es möglich, Problemstellungen von realem Umfang zu untersuchen und dabei für die relevanten Fragestellungen aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Ausgangspunkt ist die Betrachtung des Gesamtumfangs der Optimierungsaufgabe. In Abschnitt 4.1.2 wurde dieser in den Gleichungen (6) bzw. (11) folgendermaßen definiert:

$$N_{total} = N_{order} * N_{options} = s! * (g * p)^s \Rightarrow N_{options} = (g * p)^s .$$

- g : Anzahl der möglichen Migrationsziele pro Abschnitt
- p : Anzahl der möglichen Migrationspfade pro Abschnitt
- s : Anzahl der Streckenabschnitte

Im Abschnitt 4.2 wurde auf die Migrationsreihenfolge und damit auf N_{order} eingegangen. Hier wird nun $N_{options}$ behandelt.

Die erste Vorgabe, die einbezogen werden soll, ist die Einschränkung der möglichen Migrationsziele. Darunter soll die technische Ausrüstung der Streckenseite nach Abschluss der Migration verstanden werden. Ohne Vorgaben werden die Möglichkeiten durch die an die Strecke gestellten Anforderungen eingegrenzt. Wäre bspw. auf einem Streckenabschnitt Hochgeschwindigkeitsverkehr vorgesehen und, wie in Deutschland, damit eine kontinuierliche Zugbeeinflussung gefordert, würde ETCS Level 1 nicht mehr als Zielausrüstung betrachtet. Ist hingegen nur konventioneller Verkehr vorgesehen, kommen alle ETCS Level in Frage. Planungsvorgaben für die Zielausrüstung können bspw. eine Festlegung auf ETCS Level 1 LS für konventionelle Strecken oder von ETCS Level 2 auf dem Gesamtnetz bedeuten. Damit gilt für die reduzierte Anzahl an Migrationszielen eines Abschnitts i $g_{i,red}$ in Bezug auf (9):

$$g_{i,red} < g. \quad (66)$$

Ähnlich kann bei den Migrationspfaden vorgegangen werden. Für einen Abschnitt einer Neu- oder Ausbaustrecke kann bspw. kein Klasse B System mehr vorgesehen sein. In diesem Fall wären die Migrationspfade der streckenseitigen und gleichzeitigen Doppelausrüstung ausgeschlossen. Im umgekehrten Fall kann vorgegeben sein, dass neu beschaffte Fahrzeuge allein mit ETCS ausgerüstet werden. Damit wären die fahrzeugseitige und wiederum die gleichzeitige Doppelausrüstung nicht Teil der Betrachtung. Für die zulässigen Migrationspfade $p_{i,red}$ des Abschnitts i gilt in Bezug auf (9):

$$p_{i,red} < p. \quad (67)$$

Unter den Annahmen (66) und (67) gilt mit Einbeziehung von (9) für die Optionen $n_{i,red.options}$ des Abschnitts i :

$$n_{i,red.options} = p_{i,red} * g_{i,red} < p * g = n_{options} \quad (68)$$

Einen maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl der Migrationsstrategien hat die Modellierung der Streckenabschnitte, wie in (8) dargestellt. Dafür wurde in Abschnitt 3.2.4.3 dieser Arbeit festgelegt, dass sich entlang eines Streckenabschnitts der Verkehr nicht ändern darf. Ein Abschnitt reicht also immer von Knoten zu Knoten. Unter Umständen wird dadurch in Bereichen um Knotenpunkte des Schienennetzes eine Vielzahl von Streckenabschnitten generiert, die sehr kurz und einen großen Anteil an gemeinsamem Verkehr haben. Werden solche benachbarten Abschnitte zusammengefasst, wird das tatsächlich durchgeführte Migrationsprojekt an diesen Stellen realistischer abgebildet. Es ist unwahrscheinlich anzunehmen, dass diese Abschnitte losgelöst voneinander behandelt werden. Für die reduzierte Anzahl an Streckenabschnitten s_{red} also:

$$s_{red} < s. \quad (69)$$

Durch die Maßnahmen (68) und (69) kann im Vergleich zu (10) eine Reduzierung der Migrationsoptionen $N_{red.options}$ erreicht werden:

$$N_{red.options} = \prod_i^{s_{red}} g_{i,red} * p_{i,red} \ll (g * p)^s = N_{options} \tag{70}$$

Diese Annahme für $N_{red.options}$ gilt, wenn die wählbaren Migrationspfade eines Abschnitts unabhängig für jedes Migrationsziel sind. Es ist jedoch durchaus annehmbar, dass manche Migrationspfade für bestimmte Migrationsziele ausgeschlossen werden können. Die Migrationspfade p_{ij} wären in dem Fall nicht mehr unabhängig vom jeweiligen Migrationsziel. Für den Gesamtumfang $N_{red.options.abh}$ der Betrachtung ergibt sich in diesem Fall keine multiplikative Zusammenhang wie in (70), sondern ein additiver:

$$N_{red.options.abh} = \prod_i^{s_{red}} \sum_j^{g_{i,red}} p_{ij} \leq N_{red.options} = \prod_i^{s_{red}} g_{i,red} * p_{i,red} \ll (g * p)^s = N_{options} \tag{71}$$

Beschreibung Korridor X		Abschnitt I	Abschnitt II	Abschnitt III**
Verkehre	1 2 3	● ———●	● ———● — SGV —	● ———● — HGV —
Ist-System	PZB für Verkehr 1 und 3	PZB für Verkehr 1 und 3, LZB für Verkehr 2	Ein Klasse B System* für Verkehr 1 und 2	
Mögliche Migrationsziele	PZB für Verkehr 1 und 3, ETCS Level 1/ Limited Supervision/ Level 2 für Verkehr 1	PZB für Verkehr 1 und 3, ETCS Level 2 für Verkehr 1 und 2	Ein Klasse B System* für Verkehr 1 und 2, ETCS Level 2 für Verkehr 1 und 2	
Stellwerke	RSTW kann bei Level 1 und Limited Supervision erhalten bleiben. Bei Level 2 muss mit ESTW ausgestattet werden.	ESTW muss vorhanden sein.	ESTW muss vorhanden sein.	

*Klasse B System entspricht nicht PZB oder LZB. **Streckenabschnitt gehört zu einem anderen Land

Abbildung 48: Randbedingungen der Beispielmigration

In Abbildung 48 und Abbildung 49 soll die Reduktion des Umfangs des Betrachtungsraums anhand des zuvor kurz vorgestellten Beispiels verdeutlicht werden. Zunächst werden in Abbildung 48 die Randbedingungen auf den drei Abschnitten kurz vorgestellt. Insgesamt drei Verkehre – je ein SGV, SPNV und HGV – befahren die Strecke. Zwei der Abschnitte befinden sich im Betrachtungsland, die Ausrüstung des dritten muss als feste Randbedingung angenommen

werden. Dieser Abschnitt befindet sich in einem anderen Land und ist damit in diesem Beispiel nicht beeinflussbar. Zudem wird auch die Auswirkung der Wahl des Migrationsziels auf die weitere Sicherungstechnik in Form der Stellwerke kurz dargestellt.

Strategie-Optionen				
	Abschnitt I	Abschnitt II	Abschnitt III**	Migrationspfade
1	PZB, L1/LS SGV ● ————— ETCS, PZB HGV ● ————— SPNV ● ————— PZB	PZB, L2 ● ————— ETCS Level 2	L2, Klasse B* ● ————— ETCS Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Streckenseitige Doppelausrüstung auf Abschnitten I und II → 1 Option
2	PZB, L1/LS SGV ● ————— ETCS, PZB HGV ● ————— SPNV ● ————— PZB, ETCS	L2 ● ————— ETCS Level 2	L2, Klasse B* ● ————— ETCS Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Auf Abschnitt I streckenseitige, auf Abschnitt II streckenseitige, fahrzeugeitige oder gleichzeitige Doppelausrüstung → 3 Optionen
3	L2, PZB SGV ● ————— ETCS Level 2, PZB HGV ● ————— SPNV ● ————— ETCS Level 2, PZB	L2, PZB ● ————— ETCS Level 2	L2, Klasse B* ● ————— ETCS Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Streckenseitige Doppelausrüstung auf Abschnitten I und II → 1 Option
4	L2, PZB SGV ● ————— ETCS Level 2, PZB HGV ● ————— SPNV ● ————— ETCS Level 2	L2 ● ————— ETCS Level 2	L2, Klasse B* ● ————— ETCS Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Auf Abschnitt I streckenseitige, auf Abschnitt II streckenseitige, fahrzeugeitige oder gleichzeitige Doppelausrüstung → 3 Optionen
5	L2 SGV ● ————— HGV ● ————— ETCS Level 2 SPNV ● ————— ETCS Level 2	L2, PZB ● ————— ETCS Level 2	L2, Klasse B* ● ————— ETCS Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Auf Abschnitt I streckenseitige, fahrzeugeitige oder gleichzeitige, auf Abschnitt II streckenseitige Doppelausrüstung → 3 Optionen
6	L2 SGV ● ————— HGV ● ————— ETCS Level 2 SPNV ● ————— ETCS Level 2	L2 ● ————— ETCS Level 2	L2, Klasse B* ● ————— ETCS Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Streckenseitige, fahrzeugeitige oder gleichzeitige Doppelausrüstung auf Abschnitten I und II → 9 Optionen

Anzahl Abschnitte $s = 3$
 Anzahl möglicher Umrüstreihenfolgen $N_{\text{order}} = s! = 6$
 Anzahl möglicher strategischer Optionen
 $N_{\text{options}} = 1 + 3 + 1 + 3 + 3 + 9 = 20$
Insgesamt ergeben sich $N_{\text{total}} = N_{\text{order}} * N_{\text{options}} = 120$ Optionen
 Verkehr 1: SGV, Verkehr 2: HGV, Verkehr 3: SPNV
 *Klasse B System entspricht nicht PZB oder LZB. **Streckenabschnitt gehört zu einem anderen Land, keine Beeinflussbarkeit

Abbildung 49: Strategische Optionen der Beispielmigration

Daraus werden in Abbildung 49 alle sich ergebenden Optionen entwickelt. Bei der Aufstellung der Randbedingungen und der abgeleiteten Anzahl an Optionen wurden zwei Annahmen getroffen. Bleibt auf einem Streckenabschnitt das Klasse B System vorhanden, gibt es für die Verkehre zunächst keinen Anreiz, die Migration weiter zu beschleunigen. In diesem Fall wird nur von einer streckenseitigen Doppelausrüstung ausgegangen. Wird das Klasse B System jedoch zurückgebaut, sind alle drei Migrationspfade denkbar. Es ist auffällig, dass sich nur noch 120 Optionen ergeben, also deutlich weniger als die 10.368 Optionen, die sich noch in Abbildung 34 ergaben.

Damit sind eine deutliche Reduktion des Untersuchungsumfangs und eine realistischere Annahme über die Migrationsoptionen umgesetzt. Die im folgenden Abschnitt erläuterte Optimierung der Migrationspfade kann auf dieser Basis umgesetzt werden.

4.3.2 Optimierung der Migrationspfade

Für die Migration wurde die Optimierung der Umrüstreihenfolge der Streckenabschnitte vorgenommen. Um die Möglichkeit zu haben, für jedes Migrationsziel den optimalen Migrationspfad zu wählen, ist es notwendig den tatsächlichen Migrationsverlauf zu simulieren. Dies geht im Detaillierungsgrad über die Betrachtungen im Rahmen der Optimierung der Migrationsreihenfolge hinaus. Vielmehr werden alle zulässigen Strategien, wie im Rahmen der Modellbildung in Kapitel 3 gezeigt, beschrieben und unter der Vorgabe einer optimierten Migrationsreihenfolge generiert. Damit kann eine Optimierung der Migrationspfade für gegebene Migrationsziele geschehen.

Für die einzelnen Migrationsschritte werden die ermittelten Umrüstkapazitäten angewendet, die bei der in Kapitel 3 detailliert durchgeführten Modellbildung des technischen und organisatorischen Umfelds gefunden wurden. Dabei dient die in Abschnitt 4.2 festgelegte Migrationsreihenfolge der Zuweisung von Prioritäten für den Ressourcenverbrauch. Um einen realistischen Zeitverlauf der Migration zu erhalten sollten zusätzlich Projektvorlaufzeiten berücksichtigt werden. Die Daten über die umzurüstenden bzw. zu installierenden Mengen an Elementen werden ebenfalls aus der Modellierung übernommen. Somit können die Annahmen zum Mengengerüst ebenfalls als realistisch eingestuft werden.

Das so beschriebene zeitlich veränderliche Mengengerüst stellt das Objektsystem der Modellierung dar. Zu jedem Zeitpunkt ist für jede mögliche Strategie bekannt, welche Komponenten installiert sind. Für eine betriebswirtschaftliche Bewertung wird dieses Mengengerüst nun mit Kostensätzen für Anschaffung, Betrieb und Instandhaltung versehen. Damit sind alle Informationen vorhanden, um eine Lebenszykluskostenrechnung nach Abschnitt 2.5.1 und eine Investitionsrechnung nach Abschnitt 2.5.2 durchführen zu können. Das dem Objektsystem zugehörige Wertsystem ist also formuliert. Auf dieser Basis können die Migrationsstrategien monetär bewertet werden. Abbildung 50 zeigt den Ablauf der Erstellung der monetären Bewertung von Migrationsstrategien.

An der Migration von ETCS ist eine Vielzahl von Parteien beteiligt, wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Die jeweiligen Ziele müssen jedoch nicht korrelieren. Im Gegenteil, mit der Wahl der fahrzeugseitigen oder streckenseitigen Doppelausrüstung als Migrationspfad werden die Migrationskosten ungleich verteilt. Die doppelt ausgerüstete Seite muss den größten

Teil der Migrationskosten zahlen. Wird eine Strategie für eine Seite optimiert, kann die Strategie der anderen Seite immer nur so gut werden, wie es das Optimum der anderen Seite zulässt. Anders stellt sich die Situation dar, wenn nach einem übergreifenden, volkswirtschaftlichen Optimum gesucht wird. Hierbei ist die kumulierte Summe der fahrzeugseitig und streckenseitig mobilisierten Mittel minimal. Diese Strategie muss wiederum nicht zwangsweise mit einem Optimum einer der beteiligten Parteien zusammenfallen. Es spannt sich also ein Verhandlungsspielraum zwischen den individuellen Optima auf.

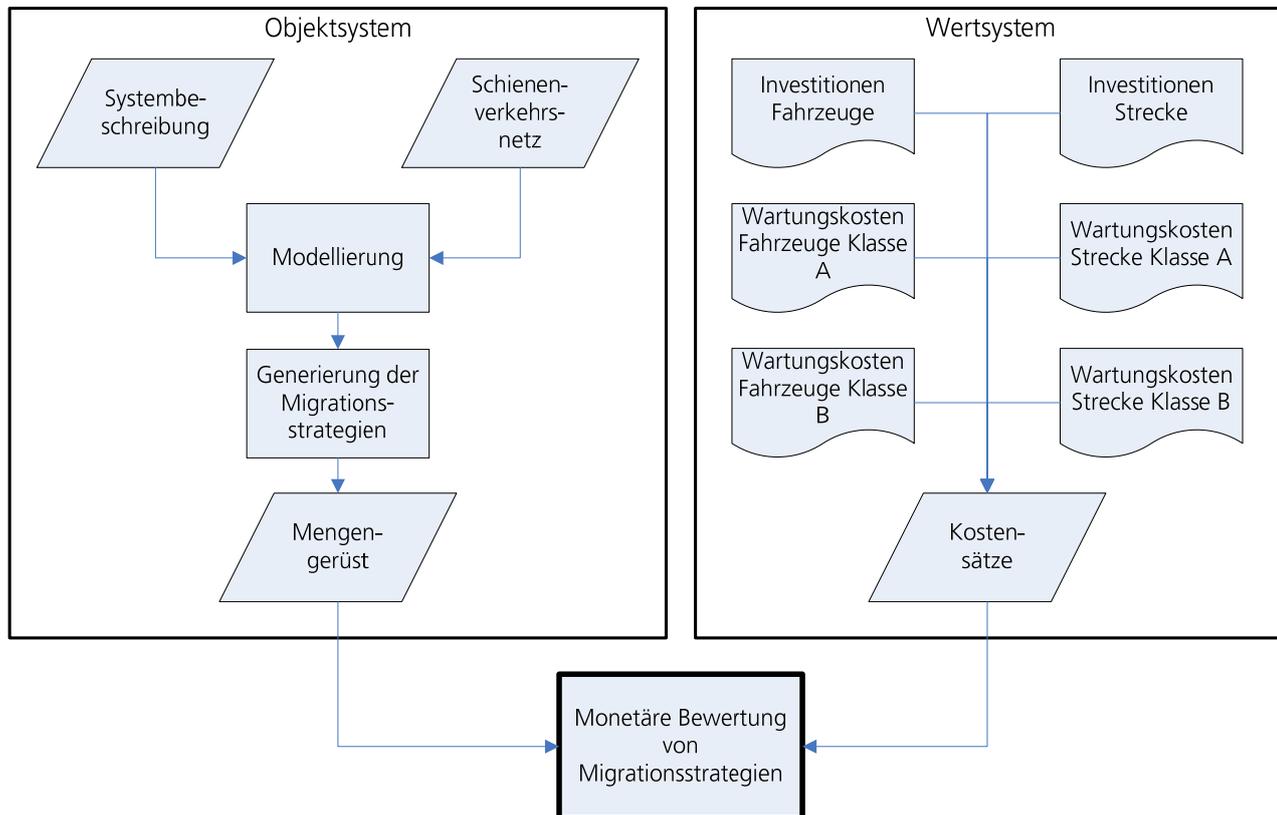


Abbildung 50: Erstellung der monetären Bewertung von Migrationsstrategien

Auf dieser Basis soll eine Optimierung der Migrationsstrategie vorgenommen werden. Dafür stellt sich zunächst die Frage, wie ein Migrationsziel optimal erreicht werden kann. Sind mehrere Migrationsziele möglich, sollen diese einfach gegenübergestellt werden. Voraussetzung dafür ist, dass zu jedem Ziel der optimale Pfad gewählt wurde. Abbildung 51 stellt die dabei durchzuführenden Schritte dar. Nach der Generierung des gesamten strategischen Spielraums werden zunächst alle Zustände gesucht, bei denen die Migration als beendet betrachtet werden kann. Zu diesen Zeitpunkten erfüllt der Ausrüstungszustand auf Fahrzeugen und Strecken alle gestellten Interoperabilitätsanforderungen und nicht mehr benötigte Klasse B Systeme sind außer Betrieb gesetzt. Durch die Kategorisierung der bei der Generierung des strategischen Spielraums gefundenen Zustände ist ein Auffinden aller möglichen Zielzustände leicht möglich, vgl. Abschnitt 3.3. Sind alle diese Endzustände identifiziert, werden für jeden einzelnen Endzustand alle dorthin führenden Pfade gesucht. Unter diesen Pfaden für einen Endzustand soll das Optimum bestimmt werden.

Die Aktivitäten während der Migration finden nicht nur sequentiell, sondern auch parallel statt. Für die Optimierung ist es deswegen essentiell, dass der jeweilige kritische Pfad der Aktivitäten eines Migrationspfades gefunden wird. Da die Abhängigkeiten zwischen den einzel-

nen Aktivitäten bekannt sind, können alle Aktivitäten entlang des kritischen Pfades verschoben werden, ohne dass dieser verlängert wird. Ein erster Optimierungsschritt ist, jede Aktivität so spät wie möglich und so früh wie nötig durchzuführen, ohne dass der kritische Pfad verletzt wird.

Werden danach die von der Migration betroffenen Elemente mit Kostensätzen belegt, kann der kostengünstigste Pfad für jedes Migrationsziel gewählt werden. Durch die Kategorisierung der Zustände während der Migration können weitere Kriterien für die Auswahl verwendet werden. Es ist bspw. möglich, den Pfad zu wählen, der zusätzlich am schnellsten Interoperabilität herstellt.

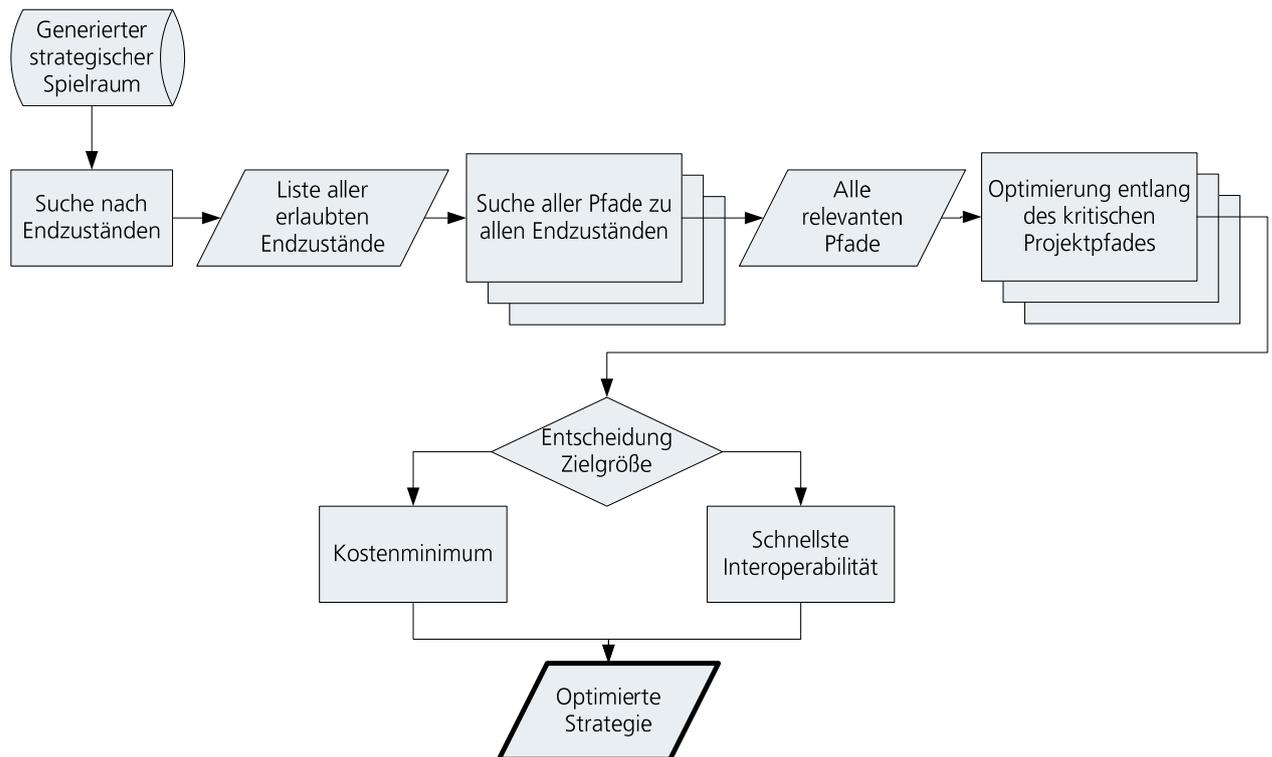


Abbildung 51: Ablauf der Optimierung der Pfade und Ziele

4.3.3 Gegenüberstellung von Migrationsszenarien

Im vorangegangenen Abschnitt wurde für jedes mögliche Migrationsziel der optimale Pfad ermittelt. Darauf aufbauend werden hier die Ziele verglichen, bzw. Szenarien für einen Vergleich erstellt. Die dafür herangezogenen Kriterien werden ebenfalls vorgestellt. Damit ist es nun möglich aus den zulässigen Migrationszielen mit einer jeweils optimierten Strategie das Optimum auszuwählen. Zunächst wird die Erstellung der Migrationsszenarien erläutert. Es besteht die Wahl zwischen einer automatischen Generierung aller alternativen Zielkombinationen und einer gezielten Einschränkung auf Szenarien.

Bei der automatischen Generierung aller Zielkombinationen werden keine oder nur geringe Einschränkungen der möglichen Ausrüstung am Ende der Migration vorgenommen. Es werden alle Migrationsziele berücksichtigt, die technisch erlaubt sind und den gestellten Leistungsanforderungen entsprechen. Damit trifft die in Abschnitt 4.3.1 in Gleichung (66) ge-

machte Vereinfachung nicht zu. Entsprechend hoch ist die resultierende Anzahl an zu untersuchenden Pfad-Ziel-Kombinationen.

Werden hingegen gezielt einzelne Szenarien generiert, gilt für jedes Szenario, anders als in (66), wo für jeden Abschnitt verschiedene Migrationsziele betrachtet werden:

$$g_i = 1 \forall i = 1 \dots o. \quad (72)$$

Damit ist die Zahl der zu betrachtenden Szenarien gegenüber der automatischen Generierung unter Umständen drastisch reduziert. Die Wahl der zu betrachtenden Szenarien muss mit großer Sorgfalt getroffen werden. Dem reduzierten Untersuchungsumfang steht die Gefahr gegenüber, ein optimales Szenario von vornherein auszuschließen.

Die Szenarien werden dabei nach Problemstellung vordefiniert. Bspw. könnte eine flächendeckende Einführung von ETCS Level 2 einer Ausrüstung gegenübergestellt werden, die immer nur den Mindestanforderungen jedes Abschnitts entspricht. Auf allen Abschnitten käme vorzugsweise ETCS Level 1 LS zum Einsatz. ETCS Level 2 würde nur auf den Streckenabschnitten eingesetzt, wo die gestellten Anforderungen für ETCS Level 1 LS zu hoch sind. Dies wäre bspw. bei besonders kurzen Zugfolgezeiten oder Hochgeschwindigkeitsverkehr der Fall. Ein so eventuell entstehender Flickenteppich unterschiedlicher Ausstattungen würde nicht zu größeren Bereichen mit identischer Ausstattung zusammengeführt, obwohl dies bspw. aus bahnbetrieblichen Gründen sinnvoll sein kann.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Betrachtung der Rückfallebene. Für ein bestehendes Szenario können verschiedene Varianten gegenübergestellt werden. Alternativ kann die Rückfallebene auch direkt in die Szenarien integriert werden. Dies ist sinnvoll, wenn zwischen Primärsystem und Rückfallebene eine enge Abhängigkeit besteht. Ein solcher Fall tritt bspw. auf, wenn für ETCS Level 2 ein redundantes GSM-R Netzwerk aufgebaut wird und so eine Verfügbarkeit erreicht werden soll, die eine Rückfallebene unnötig macht. Zum Vergleich könnte dem ein Szenario gegenübergestellt werden, in dem auf Redundanz beim Funknetzwerk zu Gunsten einer Rückfallebene mit ETCS Level 1 LS verzichtet wird.

Die Entscheidung für ein optimales Szenario wird immer im Spannungsfeld zwischen der Höhe der notwendigen einmaligen Investitionen, den kontinuierlich für Betrieb und Instandhaltung anfallenden Kosten, sowie der jeweiligen Leistungsfähigkeit und damit den möglichen Einnahmen getroffen. Um diese Kriterien aufzubereiten und gegenüberzustellen, bietet sich eine Kombination der Investitionsrechnung und der Nutzwertanalyse aus den Abschnitten 2.5.2 und 2.5.3 im Rahmen einer erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse an. Der Vorteil besteht darin, dass neben eindeutig monetarisierbaren Kriterien auch solche integriert betrachtet werden können, die nur indirekt oder gar nicht monetarisiert werden können. Obrenovic (vgl. [Obrenovic 2009]) beschreibt dies ausführlich. Oetting stellt den Zusammenhang zwischen Streckenleistungsfähigkeit, Angebotsqualität und Nachfrage dar (vgl. [Oetting 2005]).

An dieser Stelle nicht eingehend behandelte Punkte sind Markt- und Verkehrsanalysen für die Entwicklung über den Zeitraum der Migration hinaus. Wichtig sind dabei insbesondere die Entwicklung der Preise für ETCS Komponenten, zu erwartende Veränderungen auf dem Anbietermarkt, sowie die Entwicklung der Verkehrsnachfrage. Die ersten beiden Punkte sind im

Rahmen dieser Migrationsbetrachtung insbesondere für eine realistische Abschätzung der zu erwartenden Höhe an Investitionen notwendig. Die Entwicklung der Verkehrsnachfrage muss für die Gestaltung des neuen Systems herangezogen werden. Böhm und Scheier stellen die Gestaltung und Ermittlung von bedarfsgerechter Infrastruktur dar (vgl. [Böhm und Scheier 2010]). Nur so kann sichergestellt werden, dass die Ausrüstung nach der Migration auch den dann bestehenden Anforderungen genügt. Die Robustheit der gewählten Migrationsstrategie gegenüber Änderungen hinsichtlich der Annahmen von Preis-, Markt- und Nachfrageentwicklungen sollte im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

4.4 Entwicklung eines Softwaretools zur Migrationsoptimierung – Railonomics®-Migration

Um die Optimierung von Migrationsszenarien auch praktisch durchführen zu können wurde das Softwaretools zur Migrationsoptimierung – Railonomics®-Migration – entwickelt. Es setzt die bisher beschriebenen Modellierungen und Optimierungsansätze um. Im Rahmen des Fallbeispiels in Kapitel 5 kommt es zum Einsatz und wird hier im Folgenden kurz beschrieben.

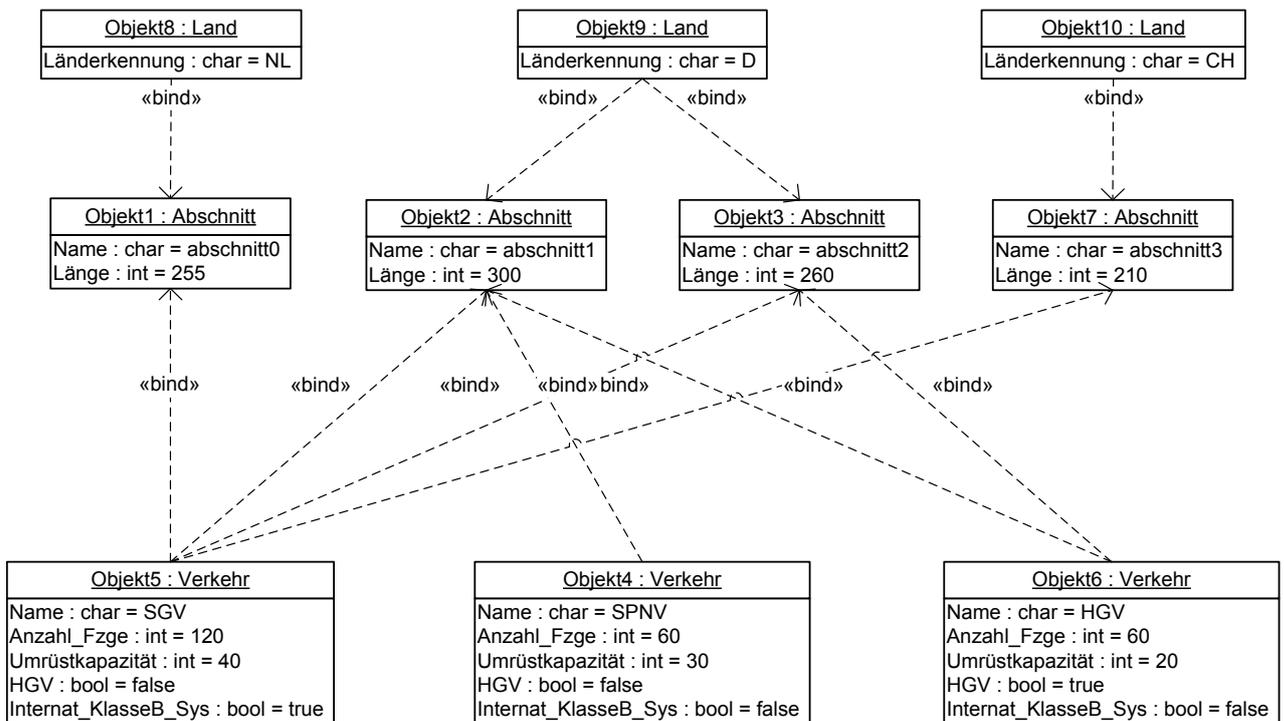


Abbildung 52: Modellierung eines Beispielkorridors

Abbildung 52 zeigt die Repräsentation des Korridors, wie sie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert wurde. Die vorgestellten Elemente werden als Klassen umgesetzt, die Modellierung der Elemente des Verkehrsnetzes geschieht objektorientiert. Ein Korridor oder Streckennetz setzt sich aus jeweils einem oder mehreren Abschnitten, Ländern und Verkehren zusammen. Mit der Verknüpfung der in Abschnitt 3.2.4 identifizierten Objekte werden die Anhängigkeiten und Beziehungen abgebildet. Durch die so erfolgte Modellierung ist es nun möglich, bei der Untersuchung von Migrationsstrategien alle Randbedingungen und gegenseitigen Beeinflussungen für das Streckennetz oder den Korridor zu berücksichtigen. Auf dieser Basis können automatisiert Migrationsstrategien generiert werden, die allen modellierten

Randbedingungen und Vorgaben gerecht werden. Die Modellierung des Schienenverkehrsnetzes ist dabei äußerst flexibel. Unterschiedliche Topologien, egal ob Korridor oder Streckennetz, können abgebildet werden. Auch hinsichtlich des zu berücksichtigenden Verkehrsflusses gibt es keine Beschränkungen. Damit sind die Voraussetzungen erfüllt, eine reale Migrationsproblematik zu modellieren und zu untersuchen.

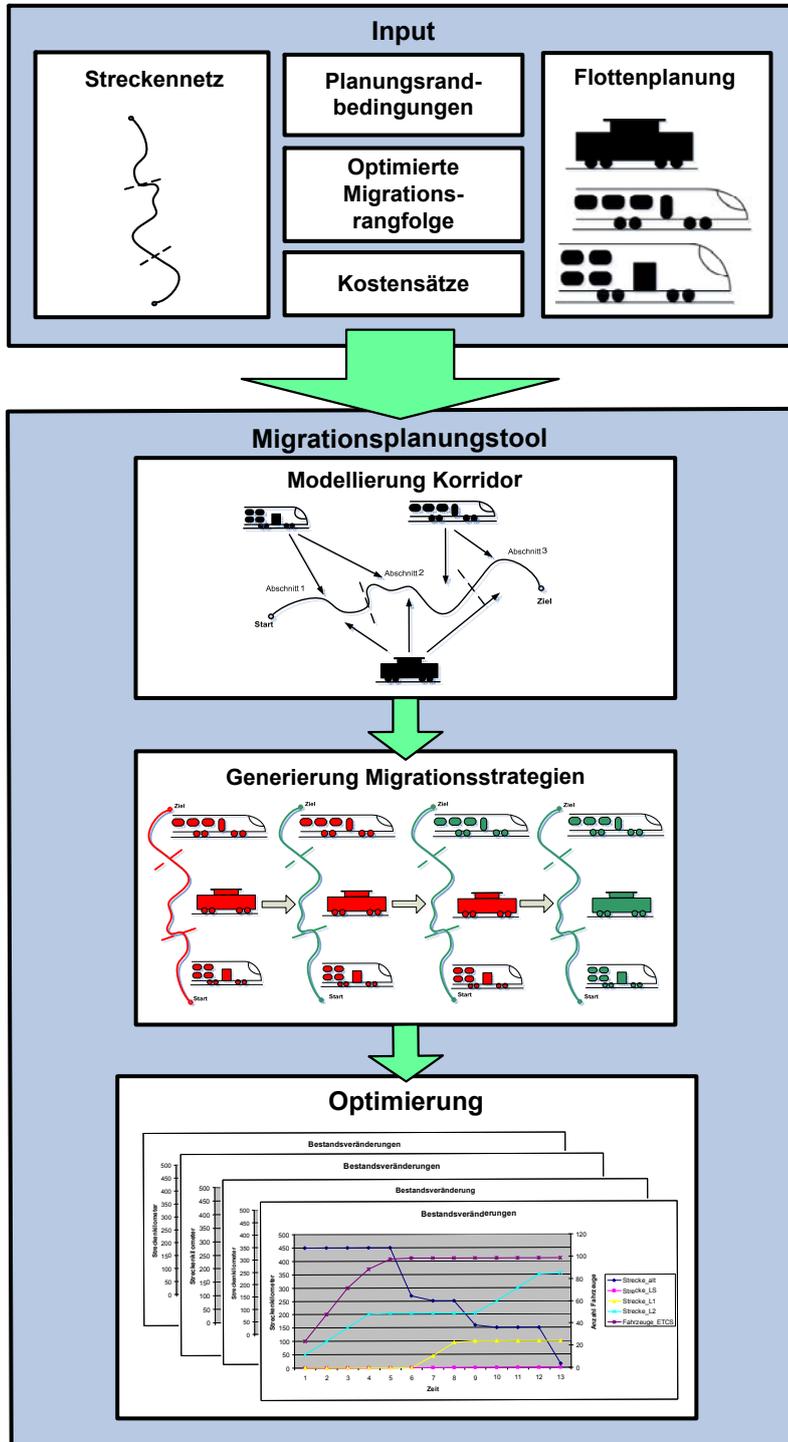


Abbildung 53: Ablauf der automatisierten Optimierung der Migrationspfade und -ziele

Durch entsprechende Verknüpfung der Objektinstanzen wird der Verkehrsfluss bzw. die Netztopologie berücksichtigt. Die darauf basierende Generierung des strategischen Spielraums wurde in Abschnitt 3.3 erläutert. Der Ablauf im Rahmen des Softwaretool Railonomics®-Migration ist in Abbildung 53 dargestellt. Während dieser Abschnitt den Aufbau und

die Durchführung der Optimierung der Migrationspfade und –ziele erläutert, werden im darauf folgenden Abschnitt die dabei erzielten Ergebnisse dargestellt.

In den Objekten, die Streckenabschnitte repräsentieren sind alle relevanten Eigenschaften des realen Streckenabschnitts hinterlegt. Dies ist bspw. die Streckenlänge, kann aber auch die vorzufindende Stellwerksart beinhalten. Die Abbildung der Netztopologie geschieht durch die Verknüpfung der Streckenabschnitte mit den Verkehren. Fließt ein Verkehr über einen Streckenabschnitt, müssen diese beiden Objekte verbunden sein. So findet sich indirekt auch die verkehrliche Verknüpfung der Streckenabschnitte im Modell wieder. In den Objekten sind alle für die Migration relevanten Eigenschaften des abgebildeten realen Verkehrs hinterlegt. Dies sind bspw. die Verkehrsart und die damit verbundenen Anforderungen an die Strecke oder die Anzahl der Fahrzeuge, aus denen der Verkehr besteht.

Aus den so festgelegten Abhängigkeiten zwischen Strecken- und Fahrzeugseite lassen sich die zulässigen Migrationspfade ermitteln. Diese unterscheiden sich darin, ob zunächst die jeweiligen Fahrzeuge oder Streckenabschnitte mit ETCS ausgerüstet werden, bevor die komplementäre Seite in der Ausrüstung folgt. Zur Beschleunigung kann auch eine gleichzeitige Ausrüstung beider Seiten vorgenommen werden. Diese Alternativen werden bezogen auf jeden Streckenabschnitt ermittelt. Darüber hinaus können für jeden Abschnitt auch unterschiedliche Migrationsziele, bspw. ETCS Level 1 oder Level 2, gegenübergestellt werden.

4.5 Einbeziehung von zeitlichen Planungsvorgaben

In den vorangegangenen Abschnitten 4.2 und 4.3 wurde auf die optimierte Migrationsreihenfolge und die Optimierung von Migrationspfaden und –zielen eingegangen. Dabei wurde auch der Einfluss technischer Vorgaben behandelt. Bisher unberücksichtigt blieben jedoch zeitliche Ausrüstungsvorgaben, wie sie bei einem realen Migrationsprojekt vorliegen. In diesem Abschnitt soll die Einbeziehung zeitlicher Planungsvorgaben auf Basis der bis hierhin dargestellten Ansätze vorgenommen werden. Dabei entsteht ein iterativer Prozess, der eine optimierte Strategie unter Einbeziehung aller realen Planungsvorgaben als Ergebnis hat.

Die Besonderheit bei der Einbeziehung der zeitlichen Planungsvorgaben ist, dass bei den Ansätzen zur Optimierung der Migrationsreihenfolge und der Migrationspfade bzw. –ziele unterschiedliche Zeitskalen verwendet werden. In Abschnitt 4.2 stellt ein Zeitschritt die Dauer eines Migrationsschritts dar, unabhängig von der Dauer, die diese Aktion in der Realität beansprucht. Der tatsächliche Zeitverlauf wird darauf aufbauend in Abschnitt 4.3 behandelt. Werden im Rahmen eines Migrationsprojektes zeitliche Vorgaben gesetzt, müssen diese in beide Phasen der Optimierung übernommen werden, wie Abbildung 54 zeigt. Es muss sichergestellt werden, dass die resultierende Strategie das Optimum unter Berücksichtigung der zeitlichen Vorgaben darstellt.

Im Gegensatz zum bisherigen Vorgehen wird nun aus dem realen Projektverlauf der Rang einer zeitlichen Planungsvorgabe, bspw. für die Ausrüstung eines Streckenabschnitts, ermittelt. Der Rang dieser Aktion wird entsprechend festgesetzt, unabhängig davon, ob sie in der ursprünglichen Migrationsrangfolge erst zu einem späteren Zeitpunkt hätte durchgeführt werden müssen. Es wird eine neue Rangfolge für die Durchführung der Migrationsaktivitäten

gesucht, die die Situation nach Durchführung der Vorgabe als Ausgangspunkt hat. Hat die zuvor gefundene Rangfolge eine frühere Durchführung der Aktion vorgesehen, als dies in der Vorgabe der Fall ist, bleibt der Rang unverändert. Auf diese Weise entsteht ein iterativer Prozess, mit dem die zeitlichen Vorgaben in eine optimale Strategie eingearbeitet werden.

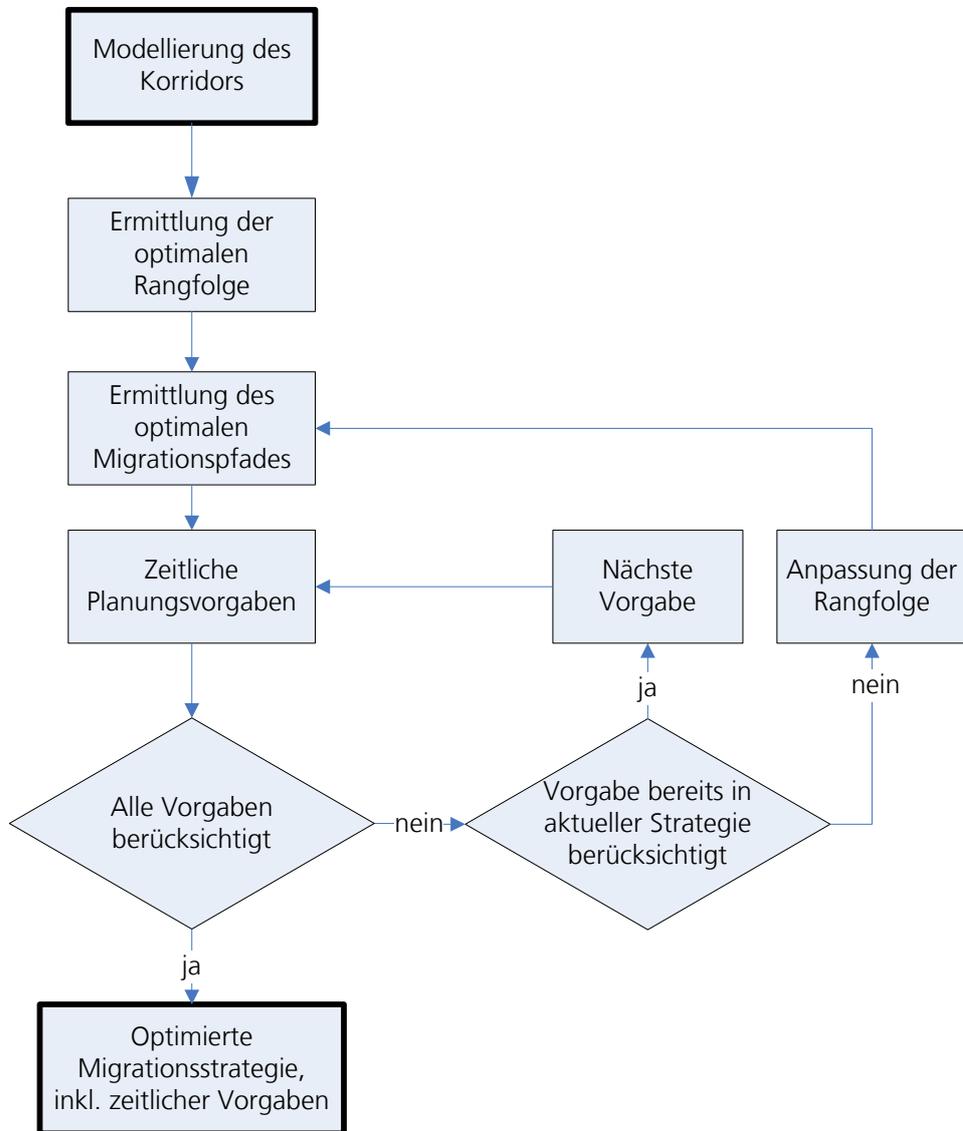


Abbildung 54: Berücksichtigung zeitlicher Vorgaben für die Optimierung

Im Folgenden wird anhand einiger Beispiele dargestellt, welche Vorgaben relevant sein können und wie diese sich auf die Strategie auswirken. Dabei handelt es sich um Vorgaben für die Fahrzeug- und die Streckenseite sowie das Inkrafttreten eines Netzzugangskriteriums.

Zuerst soll diskutiert werden, wie sich dies für die Vorgabe fahrzeugseitiger Ausrüstung mit ETCS gestaltet. Dies ist der Fall, wenn eine Baureihe abgängig ist und ersetzt werden soll. Sind die Neufahrzeuge dann mit ETCS ausgerüstet, muss dies für die weitere Strategie berücksichtigt werden. Für die Optimierung wird deswegen der ursprüngliche Migrationsplan ohne diese Vorgabe verfolgt, bis zum spätesten Zeitpunkt des Umrüstbeginns bei dem die termingerechte Umsetzung der Vorgabe noch möglich ist. Wurde zu diesem Zeitpunkt noch nicht mit der Ausrüstung der betreffenden Baureihe begonnen, muss eine aktualisierte Migrationsreihenfolge ermittelt werden. Dazu wird im Rahmen einer neuerlichen Optimierung der Migrations-

rangfolge nach Abschnitt 4.2 bei der zuletzt durchgeführten Aktion vor Erreichen des spätesten Umrüstbeginns die kritische Masse der betreffenden Baureihe nach (42) als erreicht angesehen. Dadurch ergeben sich veränderte Wichtungsfaktoren für die Wahl des nächsten Migrationsschritts nach (60) und somit im Folgenden unter Umständen eine aktualisierte Migrationsrangfolge. Die Optimierung der Migrationspfade erfolgt nun auf dieser Basis, entsprechend Abschnitt 4.3.2.

Ähnlich ist das Vorgehen bei der Vorgabe der Fertigstellung der Ausrüstung eines Streckenabschnitts. Sie kann durch politische und rechtliche Vorgaben, bspw. im Rahmen einer Korridorausrüstung oder durch die Fertigstellung von Neu- und Ausbaustrecken begründet sein. Zunächst wird bei der Optimierung der Migrationspfade wieder die zuvor ermittelte Rangfolge zur streckenseitigen Umrüstung eingehalten. Ist der späteste Startzeitpunkt zur Umrüstung des betroffenen Streckenabschnitts erreicht, der die Einhaltung der Vorgabe noch gewährt, wird geprüft, ob bereits eine Umrüstung stattfindet oder stattgefunden hat. Ist dies der Fall, treten keine weiteren Änderungen auf. Andernfalls muss dem Abschnitt ein Rang nach (35) zugewiesen werden, der eine rechtzeitige Fertigstellung der Umrüstung sicherstellt. Durch diese Änderung der Rangfolge ergeben sich Änderungen des Wichtungsfaktors für die Optimierung der Rangfolge nach (60). Dementsprechend muss beginnend mit der eingefügten Änderung eine erneute Optimierung vorgenommen werden.

Eine Kombination aus den beiden vorangegangenen Fällen tritt ein, wenn ETCS für einen Abschnitt Netzzugangskriterium wird. Voraussetzung ist dafür, dass sowohl die Strecke als auch alle damit verknüpften Verkehre mit ETCS ausgerüstet sind. Es bedeutet auch, dass das Klasse B System auf dem betreffenden Abschnitt außer Betrieb genommen werden kann. Für den Abschnitt sowie für jeden zugeordneten Verkehr muss die Rangfolge nach obigem Schema so angepasst werden, dass das Netzzugangskriterium zum festgelegten Zeitpunkt erfüllt wird. Der Rückbau des Klasse B Systems ergibt sich dann automatisch aus (49).

Damit ist die Darstellung des Ansatzes Optimierung der Migration bei einer netzweiten Einführung von ETCS abgeschlossen. Es wurde dargestellt, wie eine Analyse des Gesamtsystems durchgeführt wird und wie auf dieser Basis eine optimale Strategie gefunden wird. Zeitliche und technische Vorgaben werden einbezogen. Die praktische Anwendung des Ansatzes wird nun im Kapitel 5 vorgestellt.

5 Fallbeispiel

Auf den folgenden Seiten soll der bisher erarbeitete Ansatz anhand eines Fallbeispiels verdeutlicht und validiert werden. Ziel ist es, die Anwendbarkeit der bis hier hin vorgestellten theoretischen Ausführungen zu demonstrieren. Um den Einfluss verschiedener Rahmenbedingungen darzustellen und einen Hinweis auf die Anwendungsbereiche der Optimierungsansätze zu geben, werden verschiedene Szenarien entwickelt und gegenübergestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei bewusst auf der Optimierung aus Kapitel 4 und nicht auf der Modellbildung aus Kapitel 3, wengleich die Modellbildung Voraussetzung für die Optimierung ist. Abbildung 55 zeigt das Vorgehen.

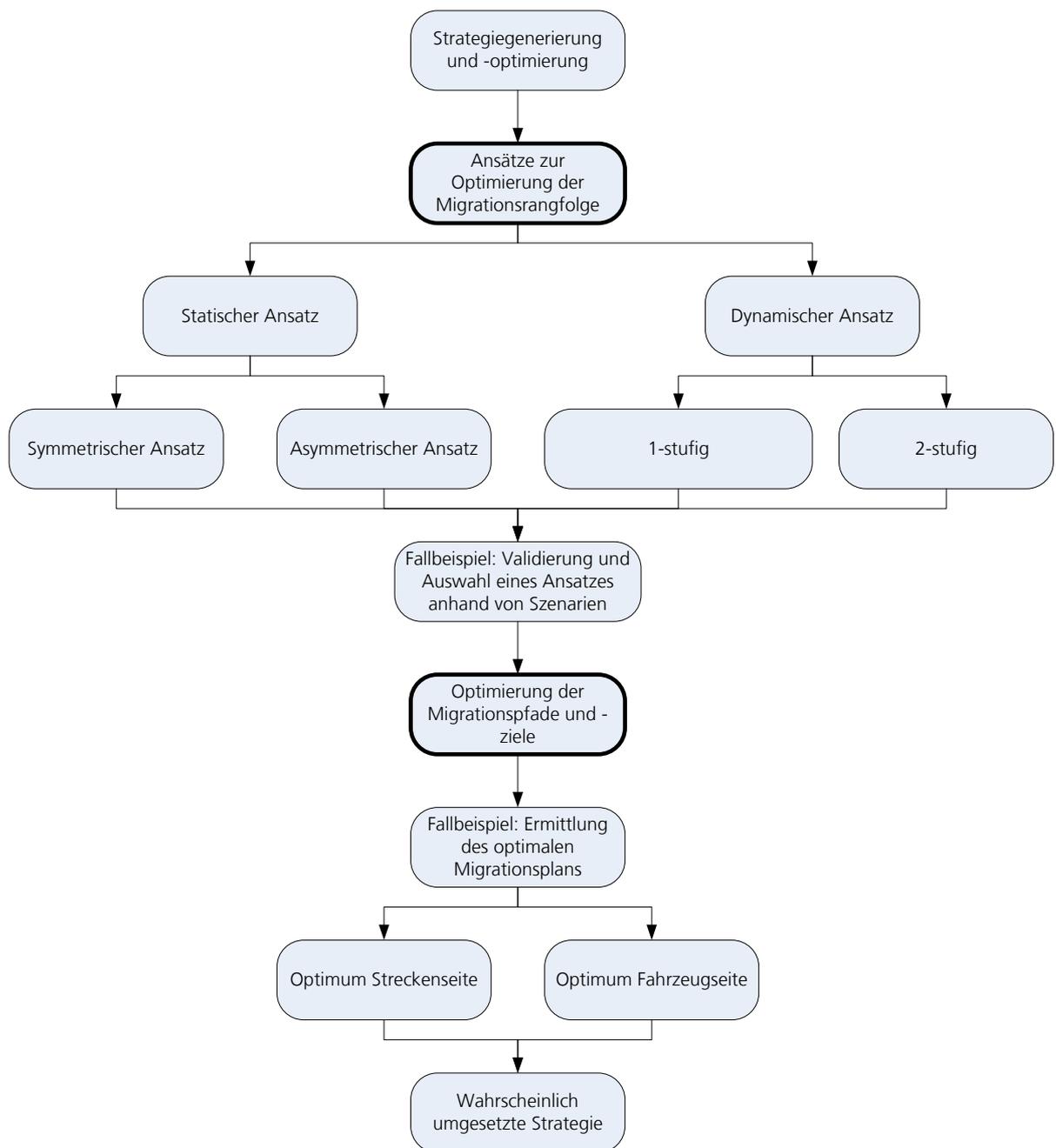


Abbildung 55: Vorgehen des Fallbeispiels, Validierung der Optimierungsmethode

5.1 Überblick

Um die vorgestellten Ansätze zur Strategiegenerierung und –optimierung zu validieren, werden für zwei hypothetische Eisenbahnstrecken Migrationsstrategien entwickelt. Sie entsprechen in Art und Umfang realistischen Migrationsszenarien und geben so einen Hinweis auf die praktische Verwendbarkeit der Ansätze. Die Beispiele sind so gewählt, dass sie sich in Gesamtstreckenlänge und Verkehrsleistung (Zugkilometer) gleichen bzw. vergleichbar sind. So ist es möglich, den Einfluss der Netztopologie isoliert zu betrachten. Der Umfang der anzunehmenden Hard- und Softwareausrüstung wird anhand der vorgestellten Modellbildung abgeschätzt.

Als weiterer Einflussfaktor wird die Charakteristik der kritischen Masse der Verkehre untersucht. Für jede der beiden hypothetischen Eisenbahnstrecken wird eine Strategie für eine generell hohe, eine generell niedrige und eine realistisch ausdifferenzierte kritische Masse der Verkehre gesucht. Auf jedes dieser sechs Szenarien werden der symmetrische und der asymmetrische statische Ansatz sowie der dynamische Ansatz angewendet um die Umrüstreihenfolge der Abschnitte zu finden, die den Nutzen maximiert.

Für die weitere Verwendung wird ein Optimierungsszenario herausgegriffen und detailliert untersucht. Anhand der im Rahmen der Modellierung ermittelten Hard- und Softwareausrüstung können die benötigten Investitionen sowie die entstehenden Kosten abgeschätzt werden. Es findet also eine Untersuchung bis auf Komponentenebene statt. Nachdem zuvor eine Maximierung des Nutzens durch eine optimierte Wahl der Umrüstreihenfolge durchgeführt wurde, kann nun die kostenminimale Umsetzung dieser Strategie ermittelt werden. Dazu wird das Softwaretool Railonomics®-Migration verwendet. Es wurde im Rahmen der Arbeit des Autors am DLR erstellt, dessen Verfahren liegen zur Patentierung beim Deutschen und Europäischen Patentamt vor (vgl. [Lackhove 2009]).

5.2 Modellierung

Aus der Praxis werden im Fallbeispiel zwei Szenarien für die Optimierung von Migrationsvorhaben vorgestellt, die Migration eines Korridors entsprechend der EU-Vorgaben und die Migration eines verzweigten Netzwerks. Da dieses Fallbeispiel die Migration von ETCS behandelt, gelten die selben Anwendungsfälle, Anforderungen und Modellierungen für die Sicherungstechnik, wie in Kapitel 3 beschrieben. Der Einfluss der unterschiedlichen Topologien sowie von unterschiedlichen kritischen Massen für die Fahrzeugumrüstung sollen weitestgehend isoliert betrachten werden, ohne dass weitere, möglicherweise verdeckte Faktoren einen großen Einfluss auf das Optimierungsergebnis erhalten. Die Aussagefähigkeit des Fallbeispiels und der damit einhergehenden Validierung soll so sichergestellt werden.

Um dies zu erreichen ähneln sich die Szenarien in Streckenlänge, Verkehrsleistung (Zugkilometer) und Streckenausrüstung weitestgehend. Zwei reale Migrationsszenarien auf die dieses zutrifft sind schwierig zu finden. Deswegen wird hier auf zwei hypothetische Szenarien zurückgegriffen, die sich stark an realen Vorbildern insbesondere im Umfang orientieren, ohne jedoch im Detail an sie gebunden zu sein. Sie sollen beide innerhalb eines Landes liegen, so dass grenzüberschreitende Verkehre oder unterschiedliche Klasse B Systeme nicht zu berücksichtigen sind.

sichtigen sind. Zum einen wurde ein Korridor gewählt, der mit dem deutschen Abschnitt des TEN-Korridor A von Emmerich bis Basel vergleichbar ist. Das modellierte Netz orientiert sich an den Strecken Aachen-Hannover, Hannover-Hamburg und Hannover-Berlin. Beide Szenarien sind als Schemata in Abbildung 56 zu sehen. Jede Strecke ist in drei gleich lange Abschnitte (A, B, C bzw. A', B', C') unterteilt. An den Verbindungspunkten zwischen den Abschnitten und an den Enden der Strecken sind Bahnhöfe verzeichnet.

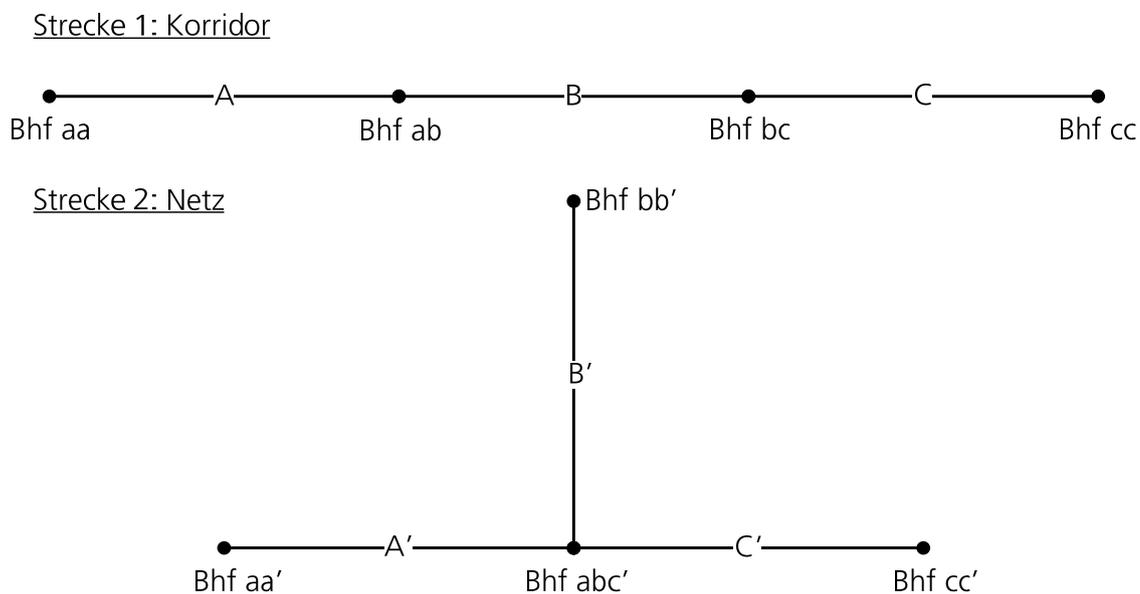


Abbildung 56: Streckentopologien des Fallbeispiels

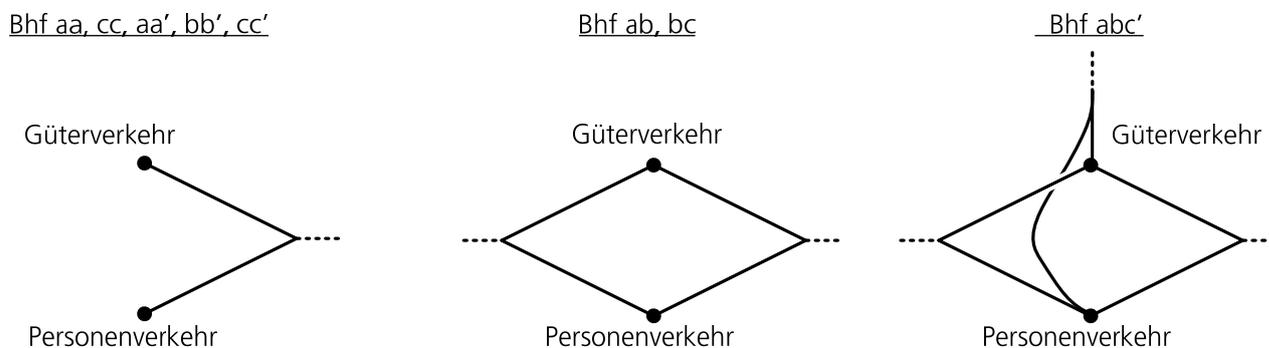


Abbildung 57: Bahnhofstopologien des Fallbeispiels

Die Topologien der Bahnhöfe des Fallbeispiels sind in stark vereinfachter Form in Abbildung 57 dargestellt. Die Bahnhöfe trennen sich immer in einen Bereich für Güterverkehr (G-Bhf) und einen Bereich für Personenverkehr (P-Bhf) auf. Diese sind als unabhängige Anlagen anzusehen und werden bei der späteren Entwicklung von Migrationsstrategien entsprechend behandelt. Dabei ist dem jeweiligen Güterverkehrsteil ausschließlich der betreffende Schienengüterverkehr (SGV) zugeordnet. Für den Personenverkehr sind dies alle Hochgeschwindigkeitsverkehre (HGV) und Schienenpersonennahverkehre (SPNV). Die Bahnhöfe sind über die gestrichelten Linien mit den betreffenden Abschnitten des Netzes bzw. des Korridors verbunden. Hier vereinigen sich Personen- und Güterverkehre wieder. Auf der freien Strecke wird also immer ein Mischverkehr vorhanden. Die eingezeichneten Knoten der Bahnhöfe repräsentieren die nicht weiter detaillierten Gleisanlagen. Dabei unterscheiden sie sich in ihrer Größe.

Güterverkehrsbahnhöfe werden aufgrund der langen Züge und der umfangreichen Rangierbereiche stets als größer als die Personenverkehrsbahnhöfe angenommen.

Tabelle 4 zeigt die Längen der modellierten Streckenabschnitte. Beide betrachteten Strecken haben identische Gesamtlängen. Auch die jeweils korrespondierenden Streckenabschnitte des Korridors und des Netzes gleichen sich. Die Streckenlängen der Bahnhöfe beziehen sich auf die Gesamtlänge der jeweiligen Gleisanlagen. Die Streckenabschnitte wurden mit unterschiedlichen Längen modellieren, wie es realen Vorbildern entspricht.

Korridor				Netz					
Bereich	Name	Nummer	Länge	Bereich	Name	Nummer	Länge		
Bhf aa	P-Bhf aa	1	20 km	Bhf aa'	P-Bhf aa'	1	20 km		
	G-Bhf aa	2	50 km		G-Bhf aa'	2	50 km		
A	A1	3	40 km	A'	A'1	3	40 km		
	A2	4	60 km		A'2	4	60 km		
	A3	5	75 km		A'3	5	75 km		
	A4	6	50 km		A'4	6	50 km		
	A5	7	25 km		A'5	7	25 km		
Bhf ab	P-Bhf ab	8	40 km	Bhf abc'	P-Bhf abc'	8	40 km		
	G-Bhf ab	9	100 km		G-Bhf abc'	9	100 km		
B	B1	10	40 km	B'	B'1	10	40 km		
	B2	11	60 km		B'2	11	60 km		
	B3	12	75 km		B'3	12	75 km		
	B4	13	50 km		B'4	13	50 km		
	B5	14	25 km		B'5	14	25 km		
Bhf bc	P-Bhf bc	15	40 km	Bhf bb'	P-Bhf bb'	15	40 km		
	G-Bhf bc	16	100 km		G-Bhf bb'	16	100 km		
C	C1	17	25 km	C'	C'1	17	25 km		
	C2	18	50 km		C'2	18	50 km		
	C3	19	75 km		C'3	19	75 km		
	C4	20	40 km		C'4	20	40 km		
	C5	21	60 km		C'5	21	60 km		
Bhf cc	P-Bhf cc	22	20 km	Bhf cc'	P-Bhf cc'	22	20 km		
	G-Bhf cc	23	50 km		G-Bhf cc'	23	50 km		
			Summe	1170 km				Summe	1170 km

Tabelle 4: Modellierung der Streckenabschnitte des Fallbeispiels

Für den Vergleich der Ergebnisse der Algorithmen zur Optimierung der Migrationsrangfolge werden jeweils drei Szenarien für mögliche kritische Massen erstellt. Sie sind in Tabelle 5 gezeigt. Es wird unterschieden zwischen Szenarien mit hoher, niedriger und differenzierter kritischer Masse. Für die Szenarien mit im Vergleich hoher bzw. niedriger kritischer Masse wird jedem Verkehr als Beispiel eine kritische Masse von 0,9 bzw. 0,5 zugewiesen. D.h. die Umrüstung der Fahrzeuge des jeweiligen Verkehrs beginnt, wenn 90% bzw. 50% der befahrenen Strecke mit ETCS ausgerüstet ist. Diese Werte sind beispielhaft gewählt, um Grenzfälle für die Gültigkeit der gefundenen Ansätze abzustecken. Im Szenario der differenzierten kritischen Massen werden die Werte abhängig von der Verkehrsart definiert. Es wird angenommen, dass für den HGV ein großer Anreiz zur Umrüstung auf ETCS besteht. Charakteristisch für diese Verkehrsart sind ein linienartiger Fahrzeugumlauf und zunehmende grenzüberschreitende Metropolverbindungen. Dementsprechend liegt mit 0,5 der niedrigste Wert für die kritische Masse vor. Der geringste Anreiz soll beim SPNV vorliegen, dies spiegelt sich in der höchsten kritischen Masse von 0,9 wider. Für den klassischen Nahverkehr ergeben sich durch die Einführung von ETCS keine direkten Vorteile, im Rahmen einer umfassenden Systemablösung ist sie jedoch notwendig. Mit fortschreitender Verbreitung können jedoch durch die

Standardisierung und große Mengengerüste Kostenvorteile generiert werden. Für den SGV besteht zwar ein Anreiz zur Umrüstung durch internationale Frachtrouten und die vorrangig ausgerüsteten Güterverkehrskorridore. Durch die flexibel zu handhabende Lokdisposition wird die Migration jedoch erschwert. Beide Einflüsse sollen durch eine kritische Masse von 0,7 für den SGV wiedergegeben werden. Insofern stellt die differenzierte Unterteilung eine annähernd realistische Annahme dar.

Verkehrsart	Kritische Masse		
	Niedrig	Hoch	Differenziert
HGV	0,5	0,9	0,5
SPNV	0,5	0,9	0,9
SGV	0,5	0,9	0,7

Tabelle 5: Angenommene kritische Massen für die Optimierungsszenarien

Den Verkehrsfluss über den Korridor bzw. das Netz zeigen Tabelle 6 und Tabelle 7. Darin sind mit der Zuordnung zwischen Verkehren und befahrenen Streckenabschnitten, der Anzahl der Fahrzeuge der jeweiligen Verkehre sowie den Streckenlängen der Abschnitte alle Informationen der Gleichungen (3), (4) und (5) aus Abschnitt 3.2.4 enthalten. Damit wurden das Streckennetz sowie der Verkehr modelliert. Durch die untenstehenden Tabellen wird so das gesamte betrachtete Schienenverkehrsnetz abgebildet.

Für beide Beispiele wurde dieselbe Art und Anzahl an Fahrzeugen gewählt. Trotz der unterschiedlichen Topologien und unterschiedlich verteilter Verkehrsflüsse liegen ähnliche Summen der Zugkilometer vor. Zwei benachbarte Abschnitte unterscheiden sich dabei immer bezüglich der ihnen zugeordneten Verkehre. Hervorzuheben ist hier der SGV 15. Dabei handelt es sich um einen Verkehr mit offenem Netzumlauf, der sich keiner abgegrenzten Menge von Abschnitten zuordnen lässt. Durch die hohe Anzahl von Fahrzeugen und die Zuordnung der maximal möglichen Streckenlänge bekommt er einen großen Einfluss auf die zu wählende Strategie.

Anhand der über die Streckenabschnitte fließenden Verkehre lassen sich Anforderungen an die Streckeninfrastruktur formulieren, wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt. Entsprechend können die Strecken in Kategorien eingeteilt werden, bspw. wie in den Konzernrichtlinien 413 der Deutschen Bahn (vgl. [Deutsche Bahn AG 2002]). Aufgrund der gemischten Verkehre auf den freien Streckenabschnitten und den über alle Abschnitte fließenden HGV scheint die Wahl der Kategorie M230 realistisch. Da eine hohe geforderte Leistungsfähigkeit angenommen wird, soll durchgängig von einer Projektierung entsprechend der oberen Leistungsgrenze ausgegangen werden. Die großen Personenbahnhöfe ab, abc', bc und bb' werden definiert nach Kategorie P230A, die kleineren Bahnhöfe aa, aa', cc und cc' nach Kategorie P230B. Die Güterbahnhöfe werden der Kategorie G120 zugeordnet, wobei die größeren Güterbahnhöfe ab, abc', bc und bb' entsprechend G120A, die kleineren aa, aa', cc und cc' entsprechend G120D1.

Bereich Name Nummer Länge / km	Bhf aa		A		Bhf ab		B		Bhf bc		C		Bhf cc															
	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	P-Bhf bc	G-Bhf bc	C1	C2	C3	C4	C5	P-Bhf cc	G-Bhf cc							
SGV 1	20	50	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
SGV 2			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 3			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 4			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 5			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 6			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 7			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 8			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 9			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 10			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 11			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 12			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 13			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 14			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HGV 1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 2			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 3			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HGV 2			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HGV 3			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 4			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 5			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 6			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 7			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 8			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HGV 4			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
HGV 5			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 9			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 10			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 11			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SPNV 12			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SGV 15			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Summe			3400	20000	22800	38400	48000	36000	20125	13400	70000	36800	56400	73875	50750	24875	14000	74000	18875	36750	44625	23680	29520	1840	20000			
Fahrzeuge																												
Zugkilometer																												
Summe																												
Zugkilometer																												

Tabelle 6: Modellierung des Beispielkorridors

Bereich Name Nummer Länge / km	Bhf aa			A			Bhf abc			B			Bhf bb			C			Bhf cc												
	P-Bhf aa	G-Bhf aa	Anzahl	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf abc	G-Bhf abc	B1	B2	B3	B4	B5	P-Bhf bb	G-Bhf bb	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5	P-Bhf cc	G-Bhf cc	Anzahl	
SGV 1	20	50		40	60	75	50	25	40	100	40	60	75	50	25	40	100	40	60	75	50	25	17	18	19	20	21	22	23	50	
SGV 2		1	20	1	1	1	1	1															1	1	1	1	1			1	
SGV 3		1	40	1	1	1	1	1															1	1	1	1	1			1	
SGV 4		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 5		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 6		1	50	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 7		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 8		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 9		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 10		1	70	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 11		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 12		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 13		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 14		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
HGV 1		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 1		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 2		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 3		1	15	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
HGV 2		1	70	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
HGV 3		1	50	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 4		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 5		1	25	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 6		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 7		1	30	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 8		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
HGV 4		1	60	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
HGV 5		1	15	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SPNV 9		1	20	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 10		1	17	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1															
SPNV 11		1	40	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SPNV 12		1	30	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
SGV 15		1	300	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1			1	
Summe				3400	21000	23600	39600	53250	36500	18625	15600	76000	32400	50400	63375	39250	18875	10600	49000	19875	41250	58875	30480	36720	1840	26000					
Fahrzeuge																															
Zugkilometer																															
Zugkilometer																															

Tabelle 7: Modellierung des Beispielnetzes

Aufgrund dieser generalisierten Annahmen kann die Anzahl der zu installierenden Hardwareelemente, hauptsächlich Balisen, Radio Block Centers und Base Transceiver Stations, abgeschätzt werden, wie in Abschnitt 3.2.4.3 dargestellt. Dies ist in Tabelle 8 dargestellt. Darüber hinaus ergibt sich aus der Anzahl an Fahrstraßen in den Bahnhöfen und den Blockabschnitten auf der freien Strecke ein Anhaltspunkt für die Zahl der zu generierenden Movement Authorities. Aus der Anzahl der Balisen ergibt sich außerdem die Anzahl der zu programmierenden Linkings zwischen den Balisengruppen. Tabelle 8 stellt darüber hinaus dar, wie für die so ermittelten Elemente Kostensätze angenommen werden und sich daraus eine Abschätzung der gesamten Anschaffungskosten ergibt. Für die Darstellung des Investitionsverlaufs einer Migrationsstrategie ist es üblich die Kosten pro Kilometer auszuweisen. Dabei handelt es sich um eine Verallgemeinerung, die auch die Kosten für die Bahnhöfe beinhaltet. (Vgl. [Lackhove und Scheier 2010])

	Gesamtzahl der Elemente	Kostensätze	Hardwarekosten	Projektierungskosten
Balisen	8560	2.000 €	17.120.000 €	
Fahrstraßen	204	15.000 €		3.060.000 €
Linking	8560	1.000 €		8.560.000 €
Blöcke	500	10.000 €		5.000.000 €
RBC	19	3.000.000 €		57.000.000 €
			Hardware gesamt	Projektierung gesamt
			17.120.000 €	73.620.000 €
				Gesamtkosten
				90.740.000 €
				Kosten pro Kilometer
				77.556 €

Tabelle 8: Abschätzung der Projektierung und der Kosten

Für die Bewertung und Auswahl der generierten Strategien müssen nun noch Kostensätze für die Aktivitäten und Komponenten definiert werden. Sie sind in Tabelle 9 für alle zu bewertenden Elemente dargestellt. Zusätzlich zu den Investitionen pro ausgerüsteten Streckenkilometer werden noch Investitionen pro Fahrzeugausrüstung, sowie fahrzeug- und streckenseitige Instandhaltungskosten berücksichtigt. Für die Durchführung einer dynamischen Investitionsrechnung wird auch ein zu berücksichtigender interner Zinsfuß festgeschrieben.

Kostensatz	Wert
Instandhaltung Strecke Klasse B	14000 € / km p.a.
Instandhaltung Strecke Level 2	7000 € / km p.a.
Invest Strecke Level 2	77556 € / km
Instandhaltung Fahrzeug Klasse B	18000 € / Fzg. p.a.
Instandhaltung Fahrzeug ETCS	9000 € / Fzg. p.a.
Invest Fahrzeug ETCS	300000 € / Fzg.
Zinssatz	8 %

Tabelle 9: Modellierte Kostensätze des Fallbeispiels

Für die Ermittlung des tatsächlichen Zeitverlaufs müssen die Umrüstzeiten für jeden Verkehr und jeden Streckenabschnitt berücksichtigt werden. Sie ergeben sich aus den als Umrüstkapazitäten zur Verfügung stehenden Ressourcen und der jeweiligen Anzahl an Streckenkilometern bzw. Fahrzeugen. In Tabelle 10 sind diese für alle Streckenabschnitte und Verkehre dargestellt. Die angenommenen Umrüstkapazitäten bewegen sich im Rahmen von in Expertengesprächen getroffenen Aussagen. Zu beachten ist, dass neben den lokal für einen Abschnitt

oder einen Verkehr geltenden Umrüstkapazitäten auch globale Beschränkungen gelten können, die die Umrüstkapazitäten innerhalb eines Jahres insgesamt begrenzen können. Dies können bspw. die finanziellen Mittel sein, die dem Unternehmen zur Verfügung stehen, dass für einen Großteil des Streckennetzes zuständig ist. Diese Randbedingungen bleiben jedoch hier unberücksichtigt.

Abschnitt	Streckenlänge	Umrüstkapazität	Rückbau	Verkehr	Anzahl Fahrzeuge	Umrüstkapazität
Paa	20 km	20 km p.a.	20 km p.a.	SGV 1	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
Gaa	50 km	25 km p.a.	50 km p.a.	SGV 2	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
A1	40 km	40 km p.a.	40 km p.a.	SGV 3	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
A2	60 km	30 km p.a.	60 km p.a.	SGV 4	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
A3	75 km	25 km p.a.	75 km p.a.	SGV 5	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
A4	50 km	25 km p.a.	50 km p.a.	SGV 6	50 Fzge.	50 Fzge. p.a.
A5	25 km	25 km p.a.	25 km p.a.	SGV 7	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
Pabc	40 km	20 km p.a.	40 km p.a.	SGV 8	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
Gabc	100 km	25 km p.a.	100 km p.a.	SGV 9	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
B1	40 km	40 km p.a.	40 km p.a.	SGV 10	70 Fzge.	35 Fzge. p.a.
B2	60 km	30 km p.a.	60 km p.a.	SGV 11	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
B3	75 km	25 km p.a.	75 km p.a.	SGV 12	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
B4	50 km	25 km p.a.	50 km p.a.	SGV 13	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
B5	25 km	25 km p.a.	25 km p.a.	SGV 14	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
Pbb	40 km	20 km p.a.	40 km p.a.	SGV 15	300 Fzge.	50 Fzge. p.a.
Gbb	100 km	25 km p.a.	100 km p.a.	HGV 1	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
C1	25 km	25 km p.a.	25 km p.a.	HGV 2	70 Fzge.	35 Fzge. p.a.
C2	50 km	25 km p.a.	50 km p.a.	HGV 3	50 Fzge.	50 Fzge. p.a.
C3	75 km	25 km p.a.	75 km p.a.	HGV 4	60 Fzge.	30 Fzge. p.a.
C4	40 km	40 km p.a.	40 km p.a.	HGV 5	15 Fzge.	15 Fzge. p.a.
C5	60 km	30 km p.a.	60 km p.a.	SPNV 1	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
Pcc	20 km	20 km p.a.	20 km p.a.	SPNV 2	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
Gcc	50 km	25 km p.a.	50 km p.a.	SPNV 3	15 Fzge.	15 Fzge. p.a.
				SPNV 4	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
				SPNV 5	25 Fzge.	25 Fzge. p.a.
				SPNV 6	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
				SPNV 7	30 Fzge.	30 Fzge. p.a.
				SPNV 8	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
				SPNV 9	20 Fzge.	20 Fzge. p.a.
				SPNV 10	17 Fzge.	17 Fzge. p.a.
				SPNV 11	40 Fzge.	40 Fzge. p.a.
				SPNV 12	30 Fzge.	30 Fzge. p.a.

Tabelle 10: Modellierte Umrüstkapazitäten des Fallbeispiels

Damit ist die Modellierung des Fallbeispiels abgeschlossen. Es wurden zwei topologisch unterschiedliche Strecken entworfen, die über einen ähnlichen Verkehrsfluss verfügen. Für die vorkommenden Verkehrsarten wurden drei unterschiedliche Szenarien an kritischen Massen definiert, also unterschiedliche Anreize für die EVU, ihre Fahrzeuge auf ETCS zu migrieren. Zum Schluss wurden auch die Anschaffungskosten pro Streckenkilometer basierend auf der angenommenen Projektierung der Infrastruktur abgeschätzt, sowie Umrüstkapazitäten und Kostensätze festgelegt. Es liegen alle Informationen vor, um die hergeleiteten Ansätze zur Optimierung von Migrationsstrategien zu validieren. In den folgenden Abschnitten werden dafür zunächst die Ansätze zur Optimierung der Migrationsrangfolge gegenübergestellt und anschließend eine Optimierung der Migrationspfade und -ziele durchgeführt.

5.3 Ansätze zur Optimierung der Migrationsrangfolge

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Modellierung des Fallbeispiels vorgestellt wurde, folgt hier die Untersuchung der Eignung der Optimierungsansätze für die Migrationsrangfolge. Für jedes der beiden Streckenszenarien wird eine Strategie für eine generell hohe, eine

generell niedrige und eine realistisch ausdifferenzierte kritische Masse der Verkehre gesucht. Auf jedes dieser sechs Szenarien werden der symmetrische und der asymmetrische statische Ansatz sowie der 1-stufige und der 2-stufige dynamische Ansatz angewendet um die Umrüstereihenfolge der Abschnitte zu finden, die den Nutzen maximiert. So findet eine Validierung der vier vorgestellten Ansätze statt.

Aus der theoretischen Herleitung ist zu erwarten, dass die dynamischen Ansätze grundsätzlich bessere Ergebnisse liefern als die statischen. Dabei sollte das Vorgehen, dass neben der Wichtungsfunktion in jedem Migrationsschritt auch die auf rein auf ETCS erbrachten Zugkilometer maximiert, dem allein auf der Wichtungsfunktion basierenden Verfahren überlegen sein. Bei den statischen Ansätzen ist zu erwarten, dass der asymmetrische Ansatz die besseren Ergebnisse liefert, da er die Abhängigkeiten im Verkehrsnetz besser abbildet.

Als Kriterium für den Vergleich der unterschiedlichen Ansätze wird jeweils die Summe der allein auf ETCS erbrachten Zugkilometer über die gesamte Migrationsdauer angegeben. Eine Strategie ist also dann vorteilhaft, wenn sie möglichst früh eine starke und anhaltende Steigerung an Zugkilometer allein auf ETCS ermöglicht. Dies entspricht einer schnellen Nutzengenerierung während der Migration, wie es auch in Abschnitt 4.1.1 in Definition V hergeleitet wurde. Um die jeweils durch die Ansätze ermittelten Ergebnisse nachvollziehbar zu machen, sind die ETCS-Fahrzeugausrüstung und die allein mit ETCS ausgerüsteten Streckenkilometer im Zeitverlauf dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang A.3 zu finden.

Nachdem die Optimierungsergebnisse für die Szenarien unterschiedlicher kritischer Massen für den generierten Korridor und das Netz dargestellt wurden, werden die Ansätze insgesamt gegenübergestellt. So können die Einschränkungen und Randbedingungen gezeigt werden, unter denen die gestellten Erwartungen erfüllt werden und diejenigen, bei denen das nicht der Fall ist. Es wird eine Aussage über günstige und ungünstige Einsatzfälle und eine Empfehlung für die praktische Anwendung getroffen. Für die Weiterführung des Fallbeispiels bis auf die Ebene der Migrationspfade wird am Ende des Abschnitts eines der Optimierungsergebnisse herausgegriffen. So soll dem Leser die vollständige Durchführung der Optimierung einer Migrationsstrategie vorgestellt werden.

5.3.1 Niedrige kritische Masse

Die Untersuchung der Szenarien der niedrigen kritischen Masse ergibt ein erstaunliches Ergebnis. Abbildung 58 zeigt, dass sowohl für den Korridor, als auch für das Netz der statische Ansatz mit asymmetrischer Verknüpfung die besten Ergebnisse liefert. Die beiden dynamischen Ansätze liegen in beiden Fällen etwa gleich auf dahinter, erwartungsgemäß erzielt der statische Ansatz mit symmetrischer Verknüpfung die niedrigste Bewertung.

Betrachtet man die Strategien im Detail, so können die dynamischen Ansätze in Abbildung 59 und Abbildung 60 zwar eine schnelle Umrüstung von Fahrzeugen erreichen, die teilweise sogar über der des asymmetrischen statischen Ansatzes liegt. Damit geht jedoch keine schnelle streckenseitige Umschaltung auf ETCS einher, wie Abbildung 61 und Abbildung 62 zeigen. Es ergibt sich also eine Strategie, bei der relativ früh viele umgerüstete Fahrzeuge auf Strecken mit alter Technik verkehren. Interessant ist bei den dynamischen Ansätzen, dass im Fall des

Korridors trotz unterschiedlicher Verläufe für die Fahrzeugumrüstung in Abbildung 59, identische Verläufe bei den Zugkilometern allein auf ETCS vorliegen, wie Abbildung 61 zeigt.

Die Erklärung für das nicht erwartungsgemäße Verhalten liegt in der Quadrierung des Wichtungsfaktors (60). Dadurch werden Abschnitte mit einem hohen Anteil an zugeordneten Zugkilometern auf ETCS für den nächsten Migrationsschritt bevorzugt gewählt. Dies geschieht gerade dann, wenn als Alternative ein Abschnitt gegenübersteht, dem zahlenmäßig mehr Verkehre zugeordnet sind, diese jedoch einen niedrigeren Anteil ihres Verkehrs auf ETCS-Strecken erbringen. Implizit liegt dieser Formulierung des Optimierungskriteriums zugrunde, dass mit hohen kritischen Massen zu rechnen ist. Liegen hingegen durchgängig niedrige kritische Massen vor, ist dieses Vorgehen nicht mehr erfolgreich.

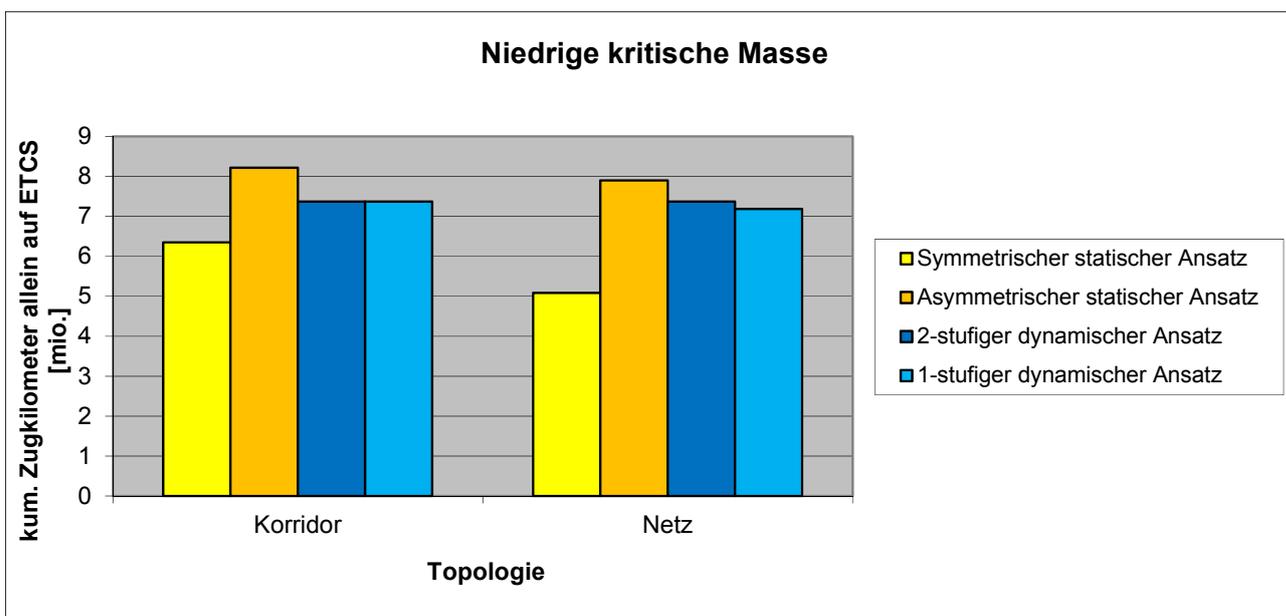


Abbildung 58: Bewertung der Algorithmen bei niedrigen kritischen Massen

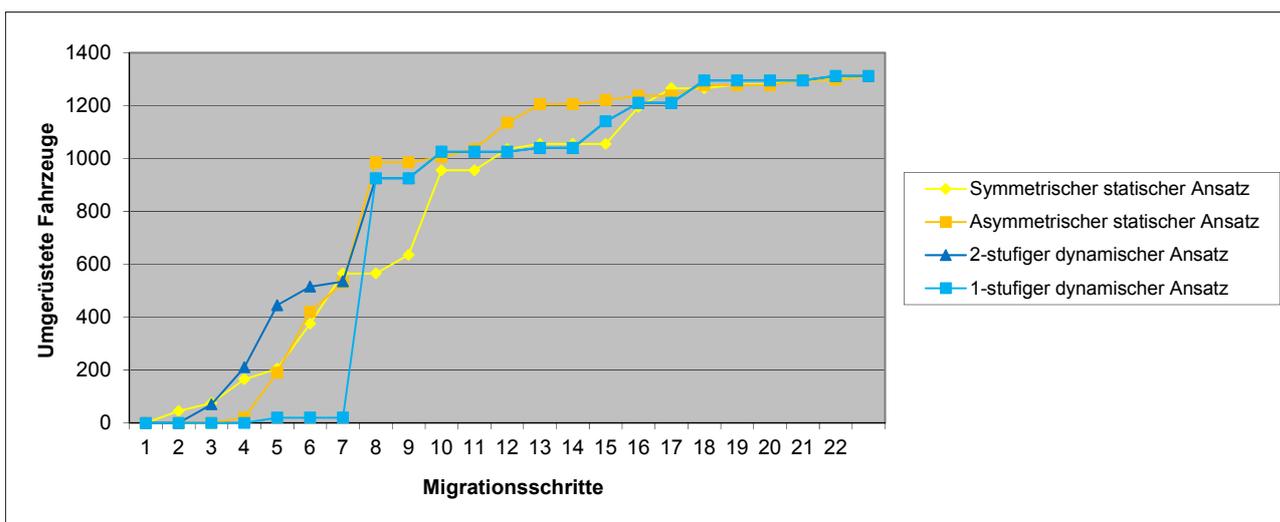


Abbildung 59: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei niedriger kritischer Masse, Korridor

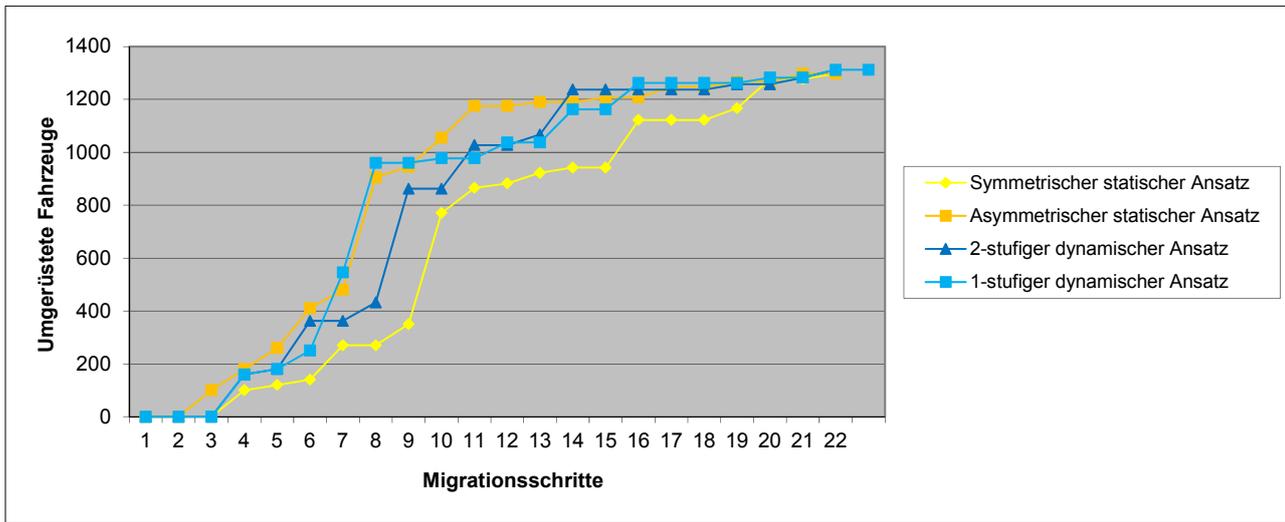


Abbildung 60: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei niedriger kritischer Masse, Netz

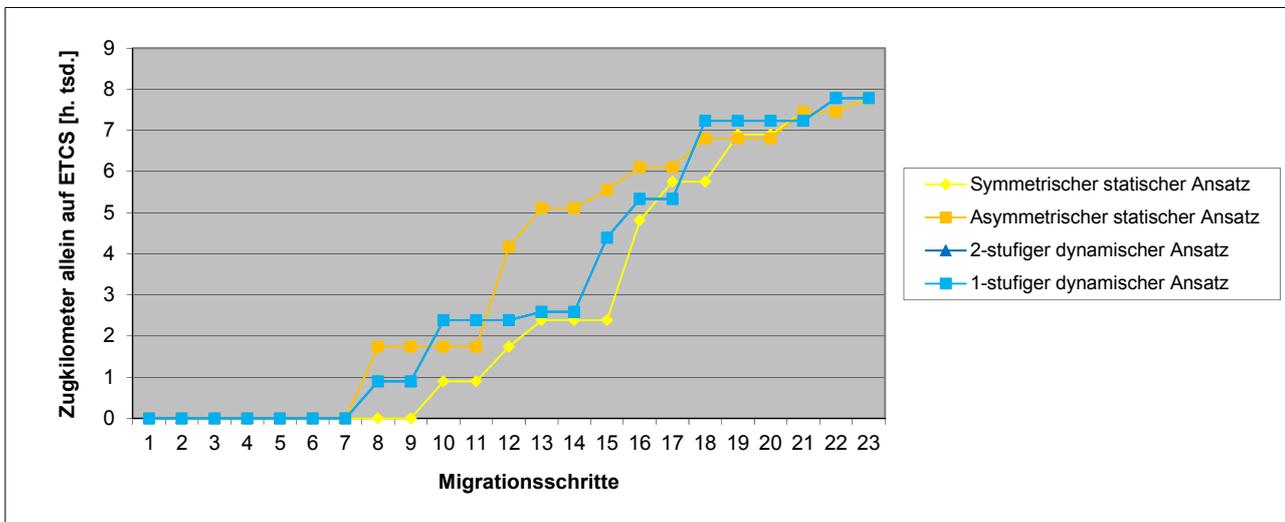


Abbildung 61: Verlauf der Zugkilometer allein auf ETCS bei niedriger kritischer Masse, Korridor

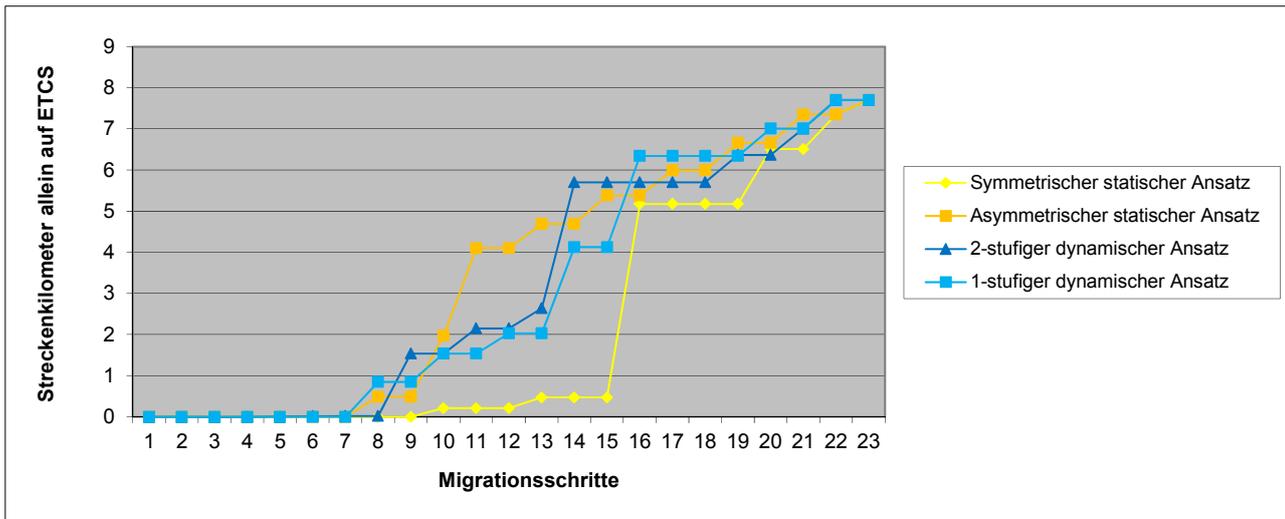


Abbildung 62: Verlauf der Zugkilometer allein auf ETCS bei niedriger kritischer Masse, Netz

Bei dem asymmetrischen statischen Ansatz liegt eine Gewichtung wie bei den dynamischen Ansätzen nicht vor. Stattdessen wird jeweils der Abschnitt für die nächste Umrüstung gewählt, der die größte verkehrliche Verknüpfung mit den bereits umgerüsteten Abschnitten

besitzt. Bei niedrigen kritischen Massen führt dies zu einer schnelle Fahrzeugumrüstung, einhergehend mit einer schnellen Umschaltung auf das neue System ETCS.

5.3.2 Hohe kritische Masse

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Szenarien mit durchgängig hoher kritischer Masse für die Fahrzeugumrüstung müssen differenziert betrachtet werden, da die Netztopologie einen erheblichen Einfluss erhält. Bei der Betrachtung von Abbildung 63 wird dies deutlich. Das Optimierungsergebnis des dynamischen Ansatzes ist im Falle des Korridors stark negativ durch die Topologie beeinflusst und liefert das im Vergleich schlechteste Ergebnis. Im Falle des Netzes hingegen liegen die dynamischen Ansätze fast gleich auf an erster Stelle.

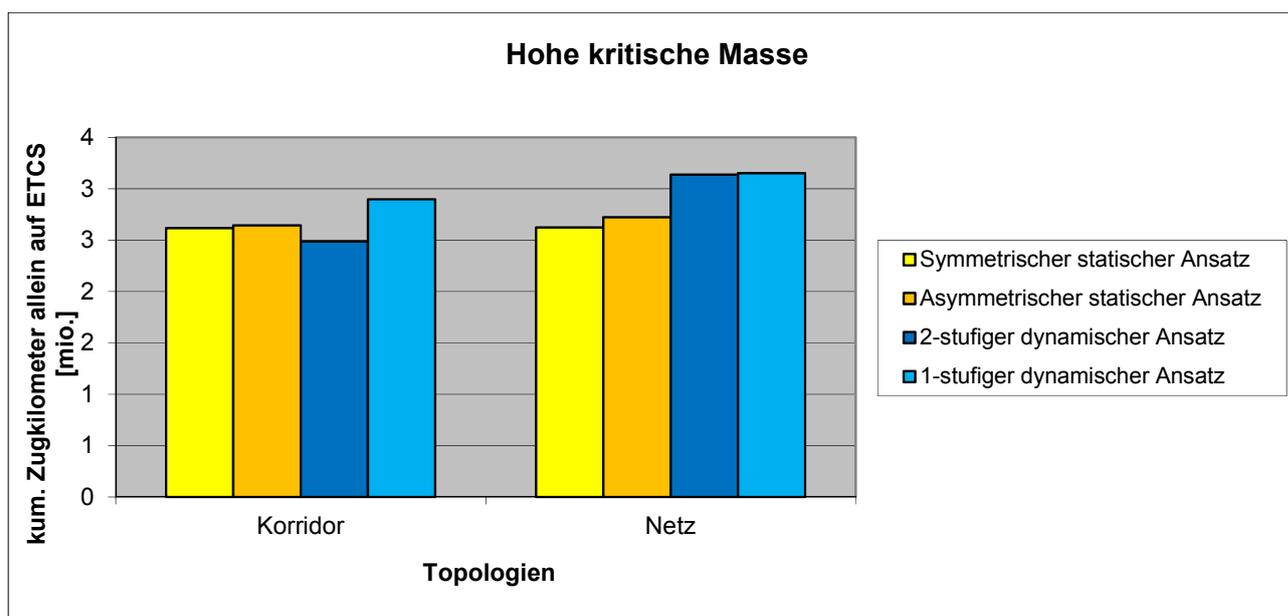


Abbildung 63: Bewertung der Algorithmen bei hohen kritischen Massen

Aus einer detaillierten Betrachtung der Fahrzeugumrüstungen in Abbildung 64 und Abbildung 65 wird zunächst ersichtlich, warum der 2-stufige dynamische Ansatz bei der Topologie des Korridors in ein lokales und kein globales Optimum läuft. Insbesondere zu Beginn der Migration laufen für beide Topologien die Fahrzeugumrüstungen für die dynamischen Varianten der Optimierung parallel. Gegen Ende der Migration hingegen schafft es der 1-stufige Ansatz eine Fahrzeugumrüstung zu erreichen, die über der aller anderen liegt. Hervorzuheben ist hierbei insbesondere der Verkehr SGV 15. Aufgrund der hohen Zahl an zugeordneten Fahrzeugen hat er einen signifikanten Einfluss. Der 2-stufige dynamische Ansatz erreicht für diesen Verkehr als erstes die kritische Masse.

Die Betrachtung des Verlaufs der allein mit ETCS ausgerüsteten Strecken in Abbildung 66 und Abbildung 67 zeigt, dass der 2-stufige dynamische Ansatz im Fall des Korridors am frühesten mit dem Rückbau des Altsystems beginnt. Obwohl zu erkennen ist, dass der Rückbau des Altsystems beim 1-stufigen dynamischen Ansatz später beginnt, liefert dieser das beste Ergebnis. Auffällig ist dies insbesondere im Vergleich zum statischen asymmetrischen Ansatz.

Der Optimierungserfolg des 2-stufigen dynamischen Ansatzes stellt sich im Falle des Netzes anders dar. In Abbildung 68 verlaufen die Strategien der beiden dynamischen Ansätze nahezu

parallel und liefern die besten Ergebnisse. Die statischen Ansätze zeigen zum Ende der Migration große Ähnlichkeiten. Allerdings erreicht der asymmetrische Ansatz zu Beginn einen schnelleren Anstieg der allein mit ETCS ausgerüsteten Strecken, woraus insgesamt ein besseres Ergebnis resultiert.

Zusammenfassend liegt also der Schluss nahe, dass bei einer Netztopologie, aus der verkehrlich schwach verknüpfte Abschnitte resultieren und bei der hohe kritische Massen für die Fahrzeugumrüstung vorliegen, ein zu früher Rückbau des Altsystems in einem lokalen Minimum resultieren kann. Bildlich lässt sich dies anhand eines Korridors vorstellen. Während durch eine solche Strategie in einem Bereich eine schnelle vollständige Umrüstung erreicht wird, haben diese Migrationsschritte kaum Auswirkungen auf die Ausrüstung der übrigen Streckenabschnitte. Dieser Effekt tritt insbesondere dann verstärkt auf, wenn ein einzelner Verkehr einen signifikanten Anteil der gesamten Zugkilometer erbringt. Dies ist im bei dem Verkehr SGV 15 der Fall.

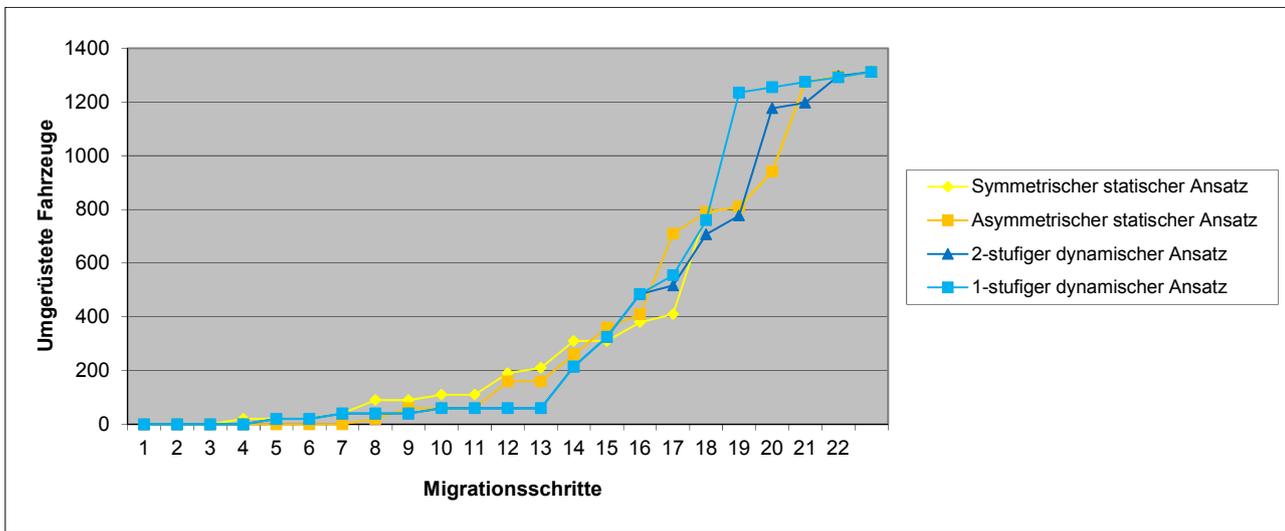


Abbildung 64: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei hoher kritischer Masse, Korridor

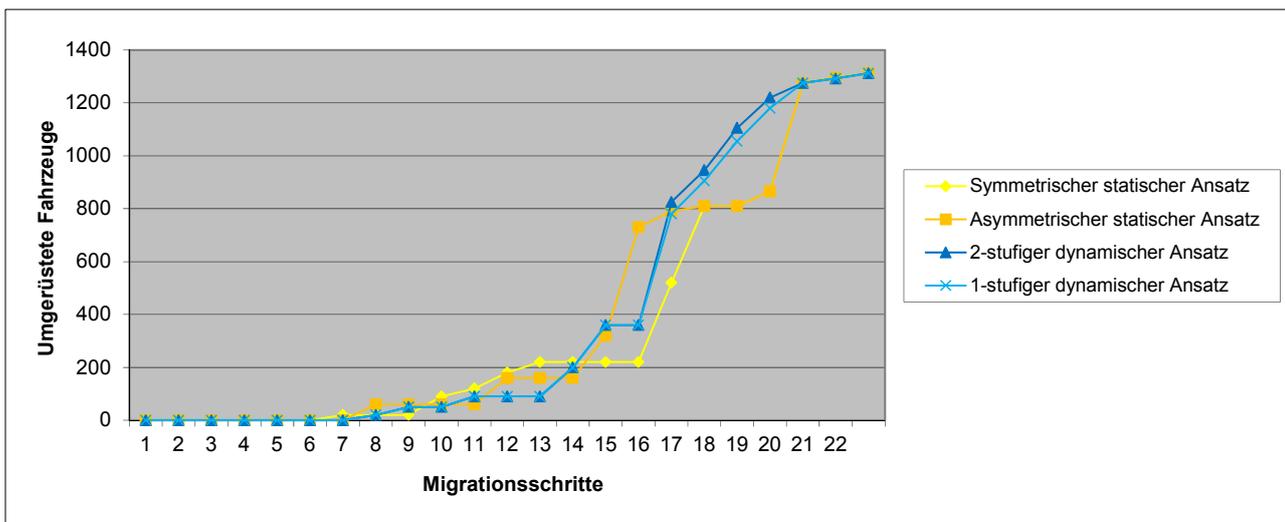


Abbildung 65: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei hoher kritischer Masse, Netz

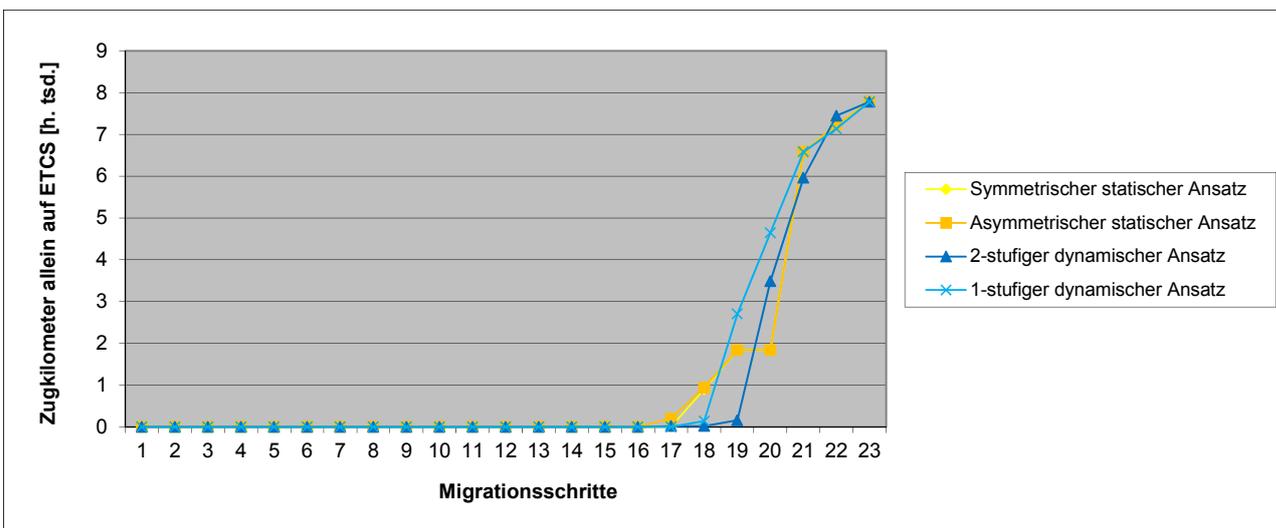


Abbildung 66: Verlauf der Zugkilometer allein auf ETCS bei hoher kritischer Masse, Korridor

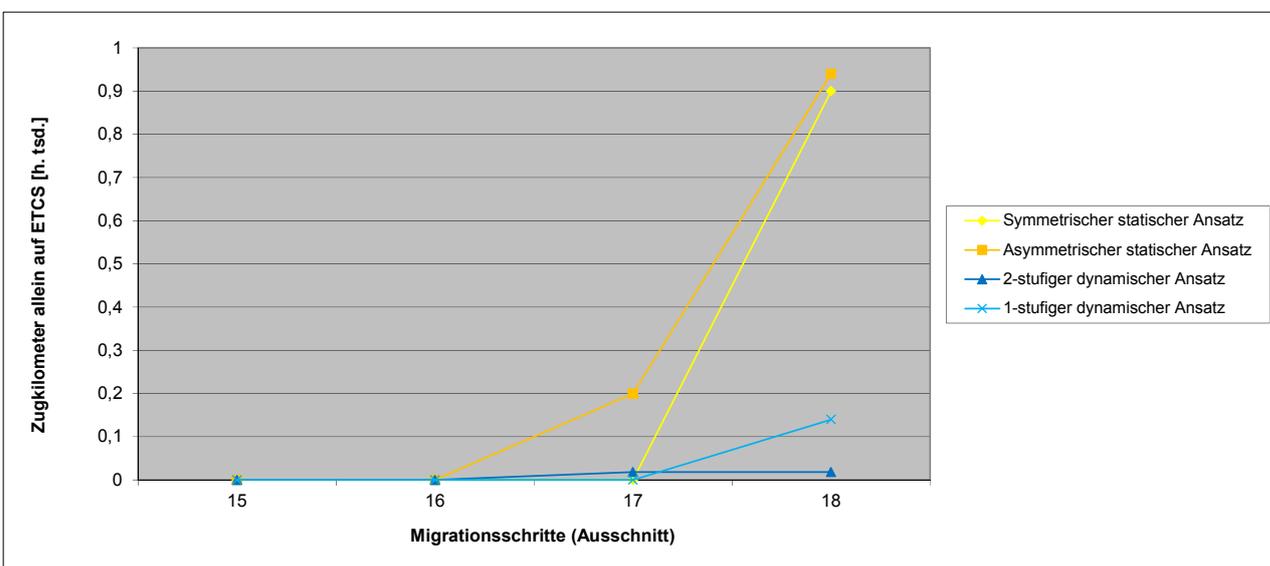


Abbildung 67: Ausschnitt des Verlaufs der Zugkilometer allein auf ETCS bei hoher kritischer Masse, Korridor

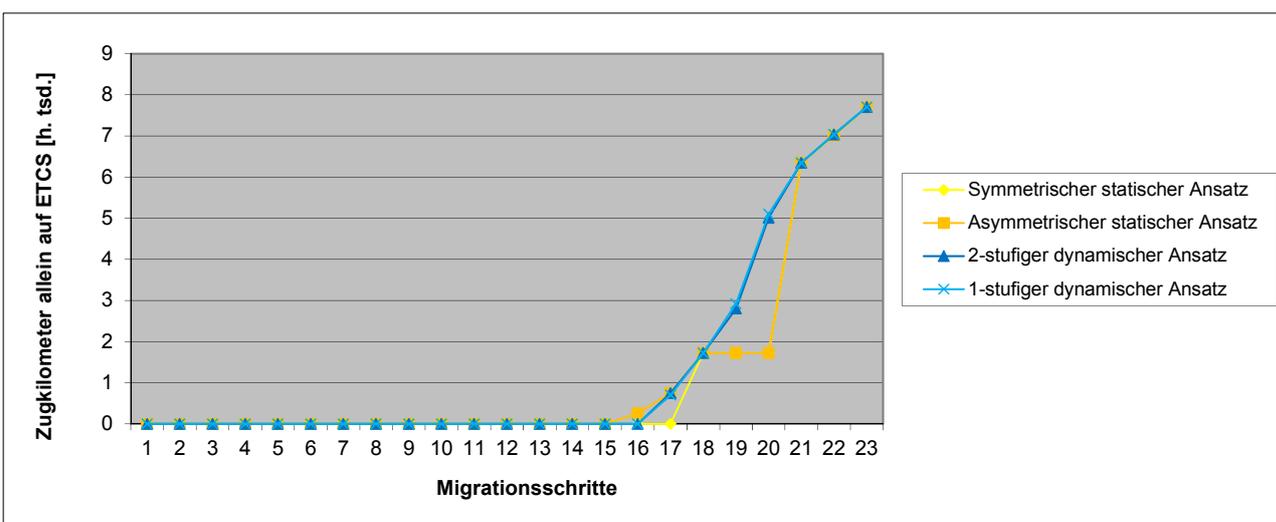


Abbildung 68: Verlauf der Zugkilometer allein auf ETCS bei hoher kritischer Masse, Netz

5.3.3 Differenzierte kritische Masse

Das nun vorgestellte Szenario der differenzierten kritischen Massen zur Fahrzeugumrüstung entspricht am ehesten einem realistischen Beispiel. Während der 2-stufige dynamische Ansatz bei den vorangegangenen Szenarien nicht in allen Fällen die besten Optimierungsergebnisse liefern konnte, zeigt Abbildung 69 für den Korridor für das Netz die Stärken dieses Ansatzes.

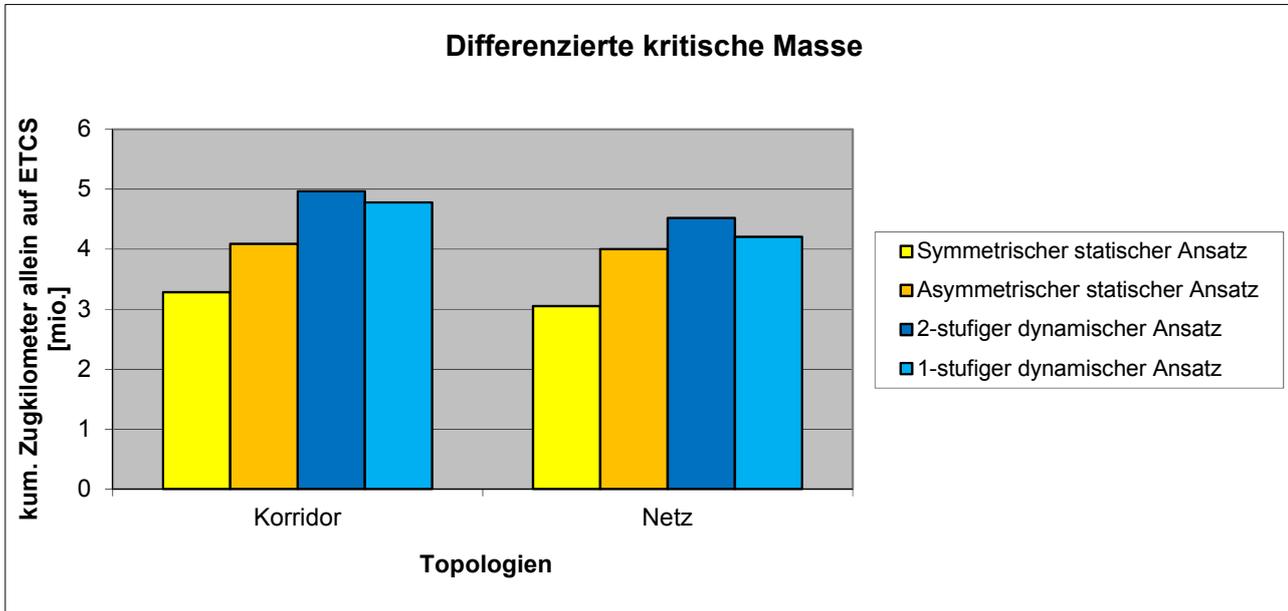


Abbildung 69: Bewertung der Algorithmen bei differenzierten kritischen Massen, Korridor

Für beide Topologien sind die auf dem 2-stufigen dynamischen Ansatz basierenden Strategien am höchsten bewertet. Jeweils folgen der 1-stufige dynamische Ansatz und der asymmetrische statische Ansatz. Der symmetrische Ansatz erhält die niedrigsten Bewertungen.

Die Fahrzeugumrüstung bei der Migration des Korridors verläuft für die dynamischen Ansätze und den asymmetrischen Ansatz sehr ähnlich, wie in Abbildung 70 abgelesen werden kann. Die Unterschiede in der Bewertung sind hieraus noch nicht ersichtlich. Aus Abbildung 71 geht hervor, dass die Fahrzeugumrüstung für die Migration des Netzes für den asymmetrischen Ansatz zeitweise sogar deutlich über der der dynamischen Ansätze liegt. Dieser Fakt allein sorgt jedoch anscheinend nicht für einen größeren Migrationserfolg.

Abbildung 72 und Abbildung 73 stellen die Verläufe der allein mit ETCS ausgerüsteten Streckenkilometer für den Korridor und das Netz dar. Es fällt eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den jeweils dynamischen und den jeweils statischen Ansätzen auf. Anders als bei einigen der vorangegangenen Szenarien läuft der 2-stufige dynamische Ansatz mit seinen zwei angewendeten Optimierungskriterien nicht in ein lokales Minimum.

Es ist mit dem 2-stufigen dynamischen Ansatz also möglich, sowohl kurzfristig die allein auf ETCS gefahrene Strecke zu maximieren und gleichzeitig eine auch für den späteren Migrationsverlauf sinnvolle Wahl der umzurüstenden Abschnitte zu treffen. Die Verkehre mit tendenziell niedrigen kritischen Massen zur Fahrzeugumrüstung können anscheinend so in die Strategie integriert werden, dass sie für eine frühzeitige und stetig steigende Zahl von allein mit ETCS befahrenen Streckenkilometer sorgen. Der Vergleich zum asymmetrischen Ansatz

hat gezeigt, dass eine reine Beschleunigung der Fahrzeugumrüstung nicht zu einem besseren Ergebnis führt.

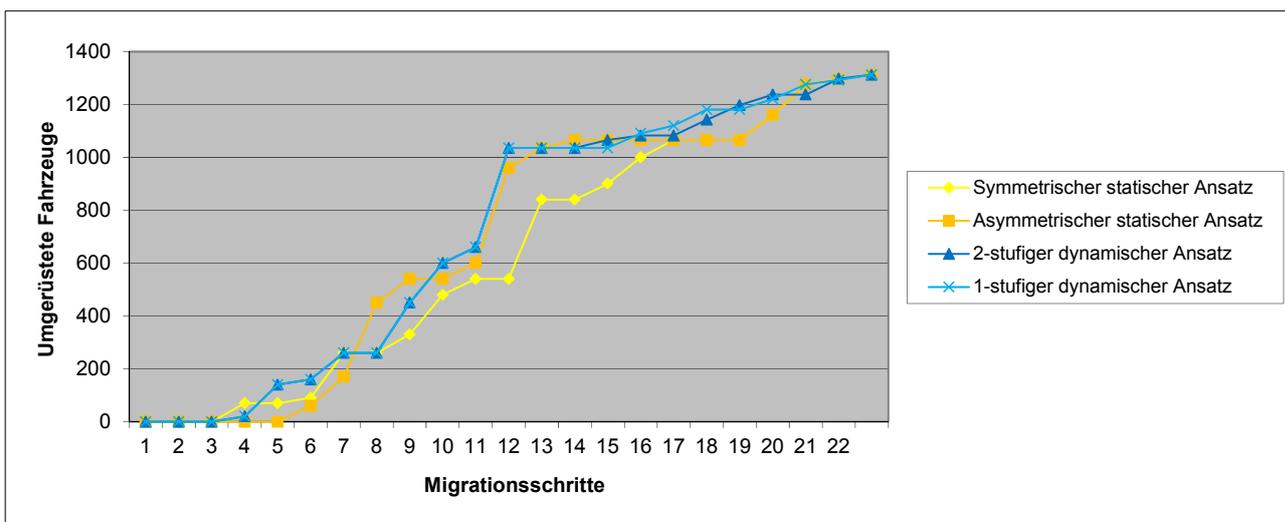


Abbildung 70: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei differenzierter kritischer Masse, Korridor

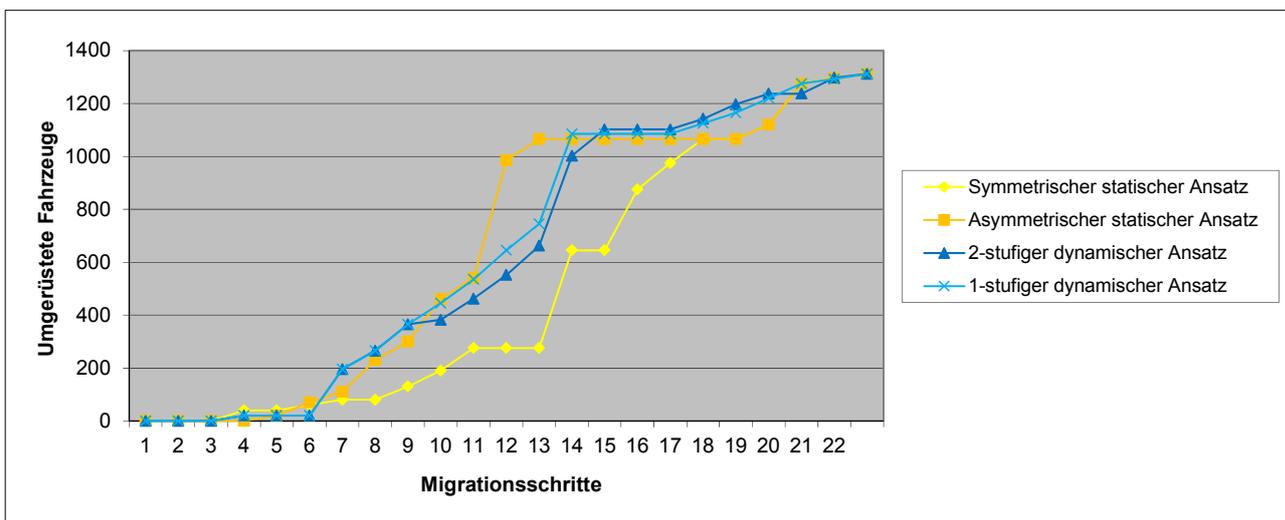


Abbildung 71: Verlauf der Fahrzeugumrüstung bei differenzierter kritischer Masse, Netz

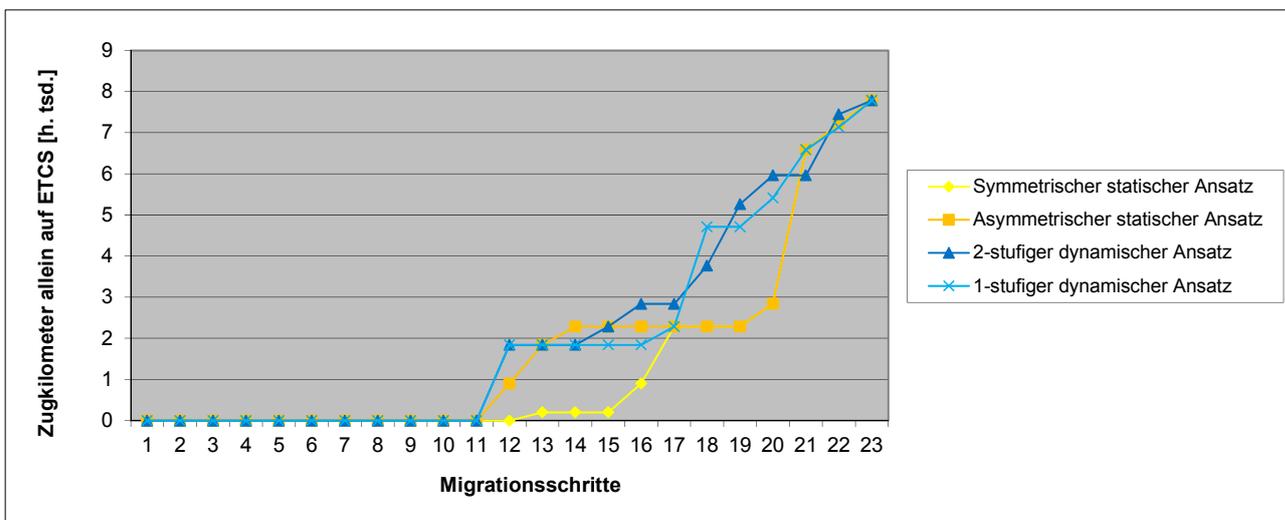


Abbildung 72: Verlauf der Zugkilometer allein auf ETCS bei differenzierter kritischer Masse, Korridor

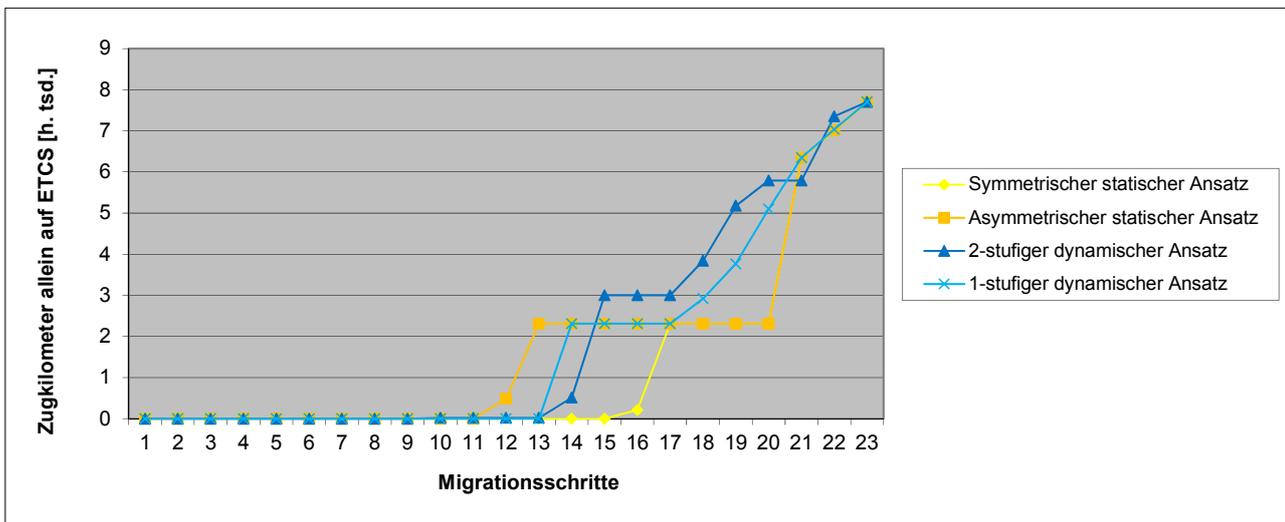


Abbildung 73: Verlauf der Zugkilometer allein auf ETCS bei differenzierter kritischer Masse, Netz

5.3.4 Diskussion der Ergebnisse zur Optimierung der Migrationsrangfolge

Die Ergebnisse der zuvor aufgestellten und optimierten Szenarien werden in diesem Abschnitt gegenübergestellt. Daraus wird ein Rückschluss über geeignete Anwendungsfälle der jeweiligen Ansätze gezogen. Die Validierung der Ansätze zur optimierten Wahl der Umrüstereihenfolge von Streckenabschnitten wird damit abgeschlossen. Auf dem Ergebnis aufbauend wird im Weiteren eine Kostenminimierung durchgeführt.

Die unten stehende Tabelle 11 stellt die Ansätze mit den jeweils besten Ergebnissen für die berechneten Szenarien dar. Demnach scheint die Wahl des Ansatzes basierend auf der vorzufindenden kritischen Masse sinnvoll zu sein. Jeder kritischen Masse kann ein individueller Ansatz zugewiesen werden, unabhängig von der Netztopologie. Die Topologie hat in den vorangegangenen Abschnitten jedoch einen starken Einfluss auf die Ergebnisse gehabt. Außerdem wird eine einfache Klassifizierung eines real vorhandenen Schienenverkehrsnetzes anhand der Szenarien der kritischen Massen nicht immer möglich sein. Eine weitere Aufschlüsselung und eingehende Untersuchung ist deswegen notwendig.

Kritische Masse	Bestes Ergebnis für	
	Korridor	Netz
Niedrig	Statischer Ansatz, asymmetrisch	Statischer Ansatz, asymmetrisch
Hoch	1-stufiger dynamischer Ansatz	1-stufiger dynamischer Ansatz
Differenziert	2-stufiger dynamischer Ansatz	2-stufiger dynamischer Ansatz

Tabelle 11: Höchstbewertete Optimierungsansätze für die Szenarien

Um eine generelle Aussage über die Eignung eines Ansatzes für die Optimierung der Migration eines beliebigen Netzwerks zu treffen, scheint eine Gegenüberstellung der besten, schlechtesten und im Mittelwert erreichte Ergebnisse für jeden Ansatz sinnvoll. Die geschieht in Abbildung 74. Hier scheint insgesamt der 1-stufige dynamische Ansatz am erfolgreichsten. Es werden insgesamt der höchste Mittelwert und im Vergleich zu den anderen Ansätzen maximale Wert für das Minimum erreicht.

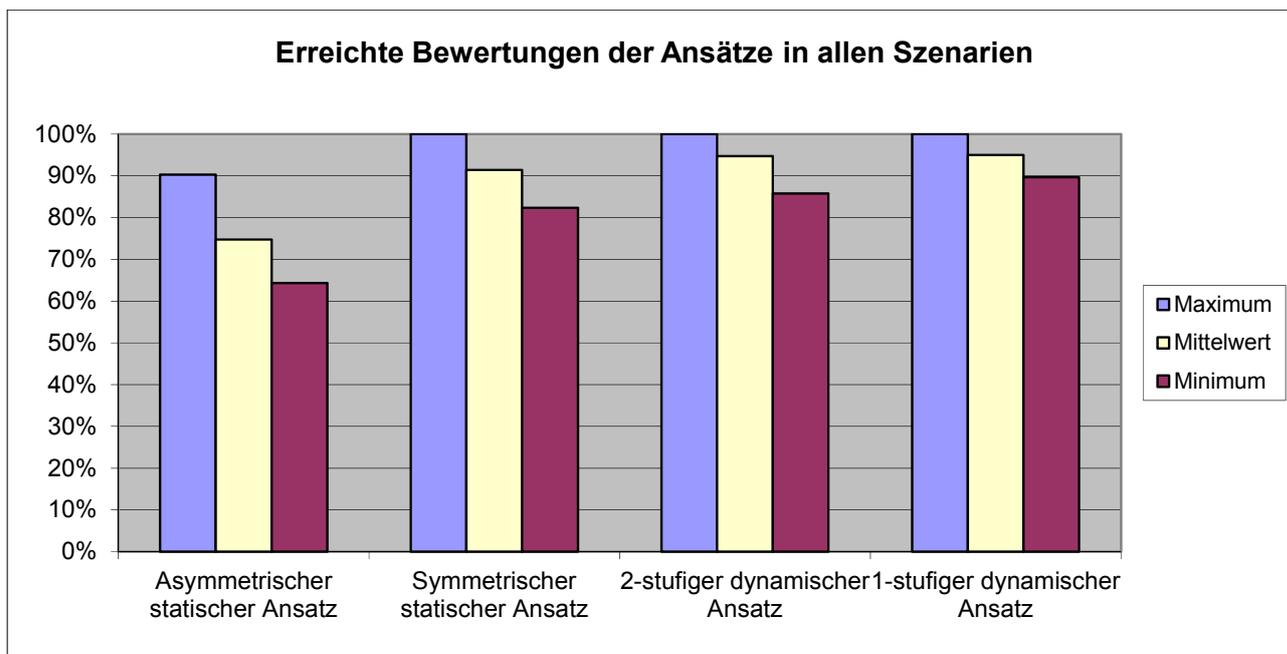


Abbildung 74: Vergleich der Optimierungsergebnisse der Algorithmen, gesamt

Wie unterschiedlich die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Topologie und der kritischen Masse ausfallen zeigt Abbildung 75. Darin sind die maximal erreichten Bewertungen der Szenarien gegenübergestellt. Dabei wird für das Netz nur bei dem Szenario der hohen kritischen Masse eine höhere Bewertung erreicht als beim Korridor. Daraus kann geschlossen werden, dass es schwieriger ist für ein Netz eine effektive Migrationsstrategie zu finden, als für einen Korridor. Außerdem scheint eine Erhöhung der kritischen Massen einen größeren Einfluss auf die Strategie zur Migration eines Korridors zu haben. Dies liegt in der Topologie des Korridors begründet, die eine geringere verkehrliche Verknüpfung der Abschnitte zur Folge hat. Aufgrund der gezeigten unterschiedlichen Charakteristiken scheint es sinnvoll, die Ansätze hinsichtlich ihrer Effektivität bezogen auf die unterschiedlichen Topologien zu untersuchen.

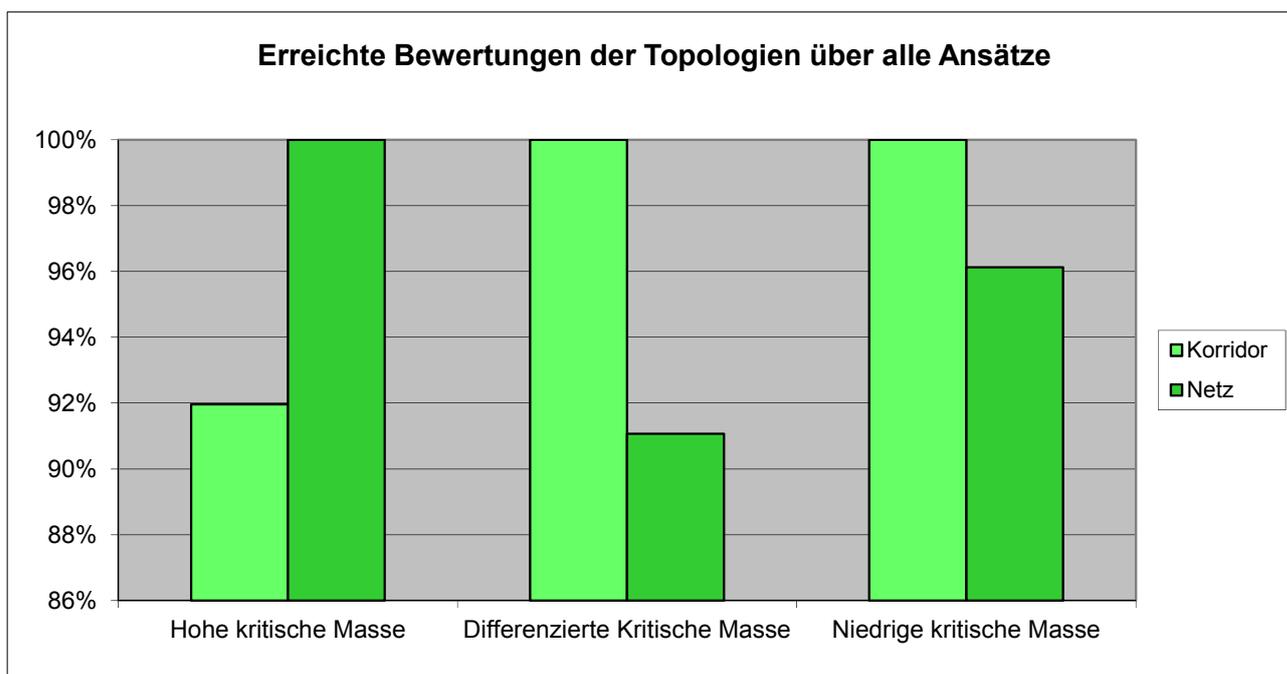


Abbildung 75: Vergleich der Ergebnisse für Korridor und Netz

Werden die maximal, minimal und im Durchschnitt erreichten Bewertungen der Ansätze für den Korridor wie in Abbildung 76 dargestellt untersucht, stellt sich ein ähnliches Ergebnis wie beim Vergleich aller Szenarien in Abbildung 74. Der 1-stufige dynamische Ansatz liefert das beste Ergebnis. Hervorzuheben ist, dass der 2-stufige dynamische Ansatz trotz der schlechten Ergebnisse bei der Optimierung eines Korridors mit hoher kritischer Masse eine insgesamt bessere Bewertung erhält als der Ansatz der asymmetrischen Verknüpfung.

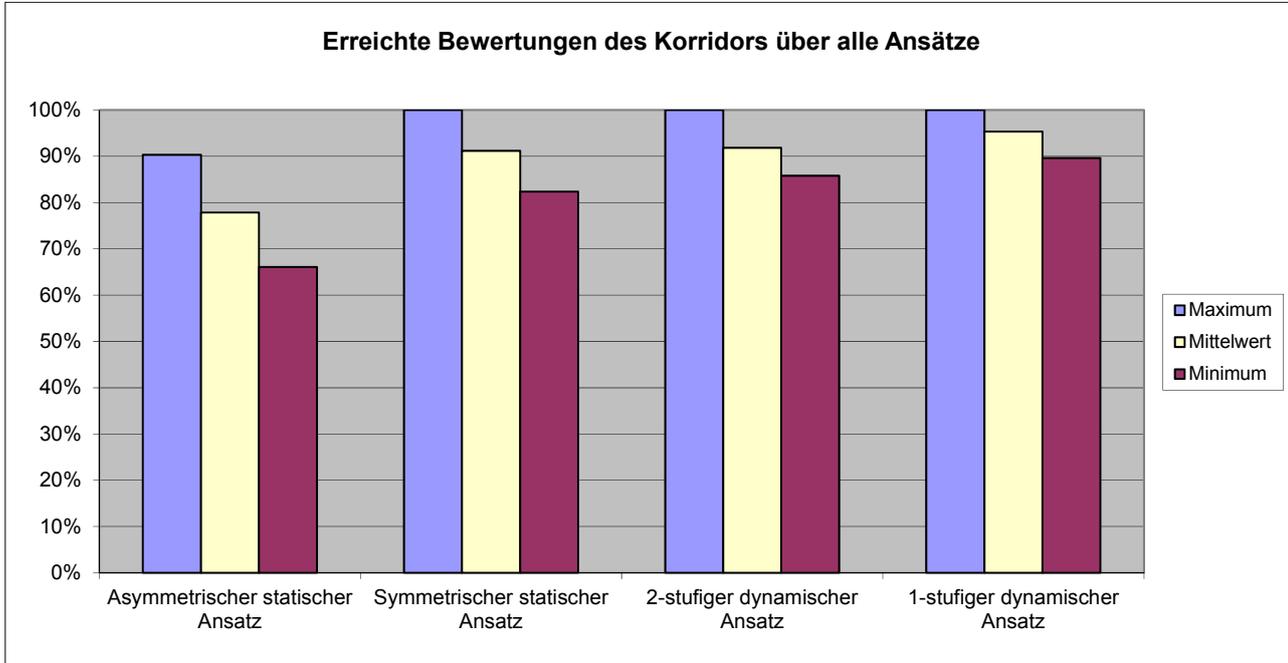


Abbildung 76: Vergleich der Optimierungsergebnisse, Korridor

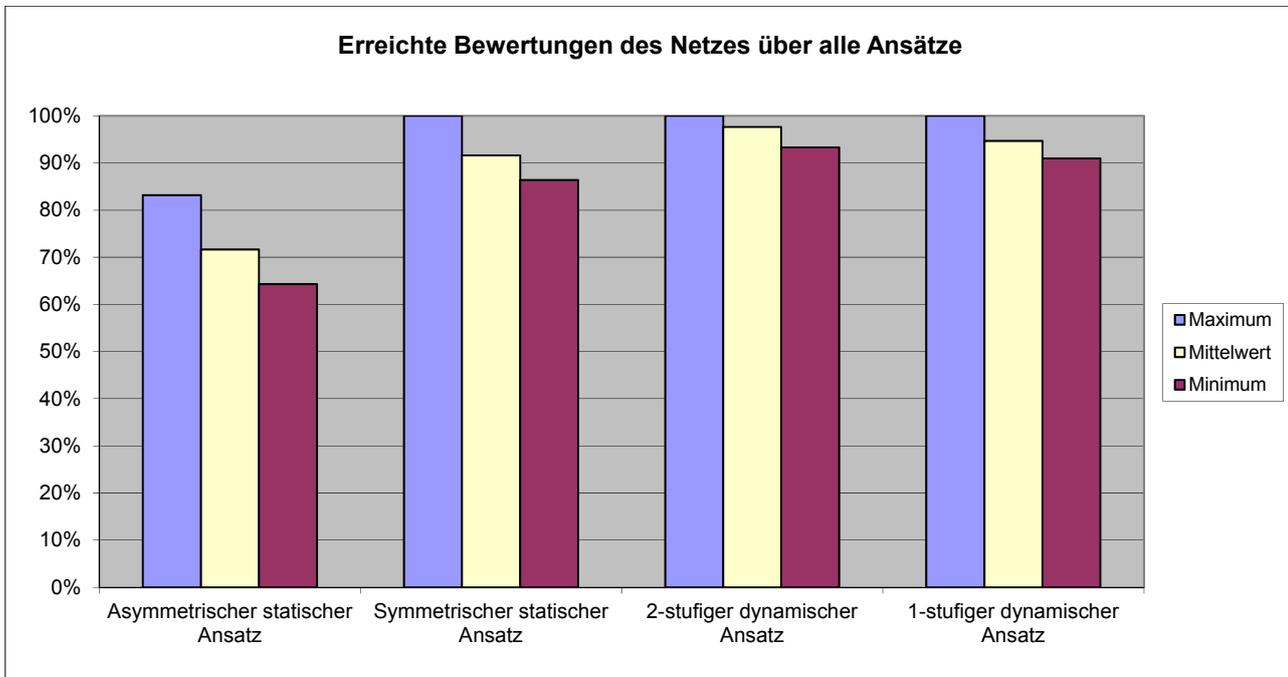


Abbildung 77: Vergleich der Optimierungsergebnisse, Netz

Werden die Ergebnisse der Szenarien des Netzes betrachtet, ergibt sich nach Abbildung 77 eine andere Präferenzordnung für die Optimierungsansätze, als für den Korridor oder die Ge-

samtbeachtung. Der 2-stufige dynamische Ansatz liefert hier den im Vergleich höchsten Mittel- und Minimalwert.

Dass es sich bei dem 2-stufigen dynamischen Ansatz um einen an die Gegebenheiten in einem Netzwerk sehr gut angepassten Ansatz handelt, wird auch in Abbildung 78 deutlich. Darin sind die Differenzen zwischen der für einen Ansatz maximal und minimal erreichten Bewertung jeweils gesamt, für den Korridor und das Netz gezeigt.

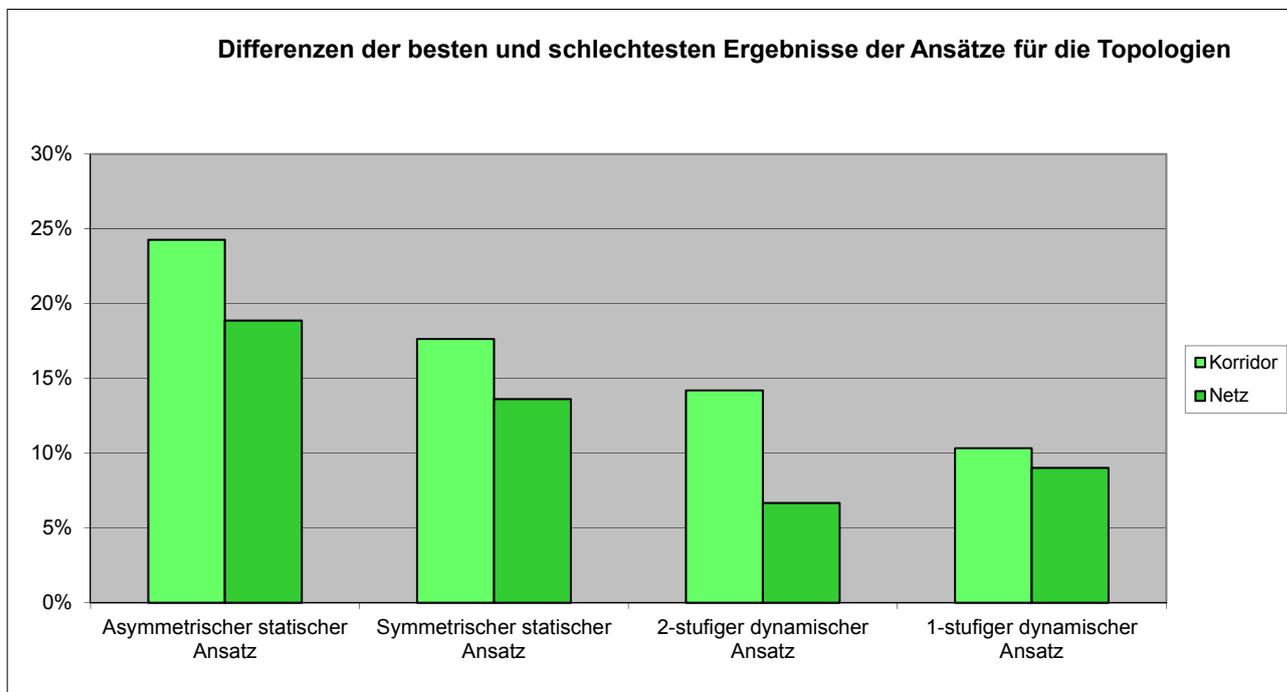


Abbildung 78: Schwankung der Ergebnislänge der Algorithmen

Der 2-stufige dynamische Ansatz erreicht für die Optimierung des Netzes die geringste Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert. Allerdings liegt der Wert für die Optimierung eines Korridors mehr als Doppelt so hoch. Wie bereits vermutet, kann der 2-stufige dynamische Ansatz sehr gut für Topologien mit einer hohen verkehrlichen Verknüpfung zwischen den Streckenabschnitten verwendet werden. Der 1-stufige dynamische Ansatz zeigt sich hingegen sehr robust gegenüber unterschiedlichen Topologien. Die Differenzen sind sowohl für das Netz als auch für den Korridor gering und liegen dicht beieinander. Für einen Korridor stellt er den besten Ansatz dar und kann darüber hinaus als ein gut allgemein zu verwendender Ansatz bezeichnet werden. Die statischen Ansätze können in der topologiebezogenen Bilanz gegenüber den dynamischen Ansätzen nicht bestehen. Sie finden bei einzelnen eingegrenzten Szenarien zwar ein Optimum gegenüber den dynamischen Ansätzen, sind jedoch in ihrer Natur nicht in der Lage auf unterschiedliche Ausgangssituationen bei den kritischen Massen für die Fahrzeugausrüstung zu reagieren.

Damit ist das Fallbeispiel zur Optimierung der Migrationsrangfolge und zur Nutzenmaximierung abgeschlossen. Es wurden verschiedene Szenarien generiert, an denen die vorgestellten Optimierungsansätze validiert und gegenübergestellt wurden. Es konnten Aussagen über geeignete Anwendungsgebiete der Ansätze getroffen werden. Generell entsprachen die Ergebnisse den Erwartungen. Einschränkend muss gesagt werden, dass es sich bei dem formulierten 2-stufigen dynamischen Ansatz in erster Linie um ein Instrument zur Optimierung von

Migrationen in Netzwerken handelt. Robuste Ergebnisse unabhängig von der Topologie sind bei Verwendung des 1-stufigen dynamischen Ansatzes zu erwarten.

Für die Optimierung eines Migrationsprojekts wird nach der Nutzenmaximierung eine kostenminimale Umsetzung der Strategie gesucht. Um dies im Folgenden zu demonstrieren, wird die Kostenminimierung auf Basis der hier für das Netz mit differenzierten kritischen Massen gefundenen optimalen Strategie durchgeführt.

5.4 Optimierung der Migrationspfade und –ziele unter Einbeziehung von zeitlichen Planungsvorgaben

In diesem Abschnitt werden das Vorgehen zur Ermittlung der optimalen Migrationspfade und die jeweiligen Ergebnisse dargestellt. Damit werden die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Ergebnisse der optimierten Migrationsreihenfolge weitergeführt. Wurde dabei noch von abstrakten Migrationsschritten, ohne Zuordnung einer realen Zeitskala, ausgegangen, können nun tatsächliche Zeitverläufe ermittelt werden. Das Ergebnis ist ein grober Projektplan, mit dem das Migrationsvorhaben mit minimalen Kosten auf Basis einer maximierten Nutzengenerierung durchgeführt werden kann. Darin sind alle Erkenntnisse aus den zuvor durchgeführten Schritten der Anforderungsanalyse, Systemmodellierung und Nutzenmaximierung enthalten. Die Erarbeitung der optimalen Migrationsstrategie wird durch diesen Schritt abgeschlossen. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang A.4 zu finden.

5.4.1 Umsetzung der Optimierung

Für die Durchführung des Fallbeispiels wird auf die gefundene nutzenmaximale Umrüstereihenfolge für das modellierte Streckennetz mit differenzierter kritischer Masse zurückgegriffen. Es werden dabei alle Elemente dieses Verkehrsnetzes, d.h. die einzelnen Verkehre und Streckenabschnitte, wie in Abschnitt 5.2 dargestellt berücksichtigt. Die objektorientierte Umsetzung wurde in Abschnitt 4.4 dargestellt.

Für das hier vorliegende Fallbeispiel wird das Migrationsziel auf ETCS Level 2 festgelegt, da auf allen Abschnitten auch Hochgeschwindigkeitsverkehr stattfindet, wie bereits in Tabelle 6 und Tabelle 7 in Abschnitt 5.2 zur Modellierung des Fallbeispiels dargestellt. Außerdem soll das bestehende Klasse B System vollständig abgelöst werden, es handelt sich also um eine vollständige Migration. Da hier davon ausgegangen wird, dass sich die Fahrzeugausrüstung mittels der zugewiesenen kritischen Masse an dem Stand der Streckenausrüstung orientiert, kann die fahrzeugseitige Doppelausrüstung als Basismigrationspfad ausgeschlossen werden. Diese Basisstrategie würde bedeuten, dass die Migration von der Fahrzeugseite getrieben wird und für den betreffenden Verkehr eine kritische Masse von null gilt. Eine gleichzeitige Ausrüstung von Fahrzeugen mit Klasse B und Klasse A Systemen wird trotzdem häufig anzutreffen sein, da die kritischen Massen des streckenseitigen Ausrüstungsstandes kleiner eins sind. Wäre einem Verkehr eine kritische Masse gleich eins zugewiesen worden, wäre eine fahrzeugseitige Parallelausrüstung nicht erlaubt.

Die bereits ermittelte Reihenfolge der Ausrüstung der Streckenabschnitte wird für das Fallbeispiel rein sequentiell abgearbeitet. Abhängig von den vorhandenen Ressourcen kann für die Untersuchung eines realen Beispiels auch eine Parallelisierung von Ausrüstvorgängen ange-

nommen werden. Dies könnte der Fall sein, wenn sich Abschnitte in Regionen befinden, zwischen deren Ressourcen keine Abhängigkeiten bestehen. Dieser Fall soll hier nicht beachtet werden. Ist für einen Verkehr die kritische Masse an umgerüsteten Streckenkilometern erreicht, beginnt die Ausrüstung der entsprechenden Fahrzeuge. Für sie ist festgelegt, wie viele Fahrzeuge pro Jahr umgerüstet werden können. Im Fallbeispiel werden die Fahrzeugumrüstungen als voneinander unabhängig betrachtet, sie verlaufen also auch parallel zueinander. Sind alle einem Streckenabschnitt zugeordneten Verkehre umgerüstet, können dort alle vorhandenen Klasse B Systeme außer Betrieb genommen bzw. zurückgebaut werden.

Die unterschiedlichen Strategien bzw. der strategische Handlungsspielraum ergibt sich jetzt aus den für jeden Streckenabschnitt zur Verfügung stehenden Migrationspfaden. Da die fahrzeugseitige Doppelausrüstung als Basisstrategie ausgeschlossen ist, besteht für jeden Abschnitt die Möglichkeit, die zugeordneten Verkehre gleichzeitig mit dem streckenseitigen Beginn zur Umrüstung aufzufordern oder dies nach Abschluss der Umrüstung zu tun. Diese Optionen werden permutativ für alle Abschnitte generiert. Es ergeben sich jeweils unterschiedliche Startzeitpunkte für die fahrzeugseitigen Ausrüstungen und die Außerbetriebsetzungen der Klasse B Systeme auf den Strecken.

Insgesamt ergeben sich 8.388.608 mögliche Strategien, von denen 89 unterscheidbare Ergebnisse liefern. Diese setzen sich aus 1.000 unterschiedlichen Migrationszuständen zusammen. Die tatsächlich entstehenden 89 Strategien sind unter Umständen noch manuell behandelbar. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass sie aus einer Masse von über 8 Mio. möglichen Strategien hervorgegangen sind. Dabei ist die Menge an Optionen, die auf nicht automatisierte Weise untersucht werden kann, klar überschritten. Hier zeigt sich wieder die Notwendigkeit der konsequenten Formalisierung und Automatisierung, die der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz verfolgt.

Eine Optimierung jeder einzelner dieser Strategien kann entlang des jeweils kritischen Pfades geschehen. Dazu werden alle Aktivitäten, die nicht auf dem kritischen Pfad liegen zeitlich so weit nach hinten geschoben, bis eine weitere Verschiebung eine Verlängerung der Projektlaufzeit nach sich ziehen würde. Dabei bleiben alle technischen Randbedingungen für die Aufrechterhaltung des laufenden Betriebs unangetastet, die Reihenfolge von Aktivitäten wird nicht geändert. Die damit vorliegenden Optimierungsergebnisse werden im folgenden Abschnitt gegenübergestellt und interpretiert.

5.4.2 Optimierungsergebnisse

Der vorangegangene Abschnitt stellte dar, wie auf Basis einer erfolgten Nutzenmaximierung eine Optimierung der Migrationspfade und -ziele umgesetzt werden kann. Darauf aufbauend, werden nun die Optimierungsergebnisse diskutiert. Dabei wird eine Aussage über die Interessen der einzelnen Akteure und die wahrscheinlich umgesetzte Strategie getroffen. Nach der vorangegangenen Wahl der nutzenmaximalen Migrationsreihenfolge liegt auch deren kostenminimale Umsetzung vor. Die Migrationsstrategie ist also gewählt. Damit wird die Validierung des entwickelten Ansatzes abgeschlossen. Im anschließenden Abschnitt wird das Fallbeispiel noch einmal zusammengefasst.

Die Bewertung der generierten Strategien geschieht anhand des Kapitalwerts und der Migrationskosten. Vereinfachend wird in diesem Fallbeispiel angenommen, dass sich durch die Einführung von ETCS keine Änderungen auf der Einnahmeseite ergeben. Eventuell zusätzlich generierte Verkehre, bspw. aufgrund einer gestiegenen Nachfrage durch kürzere Fahrzeiten oder eine gesteigerte Zuverlässigkeit, bleiben unberücksichtigt. Dementsprechend liegen für die Berechnung des Kapitalwerts nur Einzahlungen, keine Auszahlungen vor. Aus den generierten Strategien wird diejenige als optimal ausgewählt, die bei minimalen Einzahlungen die minimalen Migrationskosten verursacht.

Um das Optimierungspotenzial dieser Methode hervorzuheben, werden zwei Referenzstrategien generiert und bewertet. Dabei handelt es sich um die durchgehende Anwendung jeweils einer der beiden Basisstrategien. Es werden dabei also für jeden Abschnitt immer entweder die streckenseitige Doppelausrüstung oder die parallele Doppelausrüstung von Fahrzeug- und Streckenseite gewählt. Außerdem soll der Einfluss der Optimierung entlang des kritischen Pfades dargestellt werden.

Strategie	Parallele fahrzeug- und streckenseitige Doppelausrüstung		Streckenseitige Doppelausrüstung		Optimum aus Permutation streckenseitiger und paralleler Doppelausrüstung	
	Kostenvergleich	Kritischer Pfad	Kostenvergleich	Kritischer Pfad	Kostenvergleich	Kritischer Pfad
Optimierungsmethode						
Einzahlungen gesamt €	205.423.139	204.666.559	184.537.502	183.091.182	165.464.395	164.112.383
Migrationskosten gesamt €	265.420.330	264.380.033	244.703.799	242.826.302	216.954.355	215.200.931

Tabelle 12: Ergebnisse der optimierten Migrationspfade

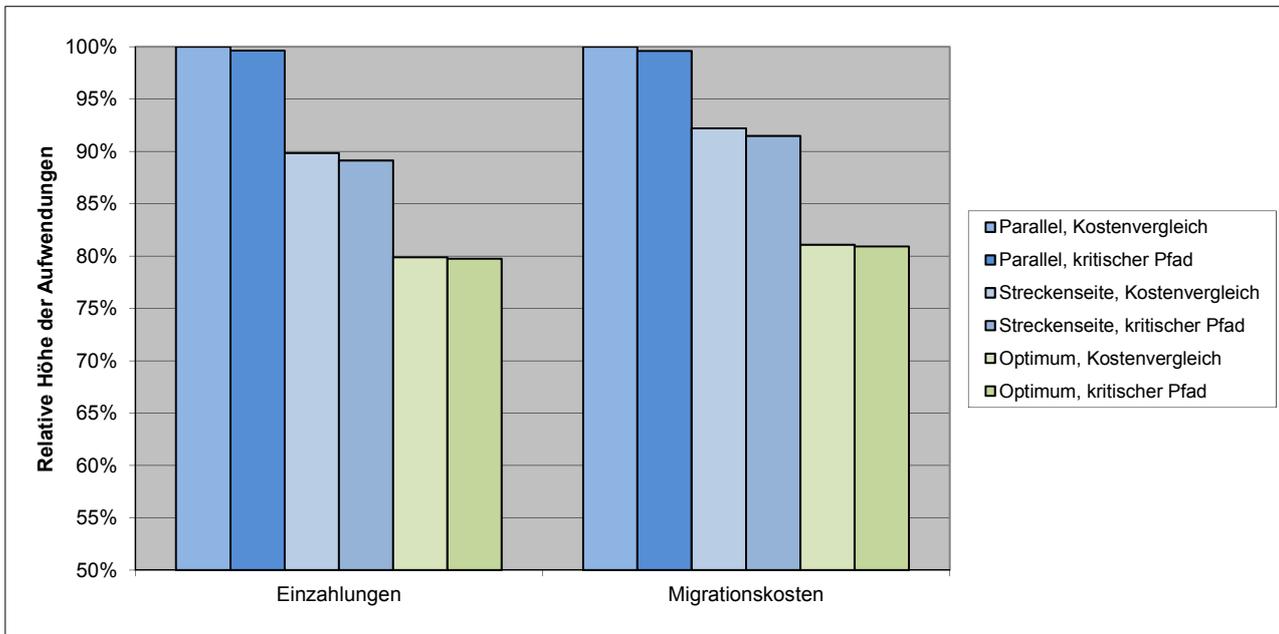


Abbildung 79: Ergebnisvergleich der optimierten Migrationspfade

In Tabelle 12 und Abbildung 79 werden die Resultate der nach einem übergreifenden Optimum für Fahrzeug- und Infrastrukturseite optimierten Migrationspfade dargestellt. Dabei ist eine deutliche Überlegenheit der durch die Generierung des gesamten strategischen Hand-

lungsraums gefundenen Strategie zu erkennen. Gegenüber der reinen Parallelausrüstung bzw. der reinen streckenseitigen Erstausrüstung ergibt sich ein um ca. 20% bzw. ca. 10% verbessertes Ergebnis. Verhältnismäßig gering sind dagegen die Auswirkungen der Optimierung entlang des kritischen Pfades. Die Ergebnisse verbessern sich jeweils um ca. 1%.

Bei einer detaillierteren Gegenüberstellung der resultierenden Streckenausrüstungen der Strategien in Abbildung 80 zeigt sich zunächst, dass sich der Verlauf der ETCS Level 2 Ausrüstung für alle Strategien gleicht. Sie ist durch die vorangegangenen Schritte der Optimierung der Migrationsrangfolge festgelegt. Unterschiede finden sich im Rückbau des Klasse B Systems. Auffällig ist, dass die beiden besser bewerteten Strategien einen späteren Rückbau vorsehen. Dies ist zunächst verwunderlich, da eine länger bestehende Parallelausrüstung von Klasse A und B System höhere Migrationskosten nach sich ziehen. Allein aus Betrachtung der Streckenseite lässt sich das Optimierungsergebnis also nicht erklären.

Wird jedoch die Fahrzeugausrüstung in Abbildung 81 mit einbezogen, wird deutlich, dass ein deutlich späterer und zunächst flacherer Verlauf der Anzahl ausgerüsteter Fahrzeuge bei den vorteilhafteren Strategien zu finden ist. Die fahrzeugseitige Migration wird gestaucht und zeitlich nach hinten verschoben. Da die Migration bei allen Strategien zum gleichen Zeitpunkt fertig gestellt ist, ist eine Minimierung der fahrzeugseitig vorhandenen Parallelausrüstungen die Folge. Gleichzeitig tritt durch den Zinseffekt eine Minimierung der zeitlich bewerteten Einzahlungen ein. Es zeigt sich auch der Einfluss der Optimierung entlang des kritischen Pfades auf die Strategien. An wenigen Stellen ist es möglich, Aktivitäten zeitlich nach hinten zu schieben und so ebenfalls den Zinseffekt zur Ergebnisverbesserung zu nutzen.

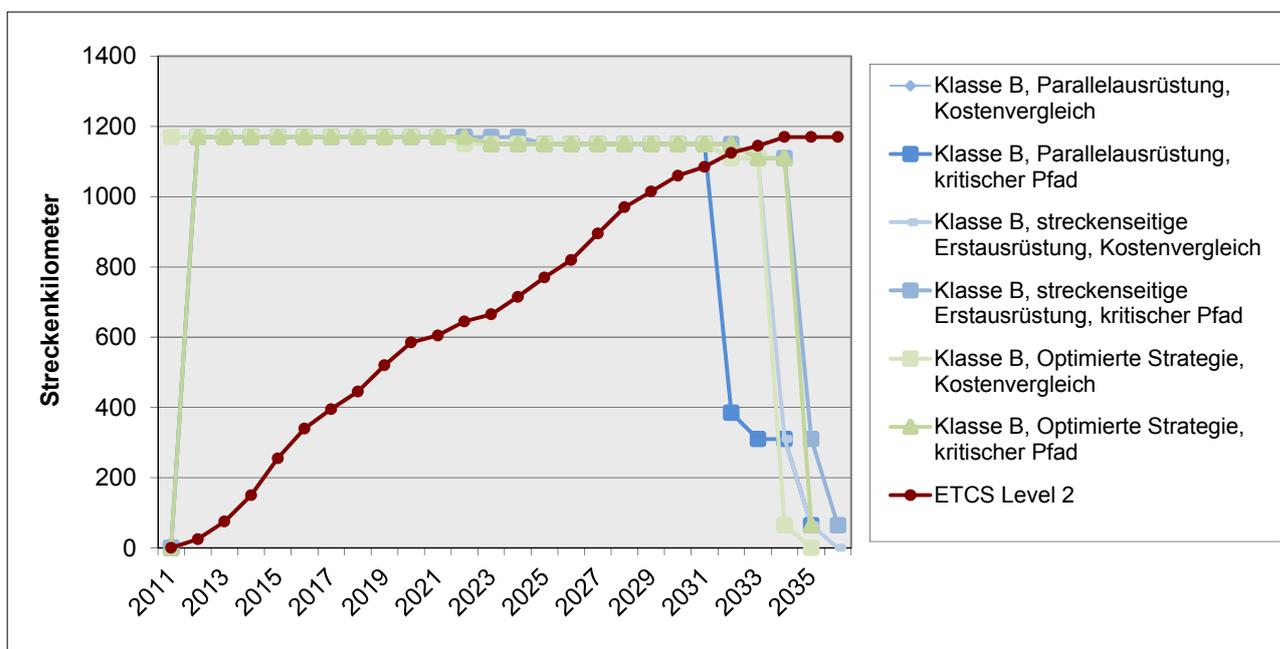


Abbildung 80: Gegenüberstellung der Streckenausrüstungen

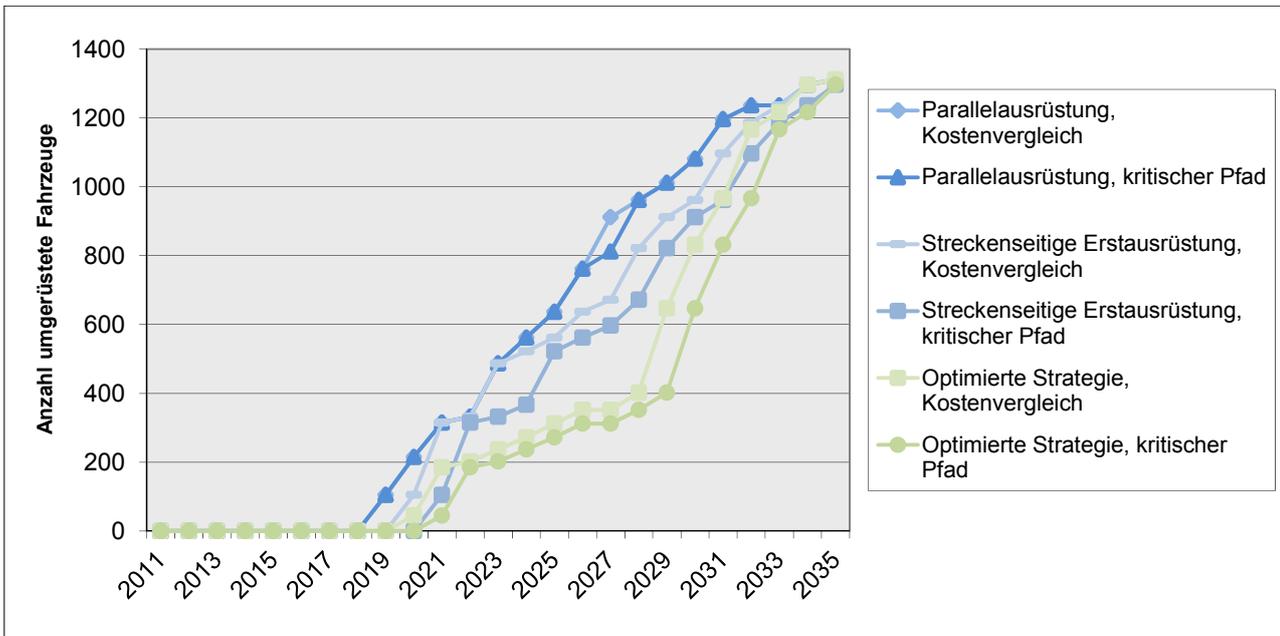


Abbildung 81: Gegenüberstellung der Fahrzeugausrüstungen

Wird eine global optimierte Strategie durchgeführt, wird dabei die Seite bevorteilt, die in absoluten Zahlen die größte Sensitivität auf eine Strategieänderung hat. Dies wird auch in Abbildung 82 deutlich. Die Änderungen der fahrzeugseitigen und streckenseitigen Migrationskosten gegenüber der global optimalen Strategie werden dargestellt. Insbesondere die fahrzeug- und streckenseitige Parallelausrüstung ist dabei interessant. Während für die Strecke eine Verminderung der Migrationskosten um 6,58 Mio. € gegenüber dem globalen Optimum erreicht wird, verschlechtert sich das Ergebnis der Fahrzeugseite um über 56 Mio. €.

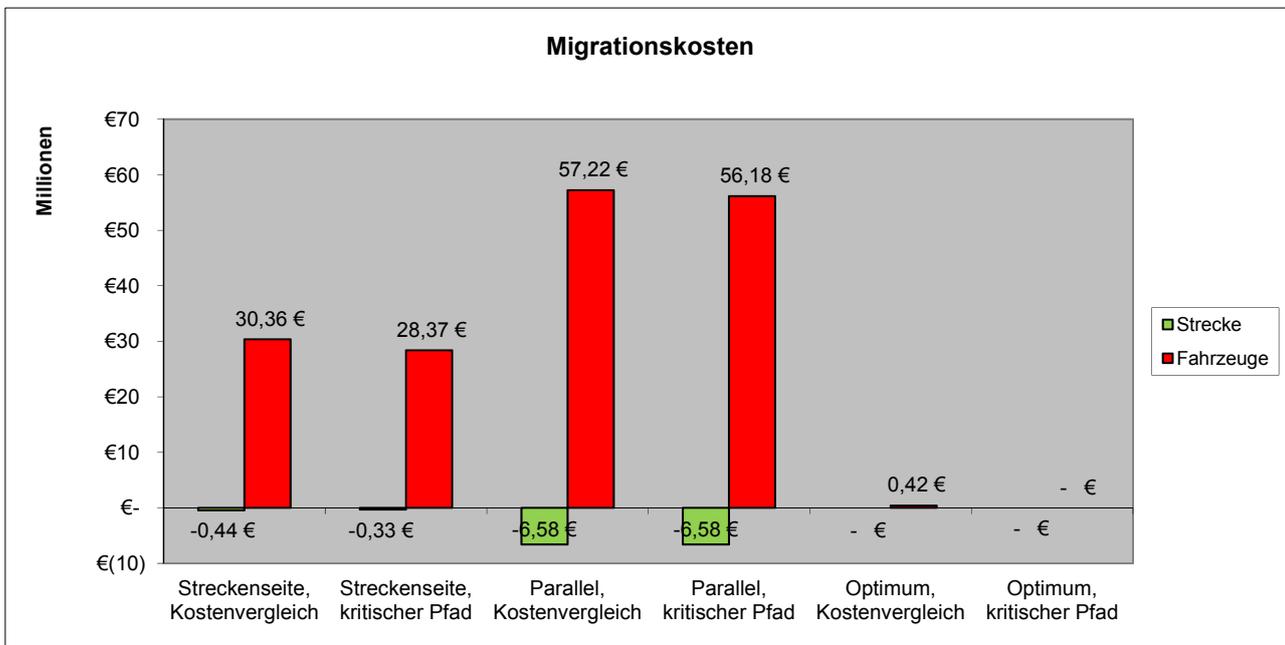


Abbildung 82: Einfluss der Strategieänderung auf die Migrationskosten der Parteien

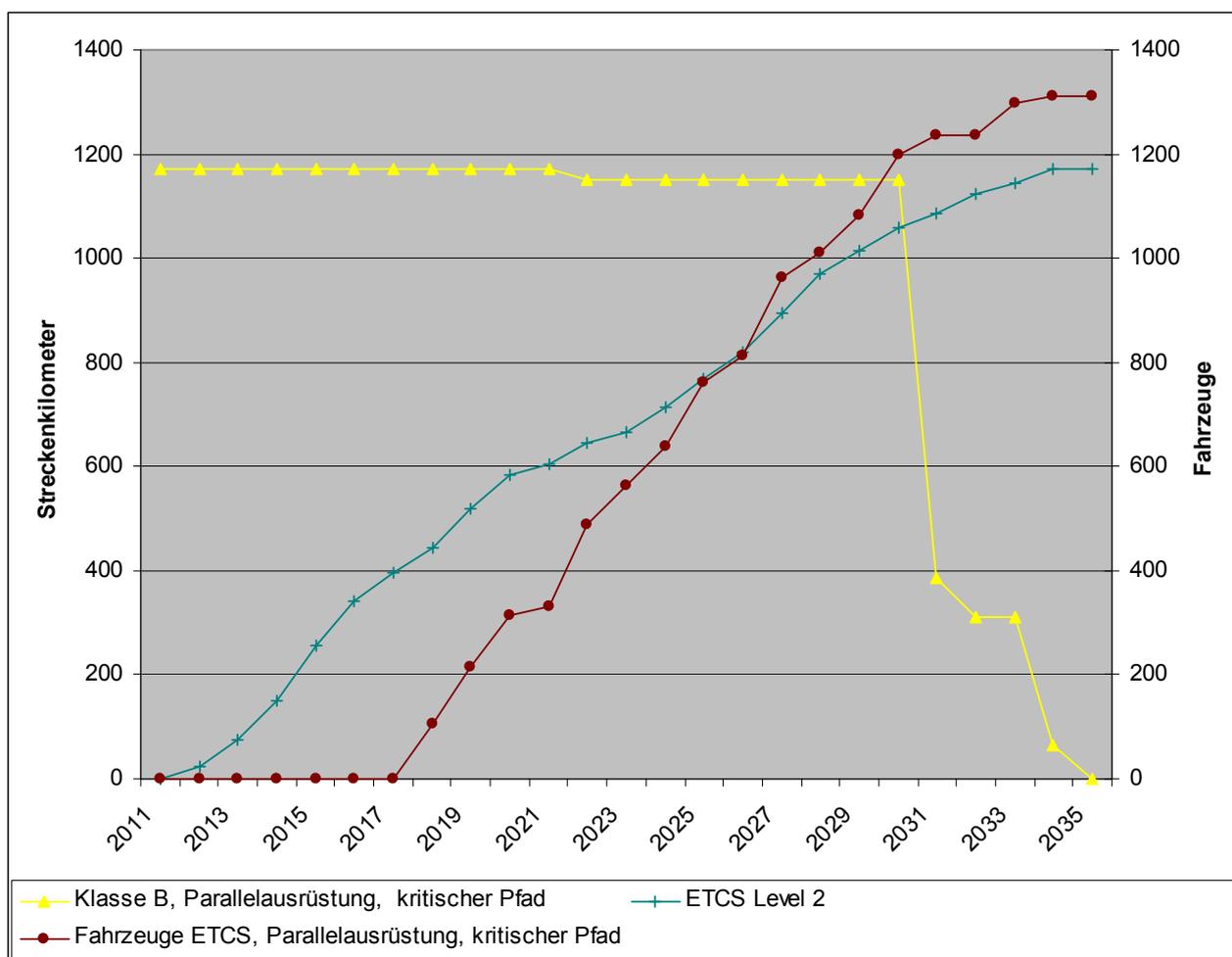


Abbildung 83: Von EIU favorisierte Migrationsstrategie, Parallelausrüstung, kritischer Pfad

Die Optimierungsziele der beteiligten Parteien, den EIU auf der einen und den EVU auf der anderen Seite, konkurrieren also. Dementsprechend können für die beiden Perspektiven unterschiedliche Strategien als Optimum angegeben werden. Während die Ausrüstung der Strecken festgelegt ist, hofft die Partei der Infrastrukturunternehmen auf eine schnelle Fahrzeugausrüstung. Dies entspricht der Strategie der reinen fahrzeug- und streckenseitigen Parallelausrüstung, optimiert entlang des kritischen Pfades, wie in Abbildung 83 dargestellt. Die frühzeitige Fahrzeugausrüstung sorgt für einen früher einsetzenden Rückbau des streckenseitigen Klasse B Systems und damit für streckenseitig minimierte Migrationskosten. Diese Strategie könnte durch die Definition entsprechender Netzzugangskriterien rechtlich bindend festgeschrieben werden.

Findet keine solche Änderung der Netzzugangskriterien statt, werden die EVU ihren strategischen Spielraum so weit wie möglich ausnutzen. Abbildung 84 zeigt die daraus resultierende Strategie, die eine spätere fahrzeugseitige ETCS-Ausrüstung vorsieht. Dementsprechend findet ein später Rückbau des streckenseitigen Klasse B Systems statt. Durch die dabei zugrunde liegende kritische Masse an ausgerüsteten Streckenkilometern für den Beginn der Fahrzeugausrüstung sind die Anreize der EVU vollständig berücksichtigt. Eine Beschleunigung der fahrzeugseitigen Migration kann durch eine Senkung der jeweiligen kritischen Massen erreicht werden. Dies entspricht zusätzlichen Anreizen, bspw. einer direkten Förderung von ETCS-Fahrzeuggeräten oder einem Trassenpreisbonus für die Benutzung des Klasse A Systems. Fin-

det keine zusätzliche Anreizsetzung bspw. durch Subventionen oder eine rechtliche Umrüstverpflichtung statt, wird die in Abbildung 84 gezeigte Strategie umgesetzt.

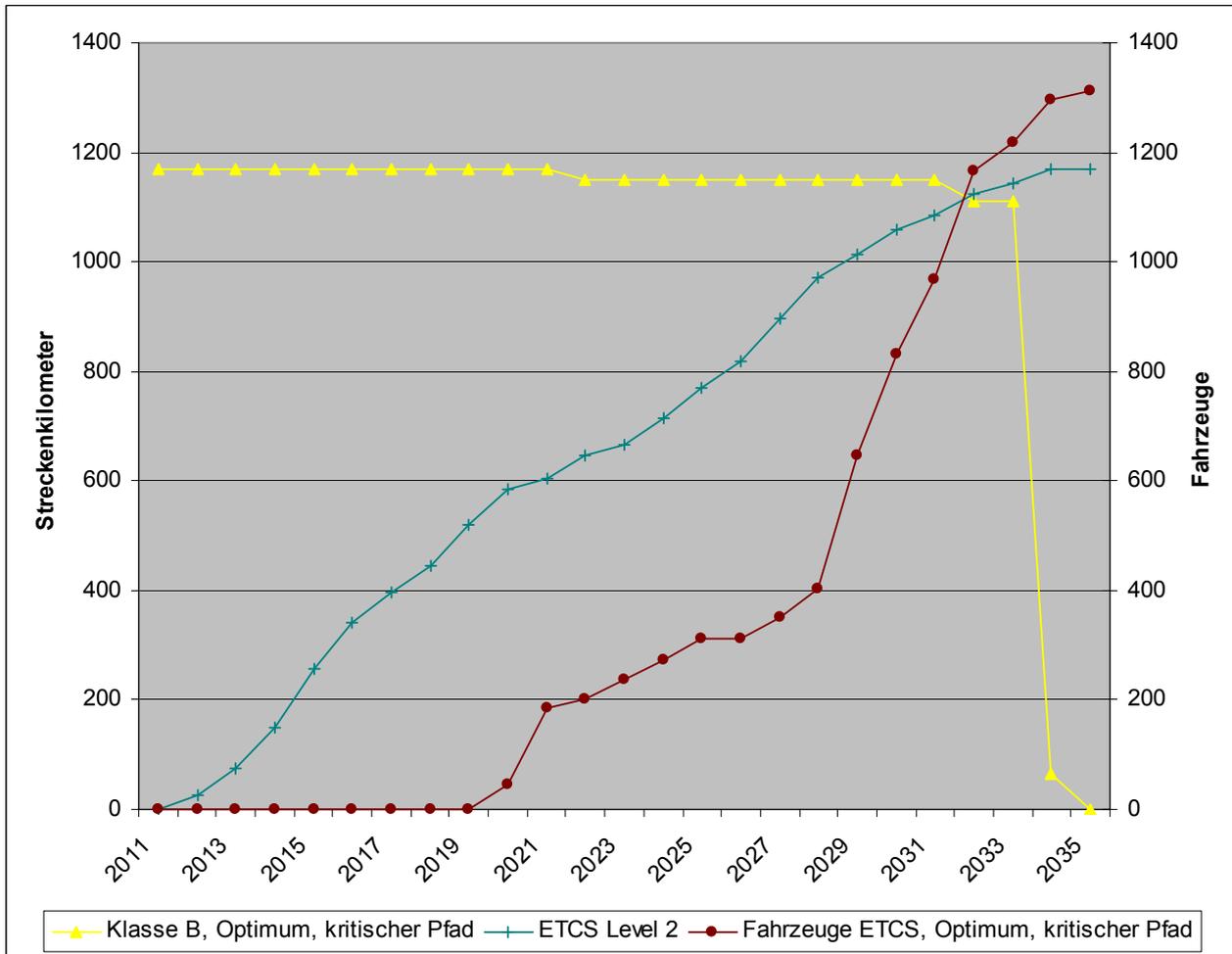


Abbildung 84: Von EVU favorisierte Migrationsstrategie, Optimum aus Handlungsspielraum, kritischer Pfad

5.5 Zusammenfassung des Fallbeispiels

Mit der Darstellung des Fallbeispiels ist die Herleitung und Validierung des Ansatzes zur Optimierung der Migration von ETCS abgeschlossen. Dabei wurde zunächst eine Modellierung für unterschiedliche Streckenszenarien durchgeführt. Diese Szenarien orientieren sich an realistischen Vorlagen und zeigen die Anwendung auf eine tatsächliche Migrationsfragestellung. Durch die verschiedenen Szenarien ist es möglich, die entwickelten Ansätze gegenüberzustellen und zu validieren.

Es zeigen sich unterschiedliche Ergebnisse, abhängig von der Netztopologie und den vorzufindenden kritischen Massen an umgerüsteten Streckenkilometern für die Fahrzugausrüstung. Das Optimierungsziel ist dabei die Maximierung des durch die Migration zur Verfügung gestellten Nutzens. Der vorgeschlagene 2-stufige dynamische Ansatz liefert für das Szenario einer netzweiten ETCS-Ausrüstung mit unterschiedlichen kritischen Massen für die Fahrzeug-ausrüstung das beste Ergebnis. Aufgrund der größten Nähe zu einer realen Problemstellung ist dies der Ansatz, der bei der Optimierung einer Migrationsstrategie anzuwenden ist.

Für die exemplarische Durchführung der Optimierung der Migrationsziele wird dieses Resultat weitergeführt. Hierbei können nun durch die Berücksichtigung von weiteren Randbedingungen wie den für die Umrüstung zur Verfügung stehenden Ressourcen realistische Zeitverläufe ermittelt und bewertet werden. Als Optimierungsziel werden monetäre Größen gewählt, die Minimierung zum einen der für die Investition notwendigen Einzahlungen sowie der Migrationskosten. Es zeigt sich, dass die Perspektive der Optimierung einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Insbesondere die Ziele der Fahrzeug- und der Streckenseite konkurrieren. Während die Betreiber der Infrastruktur eine möglichst schnelle Migration bevorzugen, werden die Verkehrsunternehmen ihren strategischen Spielraum für einen späten Beginn der Fahrzeugausrüstung ausnutzen. Das durch die Untersuchung des gesamten strategischen Spielraums ermittelte Ergebnis war um 10% bzw. 20% besser als die Ergebnisse der reinen Anwendung der Basisstrategien von streckenseitiger Doppelausrüstung bzw. fahrzeug- und streckenseitiger Parallelausrüstung.

Mit dem Fallbeispiel konnte die Wirksamkeit der theoretisch entwickelten Ansätze nachgewiesen werden. Dies gilt sowohl für die Modellierung, als auch für die Optimierung des Migrationsproblems. Außerdem konnten Handlungsempfehlungen für eine praktische Durchführung gegeben werden.

6 Schlussbetrachtung

Die Einführung von ETCS als einheitliches, europäisches Zugsicherungssystem soll die Wettbewerbsfähigkeit der Eisenbahn gegenüber den anderen Verkehrsträgern sichern. Bei der Einführung, Migration genannt, darf der laufende Betrieb nicht unterbrochen werden. Zusätzlich ergibt sich eine Vielzahl von technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und politischen Randbedingungen, die die Migration zu einer komplexen Planungsaufgabe machen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein auf formalen Methoden basierender Planungs- und Optimierungsansatz vorgestellt, der dem gegebenen Problemumfang gerecht wird.

Basis für die Methodik ist die Erstellung eines Prozessmodells der Migration. Der gesamte Migrationsprozess wurde formalisiert und dadurch mit mathematischen Optimierungsmethoden behandelbar. Damit wurden die Grundlagen für eine transparente und bis ins Detail nachvollziehbare Entwicklung von Migrationsstrategien gelegt, wie sie für eine koordinierte und erfolgreiche Durchführung notwendig sind. Für die Modellierung des Migrationsprozesses wurden ausgehend von den daran beteiligten Parteien Anforderungen abgeleitet. Durch die Gegenüberstellung von Funktionen und Komponenten konnte das Vorgehen bis herunter auf die technische Ebene dargestellt werden. Außerdem wurden das zu migrierende Netzwerk und seine Elemente mit Hilfe der System Modeling Language (SysML) als formaler Beschreibungssprache abgebildet. Damit lag für die Optimierung ein ganzheitliches und durchgängiges Modell vor. Durch die Vorgehensweise können Fehler in der Modellierung schnell aufgedeckt werden. Die Entscheidung für eine Strategie wurde dadurch nachvollziehbar und reproduzierbar. In Anbetracht der Komplexität der Problemstellung ist dieser Punkt besonders hervorzuheben.

Ausgehend von der vorgestellten Modellbildung wurde daraufhin nach einem geeigneten Optimierungsansatz gesucht. Die formale Systembeschreibung und Generierung von Migrationsstrategien ermöglichte es, eine optimale Umsetzung der ETCS-Migration zu ermitteln. Es war damit eine durchgängige Systematik und Nachvollziehbarkeit von der Aufnahme der Anforderungen an die Migration bei der Modellierung bis hin zur optimierten Strategie gegeben. Für den Optimierungsansatz wurde die Netzwerkökonomik als Ausgangspunkt gewählt und anhand des modellierten Schienenverkehrsnetzes der Umfang der anstehenden Untersuchung ermittelt. Weiterführend wurde dargestellt, wie die sich ergebende Komplexität behandelt und eine gültige Migrationsstrategie ermittelt werden kann. Zunächst wurde dazu die Optimierung der Reihenfolge von Migrationsaktivitäten für eine Nutzenmaximierung behandelt. Der Migrationsprozess wurde bis zu diesem Punkt rein sequentiell betrachtet. Parallele Prozessabläufe und eine Detaillierung bis hinunter auf Komponentenebene konnten darauf aufbauen ermittelt werden. Die Migrationspfade und -ziele wurden unter dem Gesichtspunkt eines optimierten Kosten-Nutzen-Verhältnisses untersucht. Mit der Maximierung des Nutzens durch die Migration vor einer Minimierung der Kosten wurde eine eindeutige Zielhierarchie identifiziert. Die bis zu diesem Punkt dargestellten Betrachtungen haben die Netztopologie, Verkehrsflüsse und technische Randbedingungen berücksichtigt. Externe Planungsvorgaben bspw. durch Politik oder Gesetzgebung wurden anschließend anhand eines iterativen Prozesses integriert.

Mit dem erarbeiteten Ansatz wurde ein Fallbeispiel durchgeführt. Ziel war es, die Anwendbarkeit zu demonstrieren und eine Validierung zu erreichen. Um den Einfluss verschiedener Rahmenbedingungen darzustellen und einen Hinweis auf die Anwendungsbereiche der Optimierungsansätze zu geben, wurden verschiedene Szenarien entwickelt und gegenübergestellt. Das Optimierungsziel war dabei die Maximierung des durch die Migration zur Verfügung gestellten Nutzens. Es zeigten sich unterschiedliche Ergebnisse, abhängig von der Netztopologie und den vorzufindenden kritischen Massen an umgerüsteten Streckenkilometer für die Fahrzugausrüstung. Der theoretisch hergeleitete und favorisierte Ansatz lieferte für das Szenario einer netzweiten ETCS-Ausrüstung mit unterschiedlichen kritischen Massen für die Fahrzugausrüstung das beste Ergebnis. Für die praktische Durchführung der Optimierung einer Migrationsstrategie ist dies der zu bevorzugende Ansatz.

Für die exemplarische Durchführung der Optimierung der Migrationsziele wurde dieses Szenario weitergeführt. Hierbei konnten nun durch die Berücksichtigung von weiteren Randbedingungen wie den für die Umrüstung zur Verfügung stehenden Ressourcen realistische Zeitverläufe ermittelt und bewertet werden. Als Optimierungsziel wurden die Minimierung der für die Investition notwendigen Einzahlungen sowie der Migrationskosten gewählt. Es zeigte sich, dass die Perspektive der Optimierung einen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Insbesondere die Ziele der Fahrzeug- und der Streckenseite konkurrierten. Während die Betreiber der Infrastruktur eine möglichst schnelle Migration bevorzugten, lag der Schluss nahe, dass die Verkehrsunternehmen ihren strategischen Spielraum für einen späten Beginn der Fahrzugausrüstung ausnutzen würden. Die durch die Untersuchung des gesamten strategischen Spielraums ermittelte Strategie lieferte ein um bis zu 20% besseres Ergebnis, als die verfügbaren Basisstrategien.

Damit konnte die Anwendbarkeit des Ansatzes auf ein realistisches Migrationsproblem gezeigt werden. Die entwickelten Strategien lassen sich durchgängig über technische und rechtliche Rahmenbedingungen hin zu den Anforderungen der beteiligten Parteien nachverfolgen. Dadurch werden sie nachvollziehbar, transparent und belastbar. Die Komplexität der Problemstellung stellte dabei kein Hindernis dar, sie wird erfasst und kann daraufhin gezielt behandelt werden. Bei der Wahl der optimalen Migrationsstrategie wird zunächst die Maximierung des Nutzens der neuen Technologie, hier ETCS, in den Mittelpunkt gestellt. Ist sie sichergestellt, wird eine Strategie gesucht, die diesen Nutzen bei minimierten Einzahlungen bzw. Migrationskosten umsetzt. Es können dabei die verschiedenen Perspektiven der beteiligten Parteien berücksichtigt und einander gegenübergestellt werden. Damit sind die Voraussetzungen für transparente Verhandlungen zwischen den beteiligten und die Einigung auf eine koordinierte und schlussendlich erfolgreiche Migration gegeben.

Mit Hilfe des Ansatzes ist es also möglich, eine optimierte Migrationsstrategie für die ETCS-Einführung in einem Streckennetz oder auf einem Korridor zu ermitteln. Dies kann sowohl ohne planerische Vorgaben, als auch unter Einbindung fester zeitlicher Vorgaben geschehen. Darüber hinaus ist es möglich, für einen bestehenden infrastrukturseitigen Migrationsplan eine optimierte Migration der betroffenen Fahrzeuge zu ermitteln. Da die Systemumgebung von ETCS, insbesondere die vorzufindende Stellwerkslandschaft, mit berücksichtigt wird, kann eine optimale Verzahnung mit Erneuerungsstrategien angrenzender Systeme gefunden werden. Dieser Punkt ist bei der notwendigen Ablösung der bestehenden RSTW durch ESTW von

besonderer Bedeutung, da sie direkte Auswirkungen auf die auf einer Strecke realisierbaren ETCS Level haben kann. Dadurch wird eine umfassende, nachhaltige und wirtschaftliche Erneuerung des Systems Eisenbahn möglich.

Der Ansatz liefert eine Methodik für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit einer Migrationsstrategie und verschiedene Algorithmen zur Optimierung, deren Entwicklung weitergeführt werden sollte. Sie sollten sich bspw. als Eröffnungsstrategien für evolutionäre Ansätze oder Simulated Annealing gut eignen. Es ist zu untersuchen, wie diese Ansätze anzupassen sind. Außerdem können sie zusätzliche Aussagen über die Qualität der Ergebnisse der vorgestellten gierigen Algorithmen liefern. Darüber hinaus kann eine genaue Klassifizierung von vorliegenden Netztopologien, insbesondere der verkehrlichen Verknüpfung der Streckenabschnitte, helfen, die Ansätze an die jeweils vorliegende Situation weiter anzupassen und noch gezielter einzusetzen. Die Einflüsse auf die Optimierungsergebnisse und die daraus folgenden Strategien sollten im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

Schließlich sind die Übertragbarkeit der Bewertungsmethodik und Algorithmen auf andere Netzwerktechnologien oder Technologien mit Netzwerkeffekten zu prüfen. Insbesondere, wenn ähnliche Netzstrukturen mit komplementären Gütern vergleichbar mit der hier vorliegenden fahrzeug- und streckenseitigen Sicherungstechnik und zentral getroffene Entscheidungen vorliegen. Anwendungsfelder könnten bspw. die flächendeckende Einführung von Elektromobilität im Automobilssektor oder auch die Effizienzsteigerung lärmindernder Maßnahmen im Schienenverkehr sein. Bei der Elektromobilität stellt sich insbesondere die Frage der realisierbaren Reiseentfernung in Abhängigkeit von Akkutechnologie, Lade- oder Tauschstellennetz und Ladedauer. Auch die dafür notwendige Anpassung des Stromversorgungsnetzes kann Gegenstand von Migrationsbetrachtungen sein. Die Netzwerkeffekte bei der Effizienzsteigerung lärmindernder Maßnahmen im Schienenverkehr zeichnen sich in erster Linie durch die Lärmwirkung des Verkehrs auf Anwohner aus, wobei eine Netzwerkexternalität vorliegt. Infrastrukturseitige Maßnahmen wie Schallschutzwände wirken nur örtlich begrenzt, während fahrzeugseitige Maßnahmen entlang der gesamten Fahrstrecke die Schallemission mindern. Investitionen auf Fahrzeugseite werden deswegen als effizienter angesehen. Allerdings wird aufgrund der Höreigenschaften des menschlichen Ohres eine Entlastung für Anwohner erst bei einer sehr weit fortgeschrittenen Umrüstung des gesamten Wagenparks spürbar. Damit liegt ebenfalls eine Problematik vor, die mit den vorgestellten Methoden der Optimierung der Technologiemigration behandelt werden kann.

Anhand dieser Beispiele zeigt sich, dass die Technologiemigration gerade in unserer zunehmend vernetzten Welt eine Methode bieten kann, die es erlaubt, auf technologischen Fortschritt zu reagieren, diesen verfügbar zu machen und zur Erneuerung bestehender Systeme beizutragen.

Abkürzungsverzeichnis

ATB	Automatische Treinbeïnvloeding System (niederländische automatische Zugbeeinflussung)
ATB-EG	ATB der alten Generation
ATB-VV	ATB, verbesserte Version (Verbeterde Versie)
BMW-Prinzip	Beschreibungsmittel, Methode, Werkzeug Prinzip
BTS	Base Transceiver Station
EBA	Eisenbahnbundesamt
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
ERA	European Railway Agency
ERTMS	European Rail Traffic Management System
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
EVC	European Vital Computer
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FS	Full Supervision
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
LEU	Lineside Electronic Unit
LS	Limited Supervision
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MA	Movement Authority
MSTW	Mechanisches Stellwerk
MVB	Multifunctional Vehicle Bus
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung

RBC	Radio Block Center
RSTW	Relaisstellwerk
SGV	Schienengüterverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SPV	Schienenpersonenverkehr
SRS	System Requirements Specification
STM	Specific Transmission Module
STW	Stellwerk
SysML	System Modeling Language
U2TP	UML 2 Testing Profile
UML	Unified Modeling Language

Symbolverzeichnis

Δ_{Teilnetz}	Schwellenwert, ab dem zwei Netzbereiche als ausreichend unabhängig von einander definiert sind, um unabhängige Teilnetze zu bilden
A_t	Auszahlungen zum Zeitpunkt t
C_0	Kapitalwert
\underline{C}	Matrix der Fahrweite eines Korridors oder Netzes
$\underline{D}(t)$	Der aktuelle Ausrüstungszustand des Streckennetzes und damit die Fahrweite auf ETCS
\underline{Ea}	Matrix mit den Wichtungen wa_{ij} der asymmetrischen Verknüpfung
\underline{Es}	Matrix mit den Wichtungen ws_{ij} der symmetrischen Verknüpfung
E_t	Einzahlungen zum Zeitpunkt t
\underline{E}	Vektor mit der anteiligen Erfüllung der kritischen Masse m_k durch $f_k(t)$ kann für alle Verkehre k zum Zeitpunkt t
$f_k(t)$	Zum Zeitpunkt t vorhandenen Anteil umgerüsteter Fahrzeuge des Verkehrs k
G	Anzahl der möglichen Migrationsziele pro Abschnitt
GF_i	zusammenhängende Gesamtfahrweite für jeden Abschnitt i
GF_i	Zusammenhängende Gesamtfahrweite für jeden Abschnitt i
$GFN_i(t)$	Gesamtfahrweite der dem Abschnitt i zugeordneten Verkehre, die insgesamt zu einem Zeitpunkt t auf ETCS zurücklegt werden
$GFR(t)$	Die gesamte Fahrweite auf alleinig mit ETCS ausgerüsteten Strecken zu Zeitpunkt t
$g_{i,red}$	Reduzierte Anzahl an Migrationszielen des Abschnitts i
i	Kalkulationszinsfuß
i (Index)	Index Streckenabschnitte
l_0	Anfangsinvestition
j (Index)	Ersatzindex Streckenabschnitte
j (Index)	Index Verkehre
k (Index)	Index Verkehre
\underline{L}	Vektor mit Streckenlängen der Abschnitte
l (Index)	Ersatzindex Streckenabschnitte

l_i	Element von \underline{L} , gibt die Streckenlänge des Abschnitts mit dem Index i an
L_T	abgezinster Liquidationserlös
\underline{M}	Vektor aller kritischen Massen der Verkehre
MC_0	Migrationskosten
m_k	Kritische Masse des Verkehrs k : Der benötigte umgerüstete Anteil an Streckenkilometern die der Verkehr k befährt, ab dem er auf das neue System umgerüstet wird
\underline{N}	Vektor mit den Fahrzeugzahlen der Verkehre
$n_{i,red,options}$	Reduzierte Anzahl an Optionen des Abschnitts i
n_k	Anzahl der Fahrzeuge des Verkehrs k
$N_{options}$	Anzahl der möglichen Pfad/ Ziel Kombinationen
$n_{options}$	Anzahl der Optionen pro Streckenabschnitt
N_{order}	Anzahl der möglichen Migrationsreihenfolgen
$N_{red,options}$	Reduzierte Anzahl an Migrationsoptionen
$N_{red,options.abh}$	Reduzierte Anzahl an Migrationsoptionen durch gegenseitige Ausschlüsse von Migrationspfaden und –zielen
N_{total}	Gesamtumfang des strategischen Spielraums
o	Anzahl der Verkehre
P	Anzahl der möglichen Migrationspfade pro Abschnitt
$p_{i,red}$	Reduzierte Anzahl an Migrationspfaden des Abschnitts i
$\underline{R}(t)$	Vektor gibt den Stand der Ablösung des Altsystems auf dem gesamten betrachteten Netz zum Zeitpunkt t an
$r_i(t)$	Rückbau bzw. die Ablösung des Klasse B Systems auf einem Abschnitt i zum Zeitpunkt t ; $r_i(t)=1$ falls alle zugeordnete Verkehre umgerüstet; $r_i(t)=0$ sonst
R_t	Rückflüsse zum Zeitpunkt t
s	Anzahl der Streckenabschnitte
S_{red}	Reduzierte Anzahl an Streckenabschnitten
T	Endzeitpunkt der Investition
t (Index)	Zeitindex
t_E	Endzeitpunkt der Migration, ab dem das Altsystem auf allen Streckenabschnitten zurückgebaut ist

t_i	Umrüstzeitpunkt der Strecke i
$\underline{U}(t)$	Umrüstungsvektor der Infrastruktur zum Zeitpunkt t
$u_e(t)$	Abschnitt e , der zum Zeitpunkt t umgerüstet wird
$u_i(t)$	Umrüstzustand der Strecke i zum Zeitpunkt t . $u_i(t)=1$, wenn die Strecke zum Zeitpunkt t umgerüstet ist; sonst gilt $u_i(t)=0$
$\underline{V}(t)$	Vektor, der den Umrüstungsstand $v_k(t)$ aller Verkehre zum Zeitpunkt t wiedergibt
$v_k(t)$	Umrüstung eines Verkehrs k zum Zeitpunkt t in Abhängigkeit von der kritischen Masse m_k und dem Umrüststand $f_k(t)$; $v_k(t) = 1$, falls $m_k \leq f_k(t)$; sonst $v_k(t) = 0$
$\underline{W}(t)$	Wichtungsvektor: Dynamische Wichtung aller Abschnitte zum Zeitpunkt t
wa_{ij}	Wichtung: Asymmetrische Verknüpfung zwischen Abschnitt i und Abschnitt j
$wd_i(t)$	Wichtung: Dynamische Wichtung eines Abschnitts i zum Zeitpunkt t
$wd_{Teilnetz}(t)$	Wichtungsfaktor eines Abschnitts zum Zeitpunkt t , der zu einem Teilnetz gehört und damit abhängig ist von dem Ausrüstungsstand anderer Abschnitte im selben Teilnetz
$wd_{unabhängig}(t)$	Wichtungsfaktor eines Abschnitts zum Zeitpunkt t , der nicht zu einem Teilnetz gehört und damit unabhängig von dem Ausrüstungsstand anderer Abschnitte in einem anderen Teilnetz ist
ws_{ij}	Wichtung: Symmetrische Verknüpfung zwischen Abschnitt i und Abschnitt j
\underline{X}	Zuordnungsmatrix zur Zuordnung von Strecken und Fahrzeugen
x_{ik}	Element von \underline{X} gibt an, ob der Verkehr j über den Abschnitt k . Ist dies der Fall, gilt $x_{ik}=1$; sonst gilt $x_{ik}=0$
ZK	gefahrte Zugkilometer
ZK_i	Zugkilometer von Abschnitt i
ZK_{ij}	gemeinsamen Zugkilometer der Abschnitte i und j
ZK_j	Zugkilometer von Abschnitt j

Literaturverzeichnis

- Achilles, A. 2008. Die Migration von ETCS aus dem Blickwinkel des Produktlebenszyklus. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 10, S. 666–670.
- Achilles, A. 2009. Prognose wirtschaftlicher Produktlebenszyklen für das European Train Control System (ETCS). Dissertation, Technische Universität.
- Bikker, G., und Schroeder, M. 2002. Methodische Anforderungsanalyse und automatischer Entwurf sicherheitsrelevanter Eisenbahnleitsysteme mit kooperierenden Werkzeugen. VDI, Düsseldorf.
- Blohm, H., Lüder, K., und Schaefer, C. 2006. Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und der Investitionsrechnung. Vahlen, München.
- Böhm, T., und Scheier, B. 2010. Railonomics - für eine bedarfsgerechte Infrastruktur. Softwaregestützte Integration von Betriebssimulation und Wirtschaftlichkeitsanalyse. EI - Eisenbahningenieur 61., Heft 01, S. 32–36.
- Bolli, M., und Rothbauer, M. 2009. ERTMS/ETCS - die Zukunft hat begonnen. Signal + Draht 101, Heft 3, S. 6–12.
- Bormet, J. 2007. Anforderungen des Betreibers an den Life-cycle in der Fahrwegsicherungstechnik. Signal + Draht 99, Heft 1 und 2, S. 6–16.
- Braun, J., Koulischer, J.-Y., und Schunke-Mau, C. 2010. Mit ETCS „aktiv“ durch Deutschland. Signal + Draht 102, Heft 5, S. 34–38.
- Clausecker, M., und Bönnen, N. 2010. Nachhaltige Mobilität durch Schienenverkehr. Europäische Perspektiven. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 134, Heft 1-2, S. 18–23.
- Coenenberg, A.G. 2003. Kostenrechnung und Kostenanalyse. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- Deutsche Bahn AG. 2002. Infrastruktur gestalten. Modul 413.0301. Deutsche Bahn AG, Frankfurt am Main.
- Dickenbrock, B., Jugelt, R., Schröder, J., und Stuhr, H.J. 2009. FlexCargoRail. ein Beitrag zur Effizienzsteigerung des Einzelwagenverkehrs. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 133, Heft 1-2, S. 42–50.
- Dräger, U. 2004. ETCS und der Übergang zu den nationalen Zugsicherungssystemen der DB AG. Signal + Draht 96, Heft 11, S. 6–15.
- Dräger, U. 2010. Betriebserfahrungen und Möglichkeiten der neuen LZB 80E. Signal + Draht 102, Heft 4, S. 30–36.
- Dräger, U., und Krieger, M. 2006. Das modulare Fahrzeuggerät LZB 80E, offen für den Übergang nach ETCS. Signal + Draht 98, Heft 12, S. 26–31.

Duchemin, J. 2009. Automatische Kupplung für den Schienengüterverkehr. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 5, S. 270–271.

Ehrhardt, M. 2001. Netzwerkeffekte, Standardisierung und Wettbewerbsstrategie. Univ., Diss.--Frankfurt (Main), 2000. Gabler Edition Wissenschaft Strategische Unternehmensführung. Dt. Univ.-Verl. [u.a.], Wiesbaden.

Eisenbahn-Bundesamt. 8. Mai 1967. Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung. EBO. 31. Oktober 2006.

Eschlbeck, R. 2009. Das European-Train-Control-System (ETCS). Deine Bahn, Heft 9, S. 13–19.

Europäische Kommission. 2005. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Einführung des Europäischen Zugsicherungs-/ Zugsteuerungs- und Signalgebungssystem ERTMS/ ETCS.

Europäische Kommission. 2006. ERTMS - Für einen flüssigen und sicheren Eisenbahnverkehr. Ein europäisches wirtschaftliches Großvorhaben. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel.

Fenner, W., Naumann, P., und Trinckauf, J. 2003. Bahnsicherungstechnik. Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr. Publicis Corporate Publishing, Erlangen.

Forth, A., Pilarek, P., und Scheer, A. 2008. Fahrzeuggeräte ETCS und LZB-STM auf spanischen HGV-Strecken. Signal + Draht 100, Heft 7+8, S. 6–10.

Gralla, C. 2009. Zur Gestaltung einer ETCS-Migration eines Eisenbahnverkehrsunternehmens. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.

Gralla, C., Koulischer, J., Schunke-Mau, C., und Zoetard, P. 2009. ETCS für den Mehrsystem-ICE 3. Signal + Draht 101, Heft 3, S. 13–16.

Hase, K.-R. 2009. „openETCS“ – ein Vorschlag zur Kostensenkung und Beschleunigung der ETCS-Migration. Signal + Draht 101, Heft 10, S. 18–25.

Heilig, C., und Altmeier, J. 2010. Modulare STMs als Teil der Migrationsstrategie von ETCS. Signal + Draht 102, Heft 3, S. 28–30.

Holzhausen, A. 2004. Durchsetzung neuer Antriebstechnologien bei Automobilen. Eine netzwerkökonomische Betrachtung. Dissertation 1018. dissertation.de, Berlin.

Hruby, P. Visio Stencil and Template for SysML 1.0. <http://softwarestencils.com/sysml/index.html>.

Huch, B., Behme, W., und Ohlendorf, T. 2004. Rechnungswesenorientiertes Controlling. Physica, Heidelberg.

Jahnsen, A., Lemmer, K., Ptok, B., und Schnieder, E. Modelling and Simulation of the new European Train Control System. In MathMod 97.

Katz, M., und Shapiro, C. 1985. Network Externalities, Competition and Compatibility. American Economic Review 75, S. 424–440.

KBSt. 2003. Migrationsleitfaden. Leitfaden für die Migration der Basissoftwarekomponenten auf Server- und Arbeitsplatzsystemen. Version 1.0. Bundesministerium des Innern, Berlin.

Knieps, G. 2007. Netzökonomie. Grundlagen - Strategien - Wettbewerbspolitik. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.

Knollmann, V. 2007. UML-basierte Testfall und Systemmodelle für die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.

Kochsiek, J. 2009. FlexCargoRail. Beiträge zur Verbesserung von Betriebsverfahren und zur Einbindung in Transportkonzepte. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 133, Heft 1-2, S. 59–66.

Kohl, T. 2009. Wachstumspotenziale der Bahnen trotz begrenzter Infrastruktur. Politische und monetäre Maßnahmen. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 133, Heft 1-2, S. 20–24.

Kommission der Europäischen Gemeinschaften. 2006. Entscheidung der Kommission vom 07/XI/2006 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems und zur Änderung von Anhang A der Entscheidung 2006/679/EG vom 28. März 2006 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Zugsteuerung/Zugsicherung und Signalgebung“ des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems. C(2006) 5211.

Korte, B., und Vygen, J. 2008. Combinatorial Optimization. Theory and Algorithms. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Krüger, M. 2003. Zugsicherung in Deutschland. Von der LZB zu ETCS. EI - Eisenbahningenieur 54, Heft 2, S. 27–31.

Krumke, S.O., und Noltemeier, H. 2009. Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen. Mit 9 Tabellen und 90 Aufgaben von Sven Oliver Krumke, Hartmut Noltemeier. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.

Kruschwitz, L. 2003. Investitionsrechnung. Oldenbourg, München.

Lackhove, C. 2007. Modellierung der Einflussparameter für die Strategiewahl bei der Migration neuer Systeme der Produktionssteuerung im Eisenbahnbetrieb. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig.

Lackhove, C. 2009. Verfahren zur Ermittlung einer optimalen Migration, Heft Europäisches Patentamt: 09014337.1 - 2215 / 2186707.

Lackhove, C. 2010. Generierung und Auswahl von Strategien zur Migration von ETCS. Signal + Draht 102, Heft 10, S. 22–26.

Lackhove, C., Jäger, B., und Lemmer, K. 2010. Generating and optimizing strategies for the migration of the European Control System. In Computers in Railways XII. Computer System Design and Operation in Railways and other Transit Systems, N. Ning, C. A. Brebbia and N. Tomii, Eds. WIT Press, Ashurst, Southampton UK, S. 383–394.

Lackhove, C., und Scheier, B. 2010. Projektierungsannahmen zur ETCS-Kostenabschätzung. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 134, Heft 10, S. 420–427.

Lauber, J. 1996. Methode zur funktionalen Beschreibung und Analyse von Produktionsprozessen als Basis zur Realisierung leittechnischer Lösungen. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 1996. Mainz, Aachen.

Löwe, J., und Lehmann, U. 2010. ETCS-Migration von Triebfahrzeugen mit Trainguard. Signal + Draht 102, Heft 4, S. 18–23.

Lunze, J. 2003. Automatisierungstechnik. Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme. Oldenbourg, München.

Meyer zu Hörste, M. 2003. Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.

Mindel, K. 2001. Migration von der LZB zu ETCS in Deutschland. Signal + Draht 93, Heft 9.

Müller, A. 2005. Wirtschaftlichkeit der Integration. Eine ökonomische Analyse der Standardisierung betrieblicher Anwendungssysteme. Univ., Diss.--München, 2005. Gabler Edition WissenschaftMarkt- und Unternehmensentwicklung. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden.

Müller, H. 2010. 10 Jahre EBC – Erfahrungen der Benannten Stelle Interoperabilität mit ETCS-Projekten. Signal + Draht 102, Heft 4, S. 6–11.

Naumann, P., and Pacht, J., Eds. 2004. Leit- und Sicherungstechnik im Bahnbetrieb. Tetzlaff, Hamburg.

Obrenovic, M., und et al. 2005. Methodik für die Entwicklung, Bewertung und simulative Validation von Migrationsstrategien. Zilinská univerzita v Ziline v EDIS, Zilina.

Obrenovic, M. 2009. Methodik für die Migration von Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel der Einführung von ETCS. Dissertation, Technische Universität Braunschweig.

Oetting, A. 2005. Physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2005. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dd10/523298854.pdf> / http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2006/1643/pdf/Oetting_Antje.pdf / <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2006/1643> / <http://deposit.d-nb.de/cgi->

bin/dokserv?idn=982111649 / <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:82-opus-16439> / <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dd10/523298854l.pdf>.

Pachl, J. 2000. Systemtechnik des Schienenverkehrs. Teubner, Stuttgart.

Publications Office of the European Union. 2009. Biennial Report on the Progress with Railway Interoperability in the European Union, Luxemburg.

Publications Office of the European Union. 2011. Progress with Railway Interoperability in the European Union. Biennial Report, Luxemburg.

Regierung der Bundesrepublik Deutschland. 27. September 2007. Nationaler Umsetzungsplan für die TSI Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems im Rahmen der Richtlinie 2001/16/EG in der Bundesrepublik Deutschland.

Reichmann, T. 2001. Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten. Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption. Vahlen, München.

Rinza, F., und Schmitz, H. 1977. Nutzwert-Kosten-Analyse. Eine Entscheidungshilfe zur Auswahl von Alternativen unter besonderer Berücksichtigung nicht monetärer Bewertungskriterien. VDI, Düsseldorf.

Rückle, D., und Klein, A. 1994. Product-Life-Cycle-Cost Management. In Neuere Entwicklungen im Kostenmanagement, K. Dellmann and K. P. Franz, Eds. Haupt, Bern, S. 335–367.

Sakurai, M. 1997. Integratives Kostenmanagement: Stand und Entwicklungstendenzen des Controlling in Japan. Vahlen, München.

Schaefer, S. 1993. Datenverarbeitungsunterstütztes Investitions-Controlling. Vahlen, München.

Schneeweiß, C. 1991. Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Band 1. Springer, Berlin.

Schnieder, E. 1999. Methoden der Automatisierung. Vieweg, München.

Sedello, M., und Potthoff, B. 2009. Einführung von GSM-R bei europäischen Eisenbahnen. ZEVrail - Zeitschrift für das gesamte System Bahn 133, Heft 11-12, S. 484–493.

Shy, O. 2006. The economics of network industries. Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Stachowiak, H. 1973. Allgemeine Modelltheorie. Springer, Wien.

Stamm, B. 2009. ETCS Subsystems. In Compendium on ERTMS, European Rail Traffic Management System, P. Winter, Ed. DVV Media Group Eurailpress, Hamburg, S. 107–113.

Stephan, S. 1999. Migrationsstrategien in der Leittechnik. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

The Reference Net Workshop. Renew. Version 2.1. <http://www.renew.de/>.

van der Werff, M., und Klinkhamer, M. 2009. The strategic value of investment in the replacement of signalling systems. *Signal + Draht* 101, Heft 6, S. 30–36.

Weber, J. 2004. Einführung in das Controlling. Schäffer-Poeschel, Stuttgart.

Weigand, W. 2007. ETCS. Betriebliche Vorteile der unterschiedlichen Funktionsstufen und Betriebsarten. *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56, Heft 11, S. 676–681.

Weilkiens, T. 2008. OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) 1.1, Notationsübersicht. <http://www.omg.sysml.org>.

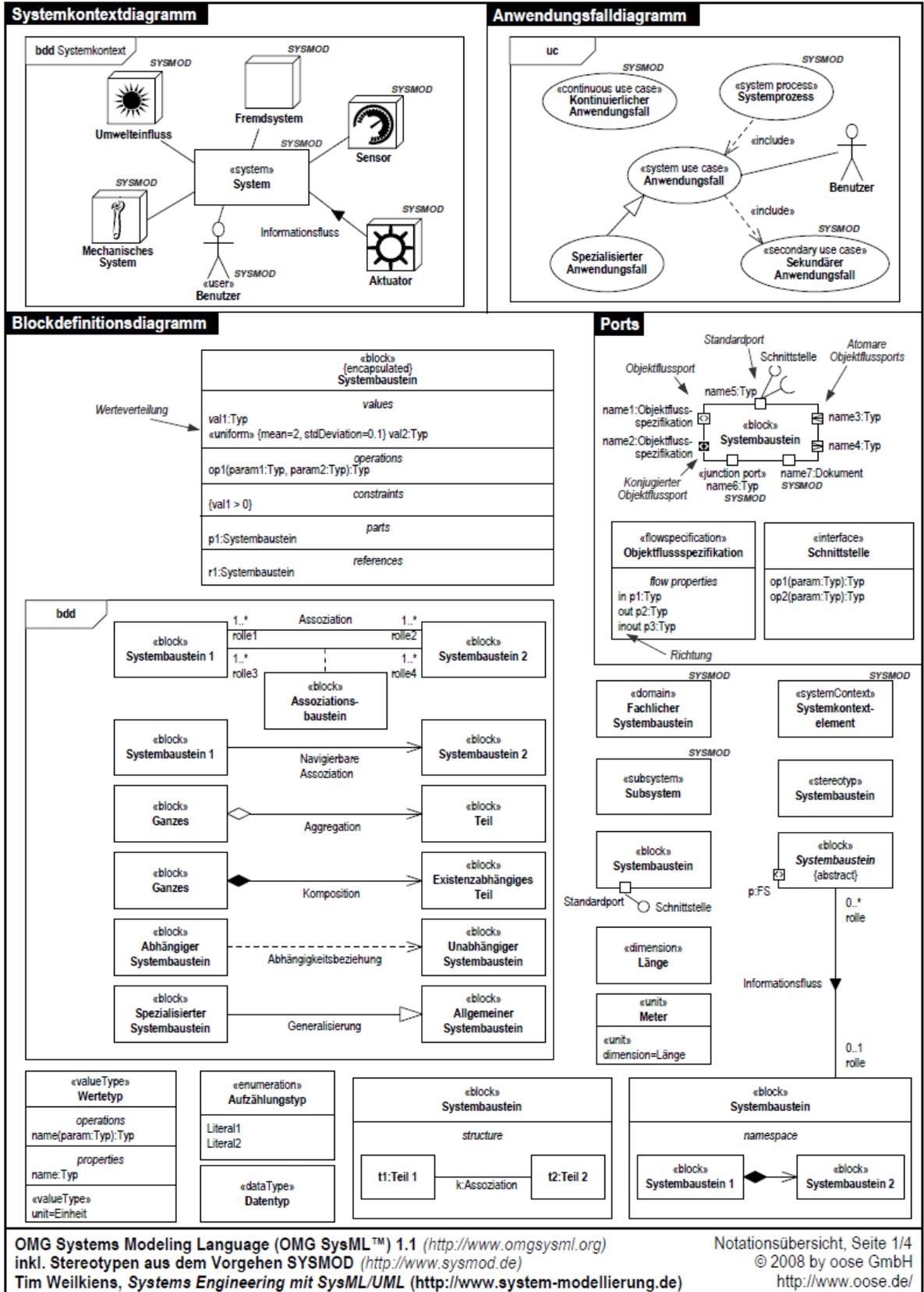
Wendler, E. 2009. Influence of ETCS on the capacity of lines. In *Compendium on ERTMS, European Rail Traffic Management System*, P. Winter, Ed. DVV Media Group Eurailpress, Hamburg, S. 211–223.

XJ Technologies. AnyLogic. Version 6.2. <http://www.xjtek.com/>.

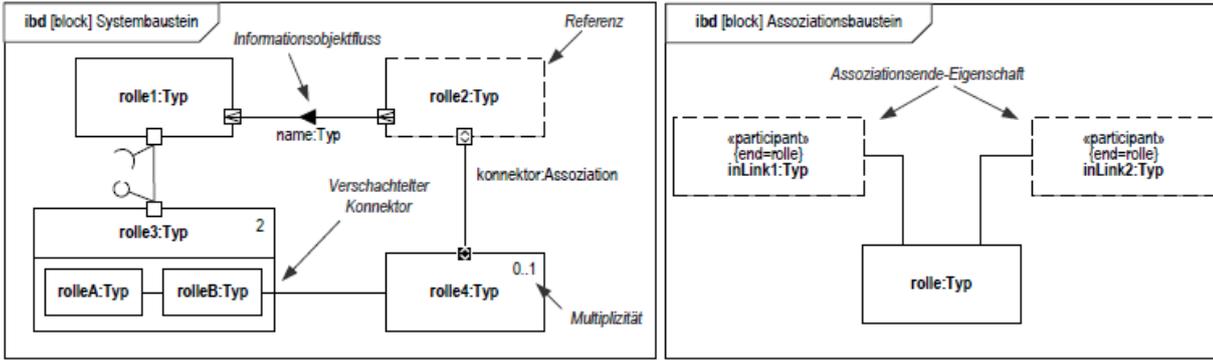
Zangemeister, C. 1971. Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Wittmannsche Buchhandlung, München.

A Anhang

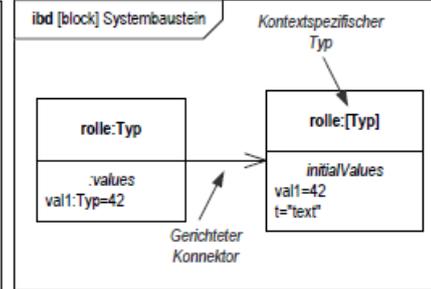
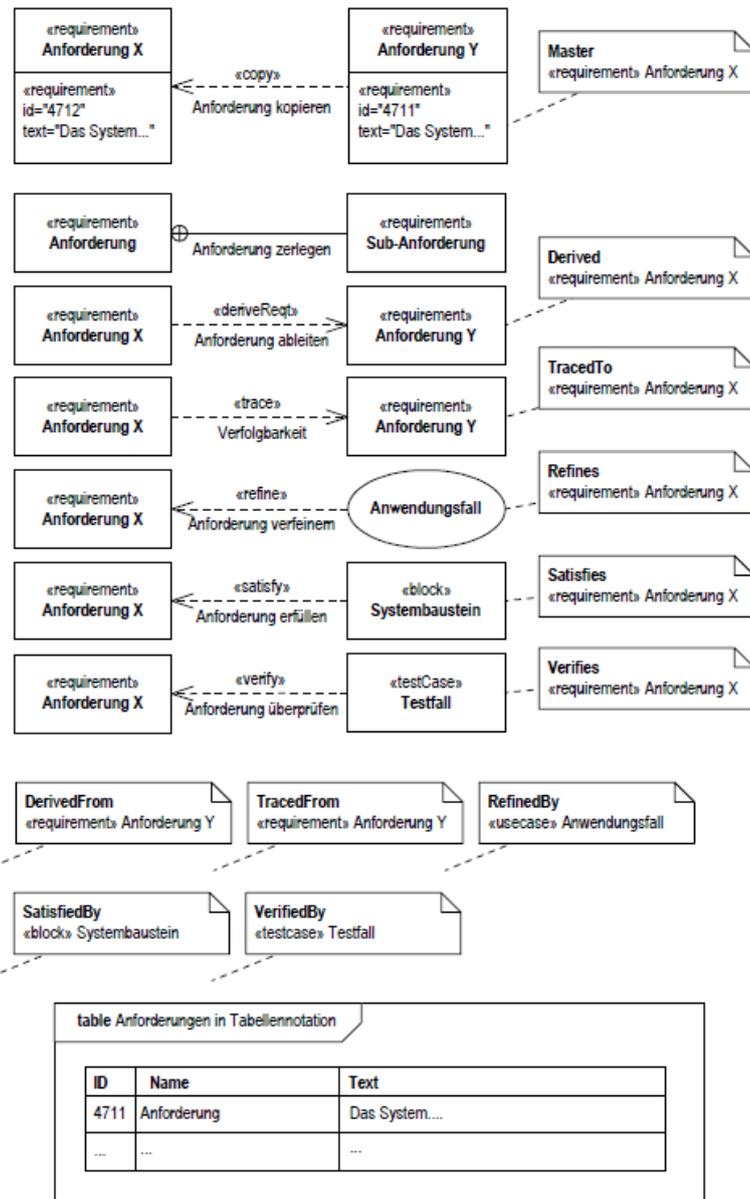
A.1 SysML Spezifikation



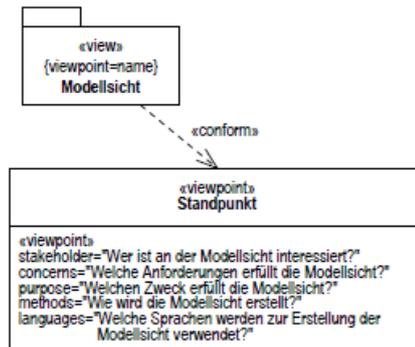
Internes Blockdiagramm



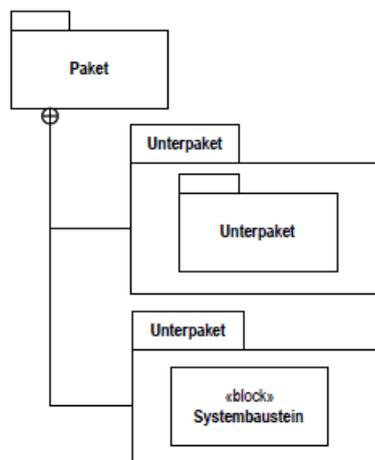
Anforderungen



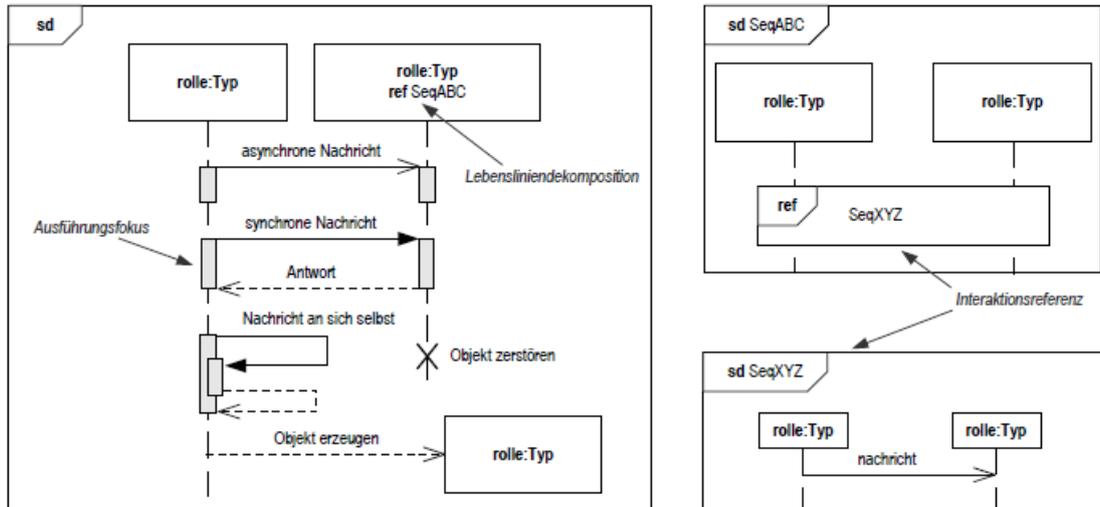
Modellsicht



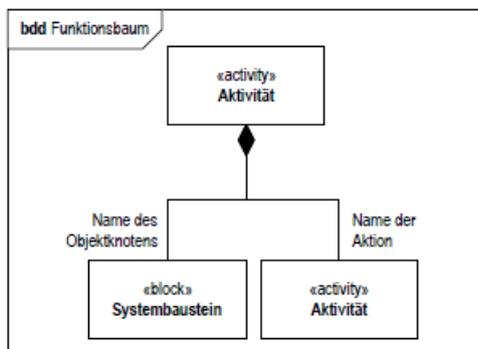
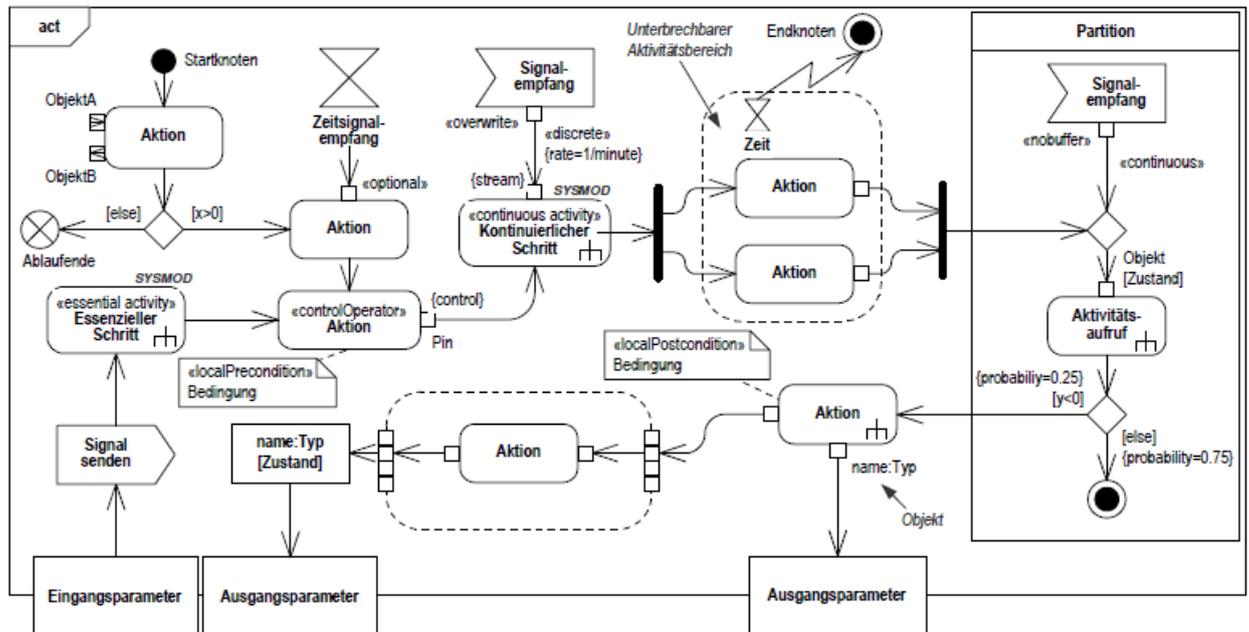
Pakete



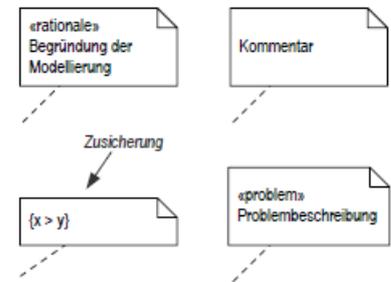
Sequenzdiagramme



Aktivitätsdiagramme



Anmerkungen



OMG Systems Modeling Language (OMG SysML™) 1.1 (<http://www.omgsysml.org>)

inkl. Stereotypen aus dem Vorgehen SYSMOD (<http://www.sysmod.de>)

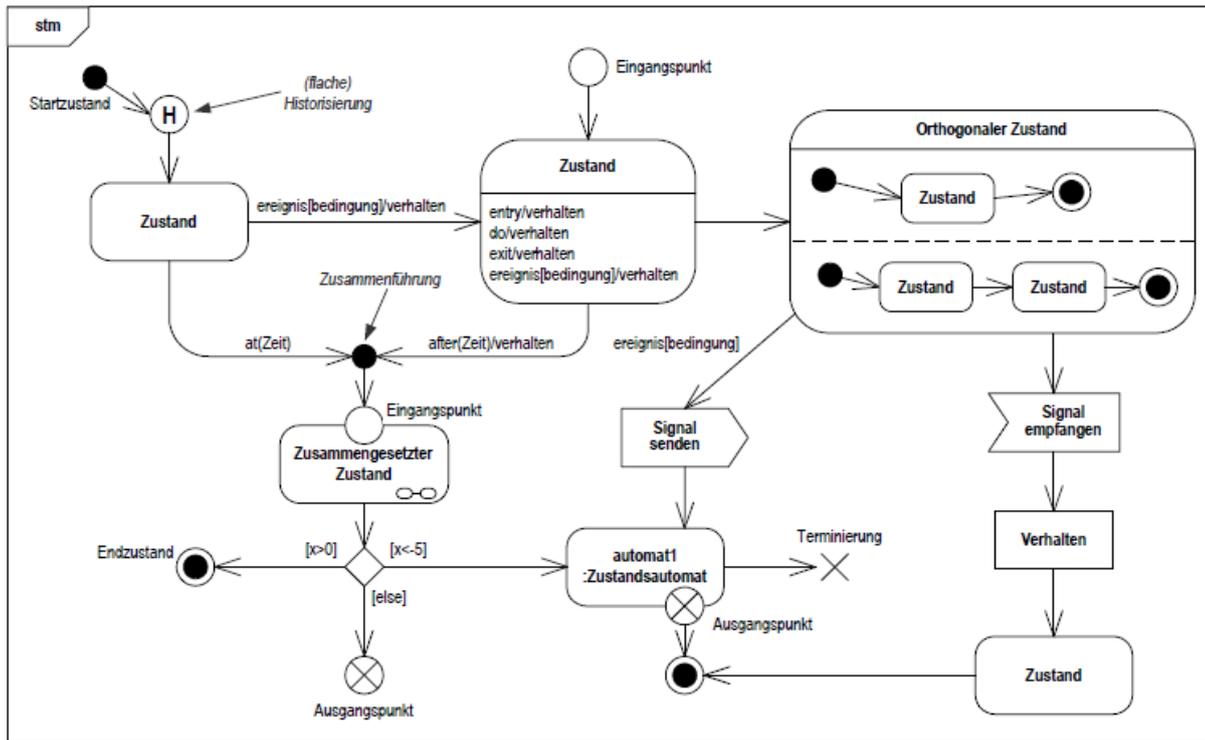
Tim Weilliens, Systems Engineering mit SysML/UML (<http://www.system-modellierung.de>)

Notationsübersicht, Seite 3/4

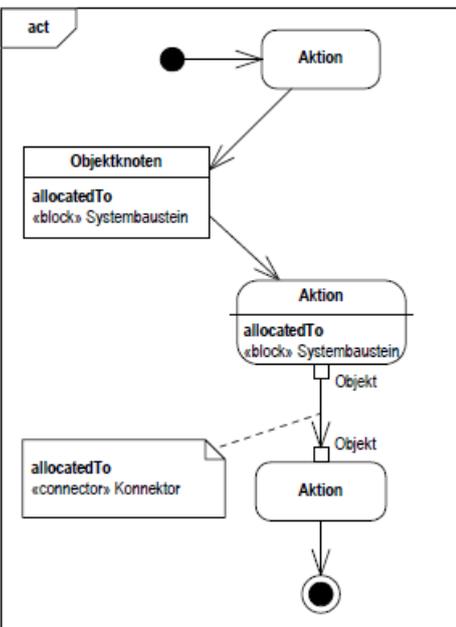
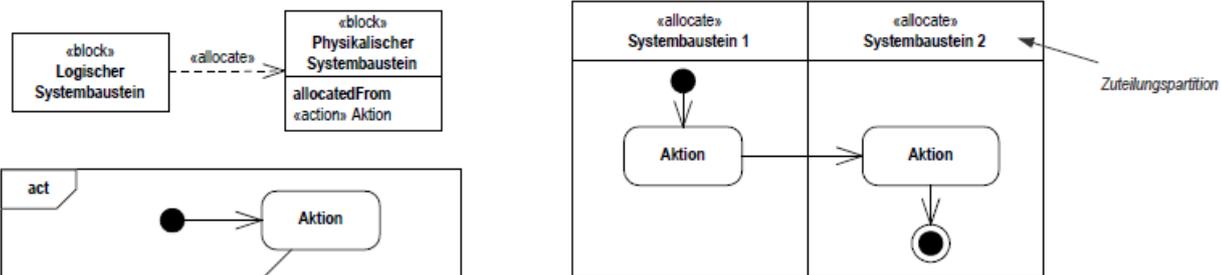
© 2008 by oose GmbH

<http://www.oose.de/>

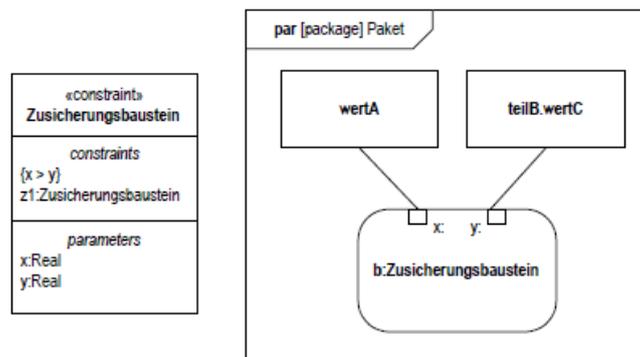
Zustandsdiagramme



Zuteilung



Zusicherungsdiagramm



A.2 Modellierung der Sicherheitstechnik

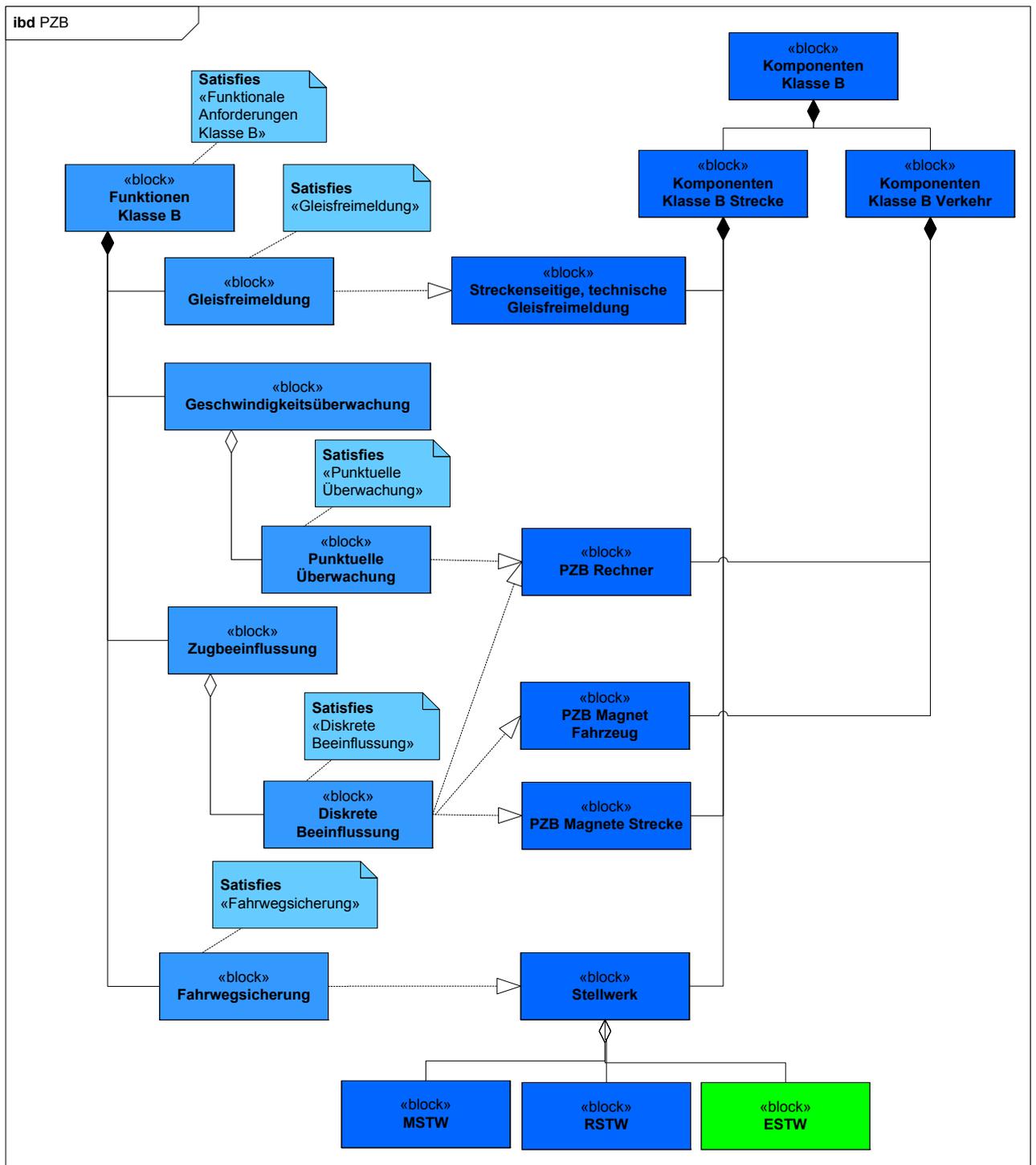


Abbildung 85: Funktionserfüllung bei der PZB

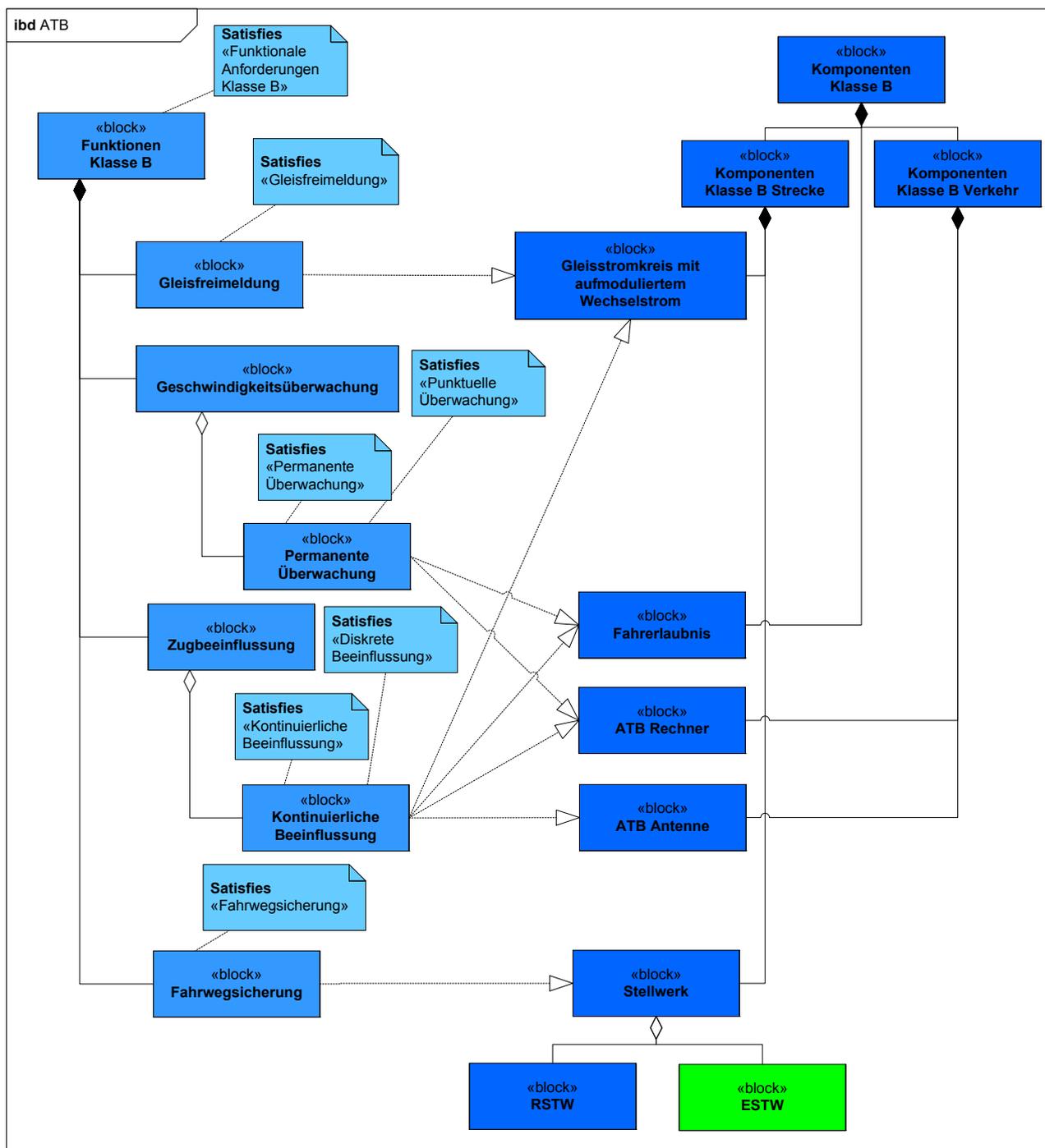


Abbildung 86: Funktionserfüllung bei der ATB

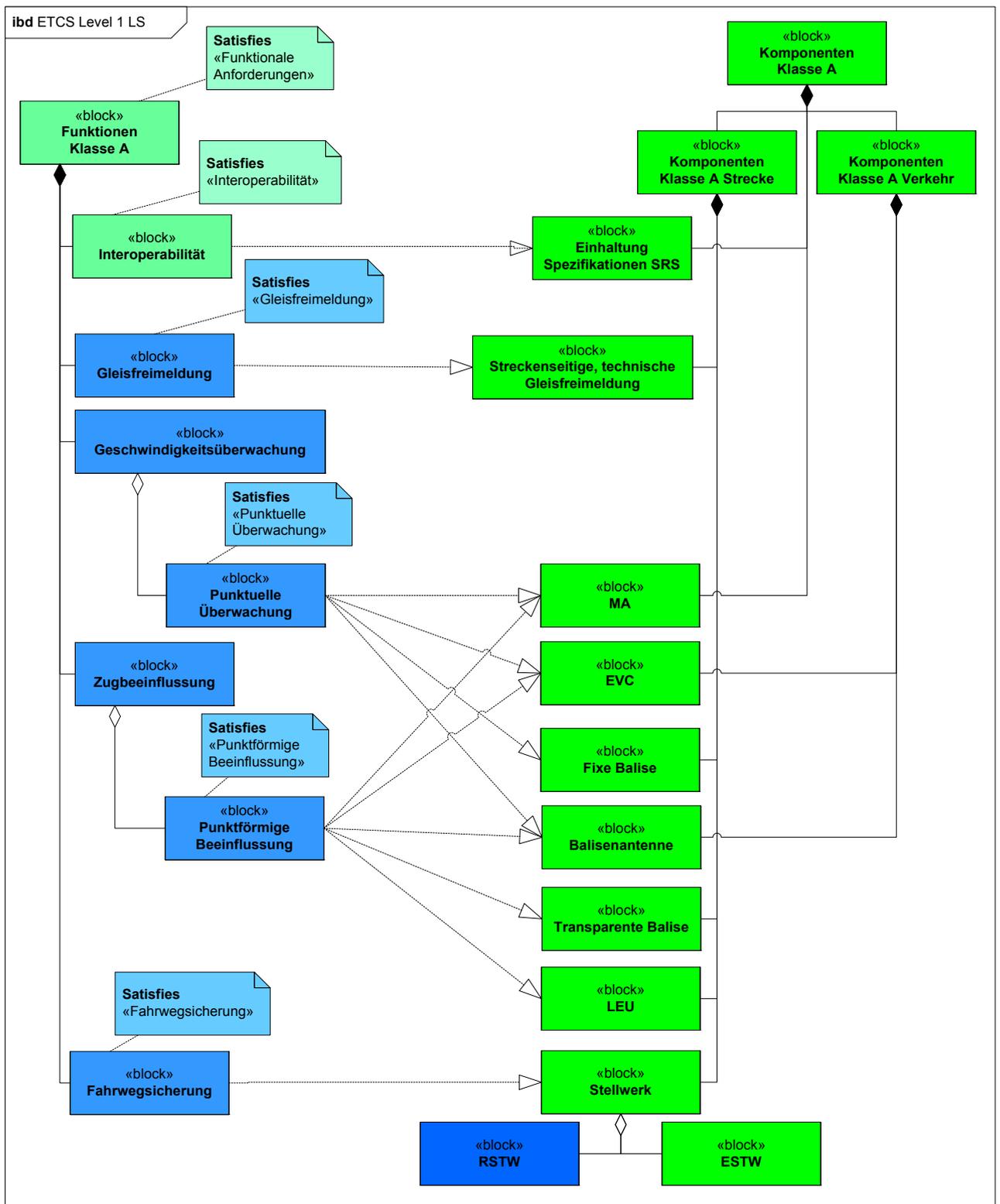


Abbildung 87: Funktionserfüllung bei ETCS Level 1 LS

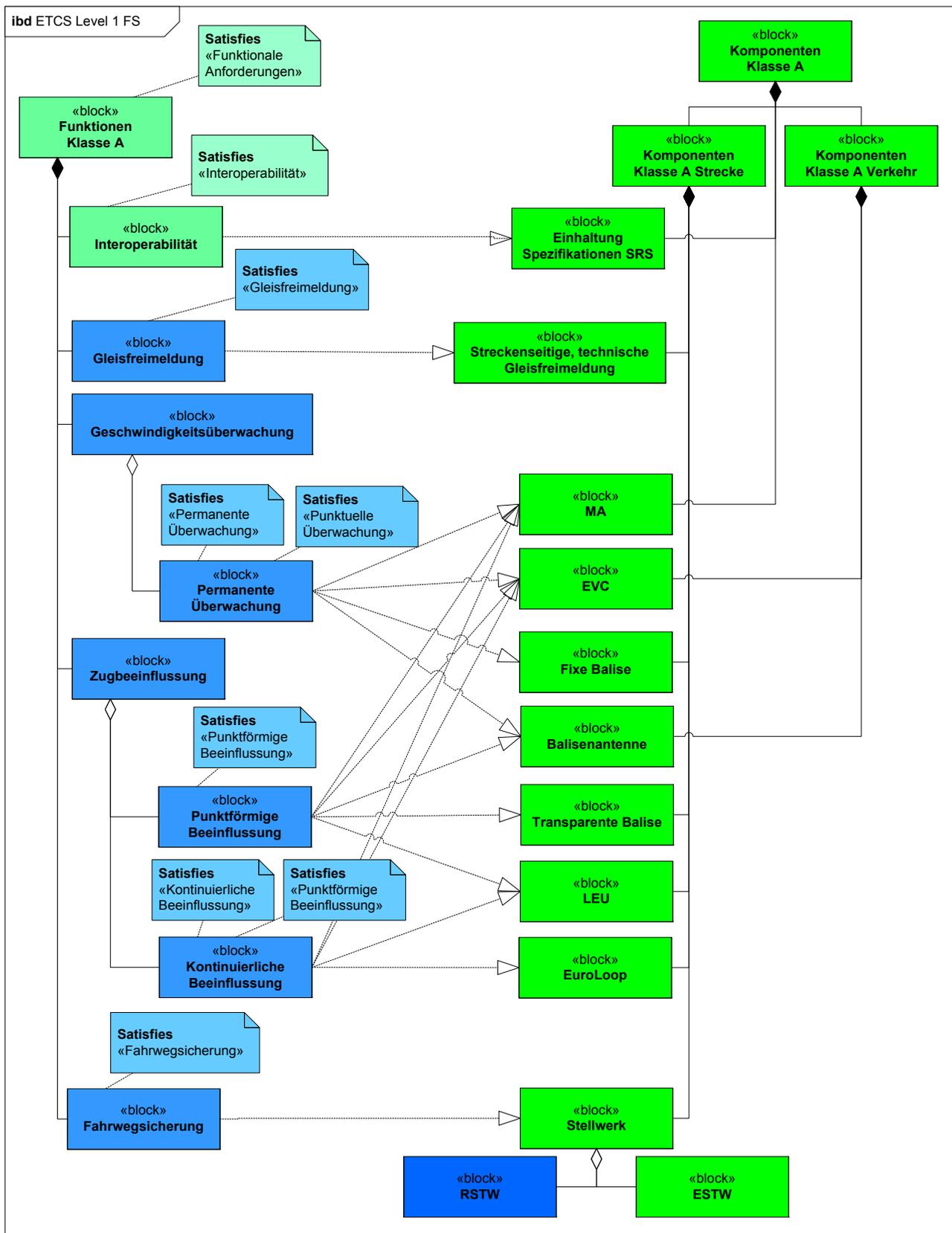


Abbildung 88: Funktionserfüllung bei ETCS Level 1 FS

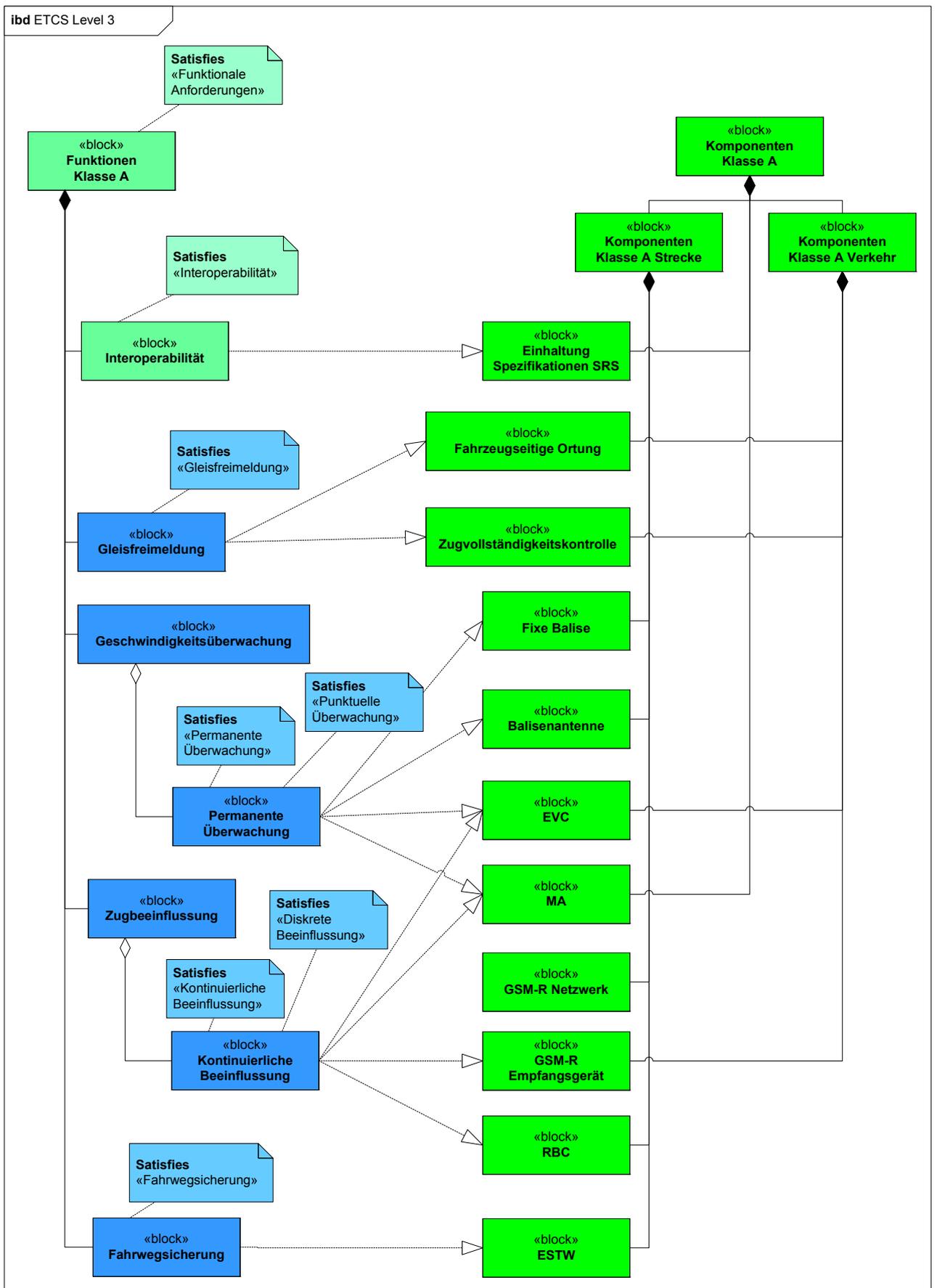


Abbildung 89: Funktionserfüllung bei ETCS Level 3

A.3 Optimierung Migrationsrangfolge

A.3.1 Modellierung

A.3.1.1 Symmetrische Verknüpfungsmatrix, Korridor

	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab	B1	B2	B3	B4	B5	P-Bhf bc	G-Bhf bc	C1	C2	C3	C4	C5	P-Bhf cc	G-Bhf cc
P-Bhf aa	0,000	0,389	0,325	0,277	0,266	0,287	0,536	0,000	0,104	0,094	0,086	0,090	0,111	0,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
G-Bhf aa	0,000	0,841	0,753	0,735	0,714	0,748	0,000	0,667	0,602	0,547	0,506	0,537	0,635	0,000	0,606	0,579	0,580	0,618	0,666	0,000	0,750	0,000	0,750
A1	0,389	0,841	0,931	0,893	0,842	0,833	0,331	0,603	0,604	0,568	0,535	0,551	0,614	0,152	0,550	0,468	0,453	0,512	0,516	0,573	0,000	0,631	0,000
A2	0,325	0,753	0,931	0,969	0,917	0,900	0,290	0,694	0,691	0,658	0,625	0,642	0,699	0,134	0,641	0,549	0,542	0,602	0,596	0,530	0,000	0,565	0,000
A3	0,277	0,735	0,893	0,969	0,952	0,939	0,281	0,727	0,732	0,698	0,665	0,684	0,741	0,130	0,674	0,553	0,546	0,599	0,594	0,522	0,000	0,551	0,000
A4	0,266	0,714	0,842	0,917	0,952	0,962	0,273	0,807	0,766	0,738	0,705	0,715	0,764	0,126	0,750	0,615	0,619	0,574	0,558	0,504	0,000	0,536	0,000
A5	0,287	0,748	0,833	0,900	0,939	0,962	0,320	0,888	0,788	0,766	0,734	0,730	0,767	0,133	0,823	0,667	0,620	0,571	0,549	0,514	0,000	0,561	0,000
P-Bhf ab	0,104	0,094	0,086	0,090	0,094	0,086	0,000	0,382	0,344	0,290	0,309	0,374	0,642	0,000	0,121	0,108	0,119	0,129	0,140	0,236	0,000	0,000	0,000
G-Bhf ab	0,000	0,667	0,603	0,694	0,727	0,807	0,888	0,000	0,891	0,861	0,827	0,845	0,896	0,000	0,944	0,788	0,717	0,626	0,613	0,547	0,000	0,567	0,000
B1	0,094	0,547	0,568	0,698	0,738	0,766	0,344	0,861	0,987	0,987	0,935	0,925	0,949	0,346	0,859	0,724	0,697	0,664	0,622	0,603	0,093	0,539	0,000
B2	0,086	0,506	0,535	0,625	0,665	0,705	0,734	0,290	0,827	0,935	0,953	0,988	0,977	0,321	0,834	0,700	0,673	0,628	0,587	0,559	0,082	0,490	0,000
B3	0,090	0,537	0,551	0,642	0,684	0,715	0,730	0,309	0,845	0,925	0,944	0,988	0,987	0,382	0,866	0,711	0,697	0,668	0,617	0,603	0,080	0,537	0,000
B4	0,111	0,635	0,614	0,699	0,741	0,764	0,767	0,374	0,896	0,949	0,941	0,977	0,987	0,460	0,910	0,754	0,742	0,734	0,683	0,688	0,101	0,635	0,000
B5	0,241	0,000	0,152	0,134	0,130	0,126	0,133	0,642	0,000	0,346	0,313	0,321	0,382	0,460	0,000	0,267	0,239	0,186	0,159	0,172	0,284	0,000	0,000
P-Bhf bc	0,000	0,606	0,550	0,641	0,674	0,750	0,823	0,000	0,944	0,859	0,834	0,852	0,866	0,910	0,000	0,834	0,772	0,693	0,674	0,618	0,000	0,638	0,000
G-Bhf bc	0,000	0,579	0,468	0,549	0,553	0,615	0,667	0,121	0,788	0,724	0,700	0,712	0,711	0,754	0,267	0,834	0,951	0,890	0,832	0,834	0,163	0,772	0,000
C1	0,000	0,529	0,453	0,542	0,546	0,619	0,620	0,108	0,717	0,697	0,673	0,689	0,697	0,742	0,239	0,772	0,951	0,914	0,856	0,788	0,136	0,705	0,000
C2	0,000	0,580	0,512	0,602	0,599	0,574	0,571	0,119	0,626	0,664	0,628	0,646	0,668	0,734	0,186	0,693	0,890	0,914	0,968	0,865	0,153	0,774	0,000
C3	0,000	0,618	0,516	0,596	0,594	0,558	0,549	0,129	0,613	0,622	0,587	0,601	0,617	0,683	0,159	0,674	0,832	0,856	0,968	0,925	0,216	0,824	0,000
C4	0,000	0,666	0,573	0,530	0,522	0,504	0,514	0,140	0,547	0,603	0,559	0,574	0,603	0,688	0,172	0,618	0,834	0,788	0,865	0,925	0,235	0,889	0,000
P-Bhf cc	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,236	0,000	0,093	0,082	0,075	0,080	0,101	0,284	0,000	0,163	0,136	0,153	0,216	0,235	0,000	0,000
G-Bhf cc	0,000	0,750	0,631	0,565	0,551	0,536	0,561	0,000	0,567	0,539	0,490	0,506	0,537	0,635	0,000	0,638	0,772	0,705	0,774	0,824	0,889	0,000	0,000

A.3.1.2 Asymmetrische Verknüpfungsmatrix, Korridor

	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab	B1	B2	B3	B4	B5	P-Bhf bc	G-Bhf bc	C1	C2	C3	C4	C5	P-Bhf cc	G-Bhf cc
P-Bhf aa	2,000	0,000	3,000	4,000	4,191	3,088	1,985	2,647	0,000	1,235	1,647	1,956	1,441	0,926	1,235	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
G-Bhf aa	0,000	2,000	1,800	2,200	2,500	2,000	1,500	0,000	3,000	1,710	2,090	2,375	1,900	1,425	0,000	2,850	1,125	1,500	1,875	1,350	1,650	0,000	1,500
A1	0,447	1,579	2,000	2,500	2,774	2,171	1,568	0,526	2,456	1,579	1,974	2,270	1,776	1,283	0,246	2,333	0,855	1,184	1,513	1,053	1,316	0,000	1,184
A2	0,354	1,146	1,484	2,000	2,180	1,776	1,372	0,391	1,958	1,354	1,625	1,828	1,490	1,151	0,182	1,875	0,819	1,060	1,301	0,964	0,938	0,000	0,859
A3	0,297	1,042	1,318	1,744	2,000	1,667	1,333	0,359	1,786	1,294	1,519	1,688	1,406	1,125	0,168	1,714	0,771	0,964	1,156	0,886	0,844	0,000	0,781
A4	0,292	1,111	1,375	1,894	2,222	2,000	1,500	0,375	2,375	1,550	1,894	2,153	1,722	1,292	0,175	2,292	0,938	1,250	1,285	0,925	0,917	0,000	0,833
A5	0,335	1,491	1,776	2,619	3,180	2,683	2,000	0,533	3,975	2,229	2,914	3,429	2,571	1,714	0,226	3,851	1,292	1,752	1,839	1,195	1,267	0,000	1,118
P-Bhf ab	0,672	0,000	0,896	1,119	1,287	1,007	0,800	2,000	0,000	1,433	1,791	1,888	1,478	1,067	1,313	0,000	0,291	0,403	0,515	0,358	0,448	0,269	0,000
G-Bhf ab	0,000	0,857	0,800	1,074	1,225	1,221	1,143	0,000	2,000	1,360	1,554	1,700	1,457	1,214	0,000	1,943	1,000	1,093	1,025	0,820	0,777	0,000	0,729
B1	0,114	0,929	0,978	1,413	1,688	1,516	1,219	0,522	2,587	2,000	2,500	2,813	2,201	1,590	0,478	2,587	1,095	1,394	1,469	1,022	1,087	0,098	0,832
B2	0,099	0,741	0,798	1,106	1,293	1,209	1,040	0,426	1,929	1,631	2,000	2,202	1,794	1,356	0,390	1,929	0,934	1,112	1,125	0,833	0,851	0,085	0,663
B3	0,090	0,643	0,701	0,950	1,096	1,049	0,934	0,342	1,611	1,401	1,681	2,000	1,667	1,306	0,381	1,706	0,893	1,032	1,036	0,794	0,804	0,077	0,643
B4	0,097	0,749	0,798	1,127	1,330	1,222	1,020	0,390	2,010	1,596	1,994	2,426	2,000	1,470	0,488	2,128	0,975	1,202	1,256	0,904	0,954	0,083	0,749
B5	0,127	1,146	1,176	1,777	2,171	1,869	1,387	0,575	3,417	2,352	3,075	3,879	3,000	2,000	0,719	3,618	1,327	1,839	2,050	1,333	1,504	0,109	1,146
P-Bhf bc	0,300	0,000	0,400	0,500	0,575	0,450	0,325	1,257	0,000	1,257	1,571	2,013	1,768	1,277	2,000	0,000	0,627	0,868	0,780	0,429	0,536	0,321	0,000
G-Bhf bc	0,000	0,770	0,719	0,973	1,111	1,115	1,047	0,000	1,838	1,286	1,470	1,703	1,459	1,216	0,000	2,000	1,047	1,155	1,111	0,889	0,865	0,000	0,811
C1	0,000	1,192	1,033	1,666	1,960	1,788	1,377	0,207	3,709	2,135	2,792	3,497	2,623	1,748	0,465	4,106	2,000	2,801	2,993	1,877	2,139	0,179	1,589
C2	0,000	0,816	0,735	1,107	1,259	1,224	0,959	0,147	2,082	1,396	1,706	2,075	1,660	1,245	0,331	3,327	1,439	2,000	2,024	1,408	1,422	0,143	1,088
C3	0,000	0,840	0,773	1,119	1,244	1,036	0,829	0,155	1,608	1,211	1,422	1,714	1,429	1,143	0,245	1,843	1,266	1,667	2,000	1,482	1,437	0,160	1,120
C4	0,000	1,140	1,014	1,563	1,797	1,406	1,016	0,203	2,424	1,588	1,985	2,477	1,938	1,400	0,253	2,779	1,496	2,185	2,792	2,000	2,078	0,233	1,520
C5	0,000	1,118	1,016	1,220	1,372	1,118	0,864	0,203	1,843	1,355	1,626	2,012	1,640	1,267	0,254	2,168	1,368	1,770	2,172	1,667	2,000	0,249	1,491
P-Bhf cc	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,957	0,000	1,957	2,609	3,098	2,283	1,467	2,446	0,000	1,834	2,853	3,872	3,000	4,000	2,000	0,000
G-Bhf cc	0,000	1,500	1,350	1,650	1,875	1,500	1,125	0,000	2,550	1,530	1,870	2,375	1,900	1,425	0,000	3,000	1,500	2,000	2,500	1,800	2,200	0,000	2,000

A.3.1.3 Symmetrische Verknüpfungsmatrix, Netz

	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab	B1	B2	B3	B4	B5	P-Bhf bc	G-Bhf bc	C1	C2	C3	C4	C5	P-Bhf cc	G-Bhf cc
P-Bhf aa	0,000	0,378	0,316	0,252	0,263	0,306	0,455	0,000	0,115	0,103	0,098	0,115	0,140	0,292	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
G-Bhf aa	0,848	0,762	0,707	0,730	0,795	0,000	0,649	0,565	0,519	0,499	0,564	0,636	0,000	0,729	0,661	0,578	0,563	0,594	0,563	0,594	0,648	0,000	0,723
A1	0,378	0,848	0,934	0,853	0,854	0,877	0,300	0,590	0,577	0,550	0,537	0,587	0,624	0,162	0,656	0,538	0,500	0,502	0,503	0,564	0,000	0,617	0,617
A2	0,316	0,762	0,934	0,931	0,925	0,934	0,268	0,678	0,659	0,636	0,625	0,670	0,695	0,138	0,740	0,615	0,585	0,589	0,585	0,535	0,000	0,570	0,570
A3	0,252	0,707	0,853	0,931	0,989	0,988	0,248	0,758	0,639	0,622	0,613	0,649	0,663	0,125	0,702	0,684	0,661	0,669	0,659	0,540	0,000	0,568	0,568
A4	0,263	0,730	0,854	0,925	0,989	0,993	0,255	0,773	0,620	0,603	0,596	0,634	0,647	0,133	0,719	0,692	0,669	0,682	0,672	0,571	0,000	0,608	0,608
A5	0,306	0,795	0,877	0,934	0,988	0,993	0,306	0,766	0,602	0,586	0,580	0,622	0,636	0,154	0,758	0,675	0,651	0,662	0,654	0,584	0,000	0,639	0,639
P-Bhf ab	0,455	0,000	0,300	0,268	0,248	0,255	0,000	0,000	0,419	0,386	0,343	0,356	0,403	0,642	0,000	0,206	0,180	0,115	0,128	0,141	0,247	0,000	0,000
G-Bhf ab	0,000	0,649	0,590	0,678	0,758	0,773	0,766	0,000	0,731	0,718	0,712	0,638	0,644	0,000	0,784	0,887	0,870	0,882	0,841	0,738	0,000	0,765	0,765
B1	0,115	0,565	0,577	0,659	0,639	0,620	0,602	0,419	0,731	0,986	0,957	0,882	0,882	0,398	0,835	0,698	0,689	0,712	0,691	0,686	0,103	0,639	0,639
B2	0,103	0,519	0,550	0,636	0,622	0,603	0,586	0,386	0,718	0,986	0,973	0,890	0,861	0,355	0,784	0,684	0,680	0,700	0,675	0,657	0,091	0,600	0,600
B3	0,098	0,499	0,537	0,625	0,613	0,596	0,580	0,343	0,712	0,957	0,973	0,913	0,883	0,375	0,758	0,679	0,676	0,695	0,669	0,643	0,086	0,583	0,583
B4	0,115	0,564	0,587	0,670	0,649	0,634	0,622	0,356	0,638	0,882	0,890	0,913	0,983	0,493	0,833	0,622	0,609	0,624	0,607	0,579	0,102	0,521	0,521
B5	0,140	0,636	0,624	0,695	0,663	0,647	0,636	0,403	0,644	0,882	0,861	0,883	0,983	0,593	0,899	0,628	0,609	0,628	0,616	0,609	0,129	0,565	0,565
P-Bhf bc	0,292	0,000	0,162	0,138	0,125	0,133	0,154	0,642	0,000	0,398	0,355	0,375	0,493	0,593	0,000	0,126	0,103	0,099	0,116	0,126	0,280	0,000	0,000
G-Bhf bc	0,000	0,729	0,656	0,740	0,702	0,719	0,758	0,000	0,784	0,835	0,784	0,758	0,833	0,899	0,000	0,780	0,715	0,698	0,722	0,635	0,000	0,680	0,680
C1	0,000	0,661	0,538	0,615	0,684	0,692	0,675	0,206	0,887	0,698	0,684	0,679	0,622	0,628	0,126	0,780	0,975	0,959	0,923	0,894	0,155	0,850	0,850
C2	0,000	0,578	0,500	0,585	0,661	0,669	0,651	0,180	0,870	0,689	0,680	0,676	0,609	0,609	0,103	0,715	0,975	0,980	0,935	0,839	0,122	0,773	0,773
C3	0,000	0,563	0,502	0,589	0,669	0,682	0,671	0,115	0,882	0,712	0,700	0,695	0,624	0,628	0,099	0,698	0,959	0,980	0,959	0,840	0,117	0,766	0,766
C4	0,000	0,594	0,503	0,585	0,659	0,672	0,662	0,128	0,841	0,691	0,675	0,669	0,607	0,616	0,116	0,722	0,923	0,935	0,959	0,911	0,171	0,829	0,829
C5	0,000	0,648	0,564	0,535	0,540	0,571	0,584	0,141	0,738	0,686	0,657	0,643	0,579	0,609	0,126	0,635	0,894	0,839	0,840	0,911	0,191	0,912	0,912
P-Bhf cc	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,247	0,000	0,103	0,091	0,086	0,102	0,129	0,280	0,000	0,155	0,122	0,117	0,171	0,191	0,000	0,000
G-Bhf cc	0,000	0,723	0,617	0,570	0,568	0,608	0,639	0,000	0,765	0,639	0,600	0,583	0,521	0,565	0,000	0,680	0,850	0,773	0,766	0,829	0,912	0,000	0,000

A.3.1.4 Asymmetrische Verknüpfungsmatrix, Netz

	P-Bhf aa	G-Bhf aa	A1	A2	A3	A4	A5	P-Bhf ab	G-Bhf ab	B1	B2	B3	B4	B5	P-Bhf bc	G-Bhf bc	C1	C2	C3	C4	C5	P-Bhf cc	G-Bhf cc	
P-Bhf aa	2,000	0,000	3,000	4,000	4,191	3,088	1,985	2,647	0,000	1,235	1,647	1,956	1,441	0,926	1,235	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
G-Bhf aa	0,000	2,000	1,800	2,200	2,500	2,000	1,500	0,000	3,000	1,457	1,781	2,024	1,619	1,214	0,000	2,429	1,286	1,714	2,143	1,457	1,781	0,000	1,619	
A1	0,432	1,602	2,000	2,500	2,778	2,174	1,570	0,508	2,492	1,390	1,737	1,998	1,564	1,129	0,237	2,017	0,992	1,373	1,754	1,153	1,441	0,000	1,297	
A2	0,343	1,167	1,490	2,000	2,182	1,778	1,374	0,379	1,980	1,212	1,455	1,636	1,333	1,030	0,177	1,657	0,923	1,194	1,466	1,035	1,030	0,000	0,944	
A3	0,268	0,986	1,231	1,623	2,000	1,667	1,333	0,324	1,840	1,037	1,217	1,352	1,127	0,901	0,151	1,347	0,939	1,174	1,408	1,037	0,913	0,000	0,845	
A4	0,288	1,151	1,405	1,929	2,432	2,000	1,500	0,370	2,384	1,184	1,447	1,644	1,315	0,986	0,173	1,685	1,068	1,425	1,781	1,233	1,145	0,000	1,041	
A5	0,362	1,691	1,989	2,921	3,812	2,940	2,000	0,576	3,893	1,675	2,191	2,577	1,933	1,289	0,244	2,752	1,396	2,094	2,792	1,745	1,734	0,000	1,530	
P-Bhf ab	0,549	0,000	0,732	0,915	1,052	0,823	0,654	2,000	0,000	1,268	1,585	1,683	1,207	0,872	1,073	0,000	0,456	0,631	0,526	0,366	0,457	0,274	0,000	
G-Bhf ab	0,000	0,829	0,774	1,032	1,289	1,145	0,954	0,000	2,000	1,050	1,200	1,313	0,967	0,806	0,000	1,289	1,118	1,342	1,566	1,179	1,095	0,000	1,026	
B1	0,127	0,922	0,988	1,446	1,663	1,301	0,940	0,627	2,404	2,000	2,500	2,806	1,925	1,390	0,530	2,066	1,116	1,545	1,974	1,325	1,446	0,108	1,139	
B2	0,110	0,733	0,804	1,129	1,271	1,035	0,800	0,510	1,788	1,627	2,000	2,197	1,575	1,183	0,431	1,537	0,950	1,229	1,509	1,078	1,129	0,094	0,906	
B3	0,104	0,663	0,735	1,011	1,123	0,936	0,749	0,430	1,556	1,453	1,747	2,000	1,472	1,146	0,439	1,337	0,889	1,111	1,333	0,986	1,011	0,089	0,819	
B4	0,125	0,866	0,940	1,345	1,529	1,223	0,917	0,504	1,873	1,628	2,046	2,404	2,000	1,462	0,631	1,873	0,936	1,248	1,561	1,078	1,121	0,107	0,866	
B5	0,165	1,333	1,393	2,133	2,510	1,882	1,255	0,748	3,203	2,413	3,156	3,843	3,000	2,000	0,935	3,203	1,281	1,922	2,562	1,597	1,778	0,141	1,333	
P-Bhf bc	0,382	0,000	0,509	0,636	0,732	0,573	0,414	1,600	0,000	1,600	2,000	2,561	2,250	1,625	2,000	0,000	0,355	0,491	0,627	0,436	0,545	0,327	0,000	
G-Bhf bc	0,000	1,041	0,971	1,339	1,464	1,255	1,046	0,000	2,000	1,400	1,600	1,750	1,500	1,250	0,000	2,000	1,097	1,316	1,536	1,171	1,110	0,000	1,041	
C1	0,000	1,358	1,177	1,839	2,516	1,962	1,308	0,376	4,277	1,864	2,438	2,868	1,849	1,233	0,196	2,704	2,000	3,000	3,799	2,338	2,545	0,170	1,962	
C2	0,000	0,873	0,785	1,147	1,515	1,261	0,945	0,251	2,473	1,244	1,520	1,727	1,188	0,891	0,131	1,564	1,445	2,000	2,379	1,625	1,587	0,127	1,261	
C3	0,000	0,764	0,703	0,986	1,274	1,104	0,883	0,146	2,021	1,113	1,307	1,452	1,040	0,832	0,117	1,278	1,282	1,667	2,000	1,455	1,364	0,121	1,104	
C4	0,000	1,004	0,892	1,345	1,811	1,476	1,066	0,197	2,940	1,444	1,804	2,075	1,388	1,002	0,157	1,883	1,525	2,200	2,811	2,000	2,008	0,181	1,535	
C5	0,000	1,019	0,926	1,111	1,324	1,138	0,880	0,204	2,266	1,307	1,569	1,765	1,198	0,926	0,163	1,481	1,377	1,782	1,288	1,667	2,000	0,200	1,558	
P-Bhf cc	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,446	0,000	1,957	2,609	3,098	2,283	1,467	1,957	0,000	1,834	2,853	3,872	3,000	4,000	2,000	0,000	
G-Bhf cc	0,000	1,308	1,177	1,438	1,731	1,462	1,096	0,000	3,000	1,454	1,777	2,019	1,308	0,981	0,000	1,962	1,500	2,000	2,500	1,800	2,200	0,000	2,000	

A.3.2 Ergebnisse

A.3.2.1 Korridor, hohe kritische Masse

Statischer Ansatz

symmetrische Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	13	0	0	0
2	12	0	0	0
3	14	0	0	0
4	11	20	0	0
5	10	20	0	0
6	16	20	0	0
7	9	40	0	0
8	7	90	0	0
9	6	90	0	0
10	5	110	0	0
11	4	110	0	0
12	3	190	0	0
13	2	210	0	0
14	17	310	0	0
15	18	310	0	0
16	19	380	0	0
17	20	410	0	0
18	21	790	90000	90000
19	23	810	184000	274000
20	15	940	184000	458000
21	8	1275	658475	1116475
22	1	1295	723075	1839550
23	22	1312	778115	2617665

Statischer Ansatz*asymmetrischer Verknüpfung*

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	5	0	0	0
2	9	0	0	0
3	16	0	0	0
4	4	0	0	0
5	12	0	0	0
6	6	0	0	0
7	11	0	0	0
8	13	20	0	0
9	10	60	0	0
10	14	60	0	0
11	19	60	0	0
12	18	160	0	0
13	21	160	0	0
14	20	260	0	0
15	23	360	0	0
16	17	410	0	0
17	7	710	20000	20000
18	3	790	94000	114000
19	2	810	184000	298000
20	15	940	184000	482000
21	8	1275	658475	1140475
22	1	1295	723075	1863550
23	22	1312	778115	2641665

Dynamischer Ansatz*Standard*

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	12	0	0	0
2	16	0	0	0
3	9	0	0	0
4	11	0	0	0
5	13	20	0	0
6	5	20	0	0
7	10	40	0	0
8	19	40	0	0
9	18	40	0	0
10	6	60	0	0
11	4	60	0	0
12	21	60	0	0
13	15	60	0	0
14	14	215	0	0
15	8	325	0	0
16	20	485	0	0
17	22	517	1840	1840
18	17	707	1840	3680
19	3	777	15840	19520
20	2	1177	348540	368060
21	23	1197	595990	964050
22	1	1297	744590	1708640
23	7	1312	778115	2486755

Dynamischer Ansatz

nur Wichtung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	12	0	0	0
2	16	0	0	0
3	9	0	0	0
4	11	0	0	0
5	13	20	0	0
6	5	20	0	0
7	10	40	0	0
8	19	40	0	0
9	18	40	0	0
10	6	60	0	0
11	4	60	0	0
12	21	60	0	0
13	15	60	0	0
14	14	215	0	0
15	8	325	0	0
16	20	485	0	0
17	3	555	0	0
18	17	760	14000	14000
19	7	1235	270100	284100
20	2	1255	464225	748325
21	23	1275	658475	1406800
22	22	1292	713515	2120315
23	1	1312	778115	2898430

A.3.2.2 Netz, hohe kritische Masse

statischer Ansatz

symmetrische Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	7	0	0	0
2	6	0	0	0
3	5	0	0	0
4	4	0	0	0
5	3	0	0	0
6	2	0	0	0
7	9	20	0	0
8	17	20	0	0
9	18	20	0	0
10	19	90	0	0
11	20	120	0	0
12	21	180	0	0
13	23	220	0	0
14	16	220	0	0
15	14	220	0	0
16	13	220	0	0
17	12	520	0	0
18	11	810	172000	172000
19	10	810	172000	344000
20	15	865	172000	516000
21	8	1275	634475	1150475
22	1	1295	701075	1851550
23	22	1312	770115	2621665

statischer Ansatz

asymmetrischer Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	18	0	0	0
4	12	0	0	0
5	11	0	0	0
6	10	0	0	0
7	16	0	0	0
8	13	60	0	0
9	5	60	0	0
10	6	60	0	0
11	4	60	0	0
12	20	160	0	0
13	21	160	0	0
14	2	160	0	0
15	23	320	0	0
16	17	730	26000	26000
17	7	790	75000	101000
18	3	810	172000	273000
19	14	810	172000	445000
20	15	865	172000	617000
21	8	1275	634475	1251475
22	1	1295	701075	1952550
23	22	1312	770115	2722665

dynamischer Ansatz

Standard

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	12	0	0	0
4	11	0	0	0
5	21	0	0	0
6	5	0	0	0
7	18	0	0	0
8	13	20	0	0
9	20	50	0	0
10	10	50	0	0
11	8	90	0	0
12	4	90	0	0
13	6	90	0	0
14	16	200	0	0
15	23	360	0	0
16	2	360	0	0
17	7	825	75000	75000
18	3	945	172000	247000
19	15	1105	280375	527375
20	17	1220	500975	1028350
21	14	1275	634475	1662825
22	22	1292	703515	2366340
23	1	1312	770115	3136455

dynamischer Ansatz

nur Wichtung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	12	0	0	0
4	11	0	0	0
5	21	0	0	0
6	5	0	0	0
7	18	0	0	0
8	13	20	0	0
9	20	50	0	0
10	10	50	0	0
11	8	90	0	0
12	4	90	0	0
13	6	90	0	0
14	16	200	0	0
15	23	360	0	0
16	2	360	0	0
17	3	780	70000	70000
18	17	905	172000	242000
19	15	1055	292000	534000
20	14	1180	509700	1043700
21	7	1275	634475	1678175
22	22	1292	703515	2381690
23	1	1312	770115	3151805

A.3.2.3 Korridor, niedrige kritische Masse

statischer Ansatz

symmetrische Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	13	0	0	0
2	12	45	0	0
3	14	75	0	0
4	11	165	0	0
5	10	205	0	0
6	16	375	0	0
7	9	565	0	0
8	7	565	0	0
9	6	635	0	0
10	5	955	90000	90000
11	2	955	90000	180000
12	4	1035	174000	354000
13	3	1055	238600	592600
14	1	1055	238600	831200
15	17	1055	238600	1069800
16	18	1195	481300	1551100
17	19	1265	575300	2126400
18	23	1265	575300	2701700
19	20	1280	689550	3391250
20	15	1280	689550	4080800
21	21	1297	744590	4825390
22	22	1297	744590	5569980
23	8	1312	778115	6348095

statischer Ansatz

asymmetrischer Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	5	0	0	0
2	9	0	0	0
3	16	0	0	0
4	4	20	0	0
5	12	190	0	0
6	6	420	0	0
7	11	530	0	0
8	13	985	174000	174000
9	2	985	174000	348000
10	10	1005	174000	522000
11	14	1035	174000	696000
12	19	1135	416700	1112700
13	18	1205	510700	1623400
14	23	1205	510700	2134100
15	21	1220	555325	2689425
16	20	1237	610365	3299790
17	22	1237	610365	3910155
18	17	1277	679990	4590145
19	15	1277	679990	5270135
20	7	1277	679990	5950125
21	3	1297	744590	6694715
22	1	1297	744590	7439305
23	8	1312	778115	8217420

dynamischer Ansatz

Standard

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	12	0	0	0
2	16	0	0	0
3	9	70	0	0
4	11	210	0	0
5	13	445	0	0
6	5	515	0	0
7	10	535	0	0
8	4	925	90000	90000
9	2	925	90000	180000
10	3	1025	238600	418600
11	6	1025	238600	657200
12	1	1025	238600	895800
13	8	1040	258725	1154525
14	7	1040	258725	1413250
15	19	1140	439200	1852450
16	18	1210	533200	2385650
17	23	1210	533200	2918850
18	15	1295	723075	3641925
19	14	1295	723075	4365000
20	17	1295	723075	5088075
21	21	1295	723075	5811150
22	20	1312	778115	6589265
23	22	1312	778115	7367380

dynamischer Ansatz

nur Wichtung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	12	0	0	0
2	16	0	0	0
3	9	0	0	0
4	11	0	0	0
5	13	20	0	0
6	5	20	0	0
7	10	20	0	0
8	4	925	90000	90000
9	2	925	90000	180000
10	3	1025	238600	418600
11	6	1025	238600	657200
12	1	1025	238600	895800
13	8	1040	258725	1154525
14	7	1040	258725	1413250
15	19	1140	439200	1852450
16	18	1210	533200	2385650
17	23	1210	533200	2918850
18	15	1295	723075	3641925
19	14	1295	723075	4365000
20	17	1295	723075	5088075
21	21	1295	723075	5811150
22	20	1312	778115	6589265
23	22	1312	778115	7367380

A.3.2.4 Netz, niedrige kritische Masse

statischer Ansatz

symmetrische Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	7	0	0	0
2	6	0	0	0
3	5	0	0	0
4	4	100	0	0
5	3	120	0	0
6	2	140	0	0
7	9	270	0	0
8	17	270	0	0
9	18	350	0	0
10	19	770	21000	21000
11	20	865	21000	42000
12	21	882	21000	63000
13	23	922	47000	110000
14	16	942	47000	157000
15	14	942	47000	204000
16	13	1122	517390	721390
17	22	1122	517390	1238780
18	1	1122	517390	1756170
19	12	1167	517390	2273560
20	11	1277	650890	2924450
21	15	1277	650890	3575340
22	10	1297	735090	4310430
23	8	1312	770115	5080545

statischer Ansatz

asymmetrischer Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	18	100	0	0
4	12	180	0	0
5	11	260	0	0
6	10	410	0	0
7	16	480	0	0
8	13	905	49000	49000
9	5	945	49000	98000
10	6	1055	197325	295325
11	4	1175	410075	705400
12	2	1175	410075	1115475
13	20	1190	468950	1584425
14	23	1190	468950	2053375
15	21	1207	537990	2591365
16	22	1207	537990	3129355
17	17	1247	599115	3728470
18	7	1247	599115	4327585
19	3	1267	665715	4993300
20	1	1267	665715	5659015
21	14	1297	735090	6394105
22	15	1297	735090	7129195
23	8	1312	770115	7899310

dynamischer Ansatz

Standard

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	12	0	0	0
4	11	160	0	0
5	21	180	0	0
6	20	362	1840	1840
7	22	362	1840	3680
8	18	432	1840	5520
9	5	862	153915	159435
10	23	862	153915	313350
11	8	1027	215040	528390
12	17	1027	215040	743430
13	16	1067	264040	1007470
14	4	1237	570015	1577485
15	6	1237	570015	2147500
16	7	1237	570015	2717515
17	10	1237	570015	3287530
18	2	1237	570015	3857545
19	1	1257	636615	4494160
20	3	1257	636615	5130775
21	13	1282	700740	5831515
22	14	1312	770115	6601630
23	15	1312	770115	7371745

dynamischer Ansatz

nur Wichtung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	12	0	0	0
4	11	160	0	0
5	21	180	0	0
6	5	250	0	0
7	18	545	0	0
8	13	960	84875	84875
9	23	960	84875	169750
10	20	977	153915	323665
11	22	977	153915	477580
12	10	1037	202915	680495
13	16	1037	202915	883410
14	8	1162	412365	1295775
15	17	1162	412365	1708140
16	4	1262	634140	2342280
17	2	1262	634140	2976420
18	6	1262	634140	3610560
19	7	1262	634140	4244700
20	3	1282	700740	4945440
21	1	1282	700740	5646180
22	15	1312	770115	6416295
23	14	1312	770115	7186410

A.3.2.5 Korridor, differenzierte kritische Masse

statischer Ansatz

symmetrische Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	13	0	0	0
2	12	0	0	0
3	14	0	0	0
4	11	70	0	0
5	10	70	0	0
6	16	90	0	0
7	9	260	0	0
8	7	260	0	0
9	6	330	0	0
10	5	480	0	0
11	4	540	0	0
12	3	540	0	0
13	2	840	20000	20000
14	17	840	20000	40000
15	18	900	20000	60000
16	19	1000	90000	150000
17	20	1065	228625	378625
18	21	1065	228625	607250
19	23	1065	228625	835875
20	15	1160	284250	1120125
21	8	1275	658475	1778600
22	1	1295	723075	2501675
23	22	1312	778115	3279790

statischer Ansatz

asymmetrischer Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	5	0	0	0
2	9	0	0	0
3	16	0	0	0
4	4	0	0	0
5	12	0	0	0
6	6	60	0	0
7	11	170	0	0
8	13	450	0	0
9	10	540	0	0
10	14	540	0	0
11	19	600	0	0
12	18	960	90000	90000
13	21	1035	184000	274000
14	20	1065	228625	502625
15	23	1065	228625	731250
16	17	1065	228625	959875
17	7	1065	228625	1188500
18	3	1065	228625	1417125
19	2	1065	228625	1645750
20	15	1160	284250	1930000
21	8	1275	658475	2588475
22	1	1295	723075	3311550
23	22	1312	778115	4089665

dynamischer Ansatz

Standard

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Zugkilometer ETCS	Bewertung
1	12	0	0	0
2	16	0	0	0
3	9	0	0	0
4	11	20	0	0
5	13	140	0	0
6	6	160	0	0
7	10	260	0	0
8	19	260	0	0
9	18	450	0	0
10	6	600	0	0
11	4	660	0	0
12	21	1035	184000	184000
13	23	1035	184000	368000
14	2	1035	184000	552000
15	20	1065	228625	780625
16	22	1082	283665	1064290
17	15	1082	283665	1347955
18	8	1142	376865	1724820
19	14	1197	526365	2251185
20	17	1237	595990	2847175
21	3	1237	595990	3443165
22	1	1297	744590	4187755
23	7	1312	778115	4965870

dynamischer Ansatz

nur Wichtung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Zugkilometer ETCS	Bewertung
1	12	0	0	0
2	16	0	0	0
3	9	0	0	0
4	11	20	0	0
5	13	140	0	0
6	6	160	0	0
7	10	260	0	0
8	19	260	0	0
9	18	450	0	0
10	6	600	0	0
11	4	660	0	0
12	21	1035	184000	184000
13	23	1035	184000	368000
14	2	1035	184000	552000
15	15	1035	184000	736000
16	14	1090	184000	920000
17	20	1120	228625	1148625
18	8	1180	471325	1619950
19	3	1180	471325	2091275
20	17	1220	540950	2632225
21	7	1275	658475	3290700
22	22	1292	713515	4004215
23	1	1312	778115	4782330

A.3.2.6 Netz, differenzierte kritische Masse

statischer Ansatz

symmetrische Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	7	0	0	0
2	6	0	0	0
3	5	0	0	0
4	4	40	0	0
5	3	40	0	0
6	2	60	0	0
7	9	80	0	0
8	17	80	0	0
9	18	130	0	0
10	19	190	0	0
11	20	275	0	0
12	21	275	0	0
13	23	275	0	0
14	16	645	0	0
15	14	645	0	0
16	13	875	21000	21000
17	12	975	230875	251875
18	11	1065	230875	482750
19	10	1065	230875	713625
20	15	1120	230875	944500
21	8	1275	634475	1578975
22	1	1295	701075	2280050
23	22	1312	770115	3050165

statischer Ansatz

asymmetrischer Verknüpfung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	18	0	0	0
4	12	0	0	0
5	11	20	0	0
6	10	70	0	0
7	16	110	0	0
8	13	230	0	0
9	5	300	0	0
10	6	460	0	0
11	4	540	0	0
12	20	985	49000	49000
13	21	1065	230875	279875
14	2	1065	230875	510750
15	23	1065	230875	741625
16	17	1065	230875	972500
17	7	1065	230875	1203375
18	3	1065	230875	1434250
19	14	1065	230875	1665125
20	15	1120	230875	1896000
21	8	1275	634475	2530475
22	1	1295	701075	3231550
23	22	1312	770115	4001665

dynamischer Ansatz

Standard

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	12	0	0	0
4	11	20	0	0
5	21	20	0	0
6	5	20	0	0
7	18	195	0	0
8	13	265	0	0
9	20	365	0	0
10	22	382	1840	1840
11	10	462	1840	3680
12	8	552	1840	5520
13	4	662	1840	7360
14	16	1002	50840	58200
15	6	1102	299915	358115
16	2	1102	299915	658030
17	23	1102	299915	957945
18	15	1142	384115	1342060
19	14	1197	517615	1859675
20	17	1237	578740	2438415
21	3	1237	578740	3017155
22	1	1297	735090	3752245
23	7	1312	770115	4522360

dynamischer Ansatz

nur Wichtung

Rang	Abschnitt	umgerüstete Fahrzeuge	Streckenkilometer ETCS	Bewertung
1	9	0	0	0
2	19	0	0	0
3	12	0	0	0
4	11	20	0	0
5	21	20	0	0
6	5	20	0	0
7	18	195	0	0
8	13	265	0	0
9	20	365	0	0
10	10	445	0	0
11	8	535	0	0
12	4	645	0	0
13	6	745	0	0
14	16	1085	230875	230875
15	23	1085	230875	461750
16	2	1085	230875	692625
17	3	1085	230875	923500
18	17	1125	292000	1215500
19	15	1165	376200	1591700
20	14	1220	509700	2101400
21	7	1275	634475	2735875
22	22	1292	703515	3439390
23	1	1312	770115	4209505

A.4 Ergebnisse Optimierung Migrationspfade

A.4.1 Streckenseitige Doppelausrüstung, Kostenvergleich

Jahr	Bestand:					Kosten:					
	Strecke				Fahrzeuge	Investitionen			Migrationskosten		
	Altsystem	ETCS LS	ETCS L1	ETCS L2	ETCS	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	gesamt	Strecke	Fahrzeuge
2011	1170	0	0	0	0	- €	- €	- €	- €	- €	- €
2012	1170	0	0	25	0	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	1.938.900 €	1.938.900 €	- €
2013	1170	0	0	75	0	5.529.456 €	5.529.456 €	- €	5.691.493 €	5.691.493 €	- €
2014	1170	0	0	150	0	10.516.338 €	10.516.338 €	- €	11.128.478 €	11.128.478 €	- €
2015	1170	0	0	255	0	16.980.816 €	16.980.816 €	- €	18.426.480 €	18.426.480 €	- €
2016	1170	0	0	340	0	21.826.324 €	21.826.324 €	- €	24.584.016 €	24.584.016 €	- €
2017	1170	0	0	395	0	24.729.406 €	24.729.406 €	- €	29.106.886 €	29.106.886 €	- €
2018	1170	0	0	445	0	27.173.078 €	27.173.078 €	- €	33.292.977 €	33.292.977 €	- €
2019	1170	0	0	520	0	30.567.066 €	30.567.066 €	- €	38.504.538 €	38.504.538 €	- €
2020	1170	0	0	585	105	50.309.107 €	33.290.637 €	17.018.470 €	60.213.158 €	43.194.688 €	17.018.470 €
2021	1170	0	0	605	315	82.600.738 €	34.066.583 €	48.534.155 €	95.026.043 €	46.019.153 €	49.006.890 €
2022	1170	0	0	645	332	86.399.962 €	35.503.521 €	50.896.442 €	102.100.046 €	49.417.715 €	52.682.330 €
2023	1150	0	0	665	487	107.008.264 €	36.168.770 €	70.839.495 €	125.926.255 €	52.019.370 €	73.906.885 €
2024	1150	0	0	715	522	112.717.886 €	37.708.697 €	75.009.189 €	135.113.800 €	55.296.670 €	79.817.129 €
2025	1150	0	0	770	562	118.698.706 €	39.277.142 €	79.421.564 €	144.559.437 €	58.602.488 €	85.956.949 €
2026	1150	0	0	820	637	127.679.320 €	40.597.382 €	87.081.938 €	157.001.859 €	61.662.484 €	95.339.375 €
2027	1150	0	0	895	672	132.823.024 €	42.431.049 €	90.391.975 €	165.674.063 €	65.217.370 €	100.456.693 €
2028	1150	0	0	970	822	147.655.934 €	44.128.888 €	103.527.046 €	184.019.292 €	68.662.174 €	115.357.118 €
2029	1150	0	0	1015	912	155.896.440 €	45.072.132 €	110.824.308 €	196.018.698 €	71.364.869 €	124.653.829 €
2030	1150	0	0	1060	962	160.523.550 €	45.945.506 €	114.578.044 €	204.407.801 €	73.946.192 €	130.461.609 €
2031	1150	0	0	1085	1097	170.357.155 €	46.394.772 €	123.962.382 €	217.901.993 €	76.049.883 €	141.852.110 €
2032	1110	0	0	1125	1187	176.815.536 €	47.060.353 €	129.755.184 €	228.048.030 €	78.284.883 €	149.763.146 €
2033	1110	0	0	1145	1237	180.103.511 €	47.368.491 €	132.735.020 €	234.855.787 €	79.990.565 €	154.865.222 €
2034	310	0	0	1170	1297	183.771.083 €	47.725.134 €	136.045.949 €	241.890.942 €	81.666.981 €	160.223.961 €
2035	65	0	0	1170	1312	184.537.502 €	47.725.134 €	136.812.368 €	243.989.737 €	81.011.267 €	162.978.470 €
2036	0	0	0	1170	1312	184.537.502 €	47.725.134 €	136.812.368 €	244.703.799 €	79.863.216 €	164.840.584 €

A.4.2 Streckenseitige Doppelausrüstung, kritischer Pfad

Jahr	Bestand:					Kosten:					
	Strecke				Fahrzeuge	Investitionen			Migrationskosten		
	Altsystem	ETCS LS	ETCS L1	ETCS L2	ETCS	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	gesamt	Strecke	Fahrzeuge
2011	1170	0	0	0	0	- €	- €	- €	- €	- €	- €
2012	1170	0	0	25	0	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	1.938.900 €	1.938.900 €	- €
2013	1170	0	0	75	0	5.529.456 €	5.529.456 €	- €	5.691.493 €	5.691.493 €	- €
2014	1170	0	0	150	0	10.516.338 €	10.516.338 €	- €	11.128.478 €	11.128.478 €	- €
2015	1170	0	0	255	0	16.980.816 €	16.980.816 €	- €	18.426.480 €	18.426.480 €	- €
2016	1170	0	0	340	0	21.826.324 €	21.826.324 €	- €	24.584.016 €	24.584.016 €	- €
2017	1170	0	0	395	0	24.729.406 €	24.729.406 €	- €	29.106.886 €	29.106.886 €	- €
2018	1170	0	0	445	0	27.173.078 €	27.173.078 €	- €	33.292.977 €	33.292.977 €	- €
2019	1170	0	0	520	0	30.567.066 €	30.567.066 €	- €	38.504.538 €	38.504.538 €	- €
2020	1170	0	0	585	105	50.309.107 €	33.290.637 €	17.018.470 €	60.213.158 €	43.194.688 €	17.018.470 €
2021	1170	0	0	605	315	82.600.738 €	34.066.583 €	48.534.155 €	95.026.043 €	46.019.153 €	49.006.890 €
2022	1170	0	0	645	332	86.399.962 €	35.503.521 €	50.896.442 €	102.100.046 €	49.417.715 €	52.682.330 €
2023	1170	0	0	665	367	91.568.481 €	36.168.770 €	55.399.712 €	110.486.472 €	52.019.370 €	58.467.102 €
2024	1150	0	0	715	522	111.574.199 €	37.708.697 €	73.865.501 €	133.652.421 €	55.407.862 €	78.244.559 €
2025	1150	0	0	770	562	117.555.019 €	39.277.142 €	78.277.876 €	143.098.059 €	58.713.680 €	84.384.379 €
2026	1150	0	0	820	597	122.450.099 €	40.597.382 €	81.852.717 €	151.454.947 €	61.773.676 €	89.681.272 €
2027	1150	0	0	895	672	131.376.704 €	42.431.049 €	88.945.656 €	163.796.566 €	65.328.562 €	98.468.004 €
2028	1150	0	0	970	822	146.209.615 €	44.128.888 €	102.080.727 €	182.141.794 €	68.773.366 €	113.368.428 €
2029	1150	0	0	1015	912	154.450.120 €	45.072.132 €	109.377.989 €	194.141.200 €	71.476.060 €	122.665.140 €
2030	1150	0	0	1060	962	159.077.230 €	45.945.506 €	113.131.724 €	202.530.303 €	74.057.384 €	128.472.919 €
2031	1150	0	0	1085	1097	168.910.835 €	46.394.772 €	122.516.063 €	216.024.496 €	76.161.075 €	139.863.421 €
2032	1110	0	0	1125	1187	175.369.217 €	47.060.353 €	128.308.864 €	226.170.532 €	78.396.075 €	147.774.457 €
2033	1110	0	0	1145	1237	178.657.192 €	47.368.491 €	131.288.700 €	232.978.290 €	80.101.757 €	152.876.532 €
2034	310	0	0	1170	1297	182.324.763 €	47.725.134 €	134.599.629 €	240.013.444 €	81.778.173 €	158.235.271 €
2035	65	0	0	1170	1312	183.091.182 €	47.725.134 €	135.366.048 €	242.112.239 €	81.122.459 €	160.989.780 €
2036	0	0	0	1170	1312	183.091.182 €	47.725.134 €	135.366.048 €	242.826.302 €	79.974.408 €	162.851.894 €

A.4.3 Parallele Doppelausrüstung, Kostenvergleich

Jahr	Bestand:					Kosten:						
	Strecke				Fahrzeuge	Investitionen			Migrationskosten			
	Altsystem	ETCS LS	ETCS L1	ETCS L2	ETCS	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	
2011	1170	0	0	0	0	- €	- €	- €	- €	- €	- €	
2012	1170	0	0	25	0	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	
2013	1170	0	0	75	0	5.529.456 €	5.529.456 €	- €	5.691.493 €	5.691.493 €	- €	
2014	1170	0	0	150	0	10.516.338 €	10.516.338 €	- €	11.128.478 €	11.128.478 €	- €	
2015	1170	0	0	255	0	16.980.816 €	16.980.816 €	- €	18.426.480 €	18.426.480 €	- €	
2016	1170	0	0	340	0	21.826.324 €	21.826.324 €	- €	24.584.016 €	24.584.016 €	- €	
2017	1170	0	0	395	0	24.729.406 €	24.729.406 €	- €	29.106.886 €	29.106.886 €	- €	
2018	1170	0	0	445	105	47.023.421 €	27.173.078 €	19.850.343 €	53.143.320 €	33.292.977 €	19.850.343 €	
2019	1170	0	0	520	215	69.672.592 €	30.567.066 €	39.105.526 €	78.161.463 €	38.504.538 €	39.656.925 €	
2020	1170	0	0	585	315	88.604.230 €	33.290.637 €	55.313.593 €	100.105.099 €	43.194.688 €	56.910.412 €	
2021	1170	0	0	605	332	91.931.446 €	34.066.583 €	57.864.863 €	106.899.040 €	46.019.153 €	60.879.887 €	
2022	1150	0	0	645	487	114.906.881 €	35.503.521 €	79.403.360 €	133.220.122 €	49.417.715 €	83.802.406 €	
2023	1150	0	0	665	562	125.221.994 €	36.168.770 €	89.053.224 €	147.231.347 €	51.899.283 €	95.332.064 €	
2024	1150	0	0	715	637	135.696.981 €	37.708.697 €	97.988.284 €	161.452.309 €	55.176.583 €	106.275.725 €	
2025	1150	0	0	770	762	151.054.098 €	39.277.142 €	111.776.956 €	180.654.811 €	58.482.401 €	122.172.410 €	
2026	1150	0	0	820	912	167.695.085 €	40.597.382 €	127.097.703 €	201.370.435 €	61.542.397 €	139.828.038 €	
2027	1150	0	0	895	962	174.257.377 €	42.431.049 €	131.826.328 €	212.241.451 €	65.097.283 €	147.144.168 €	
2028	1150	0	0	970	1012	180.333.573 €	44.128.888 €	136.204.685 €	222.591.799 €	68.542.087 €	154.049.713 €	
2029	1150	0	0	1015	1082	186.952.465 €	45.072.132 €	141.880.333 €	233.431.752 €	71.244.781 €	162.186.970 €	
2030	1150	0	0	1060	1197	196.459.431 €	45.945.506 €	150.513.925 €	247.083.592 €	73.826.105 €	173.257.487 €	
2031	385	0	0	1085	1237	199.689.242 €	46.394.772 €	153.294.470 €	254.464.061 €	75.929.796 €	178.534.266 €	
2032	310	0	0	1125	1237	200.354.822 €	47.060.353 €	153.294.470 €	256.789.815 €	75.866.985 €	180.922.831 €	
2033	310	0	0	1145	1297	204.238.764 €	47.368.491 €	156.870.273 €	262.057.991 €	75.347.722 €	186.710.269 €	
2034	65	0	0	1170	1312	205.423.139 €	47.725.134 €	157.698.005 €	264.649.143 €	74.964.004 €	189.685.138 €	
2035	0	0	0	1170	1312	205.423.139 €	47.725.134 €	157.698.005 €	265.420.330 €	73.724.109 €	191.696.221 €	

A.4.4 Parallele Doppelausrüstung, kritischer Pfad

Jahr	Bestand:					Kosten:						
	Strecke				Fahrzeuge	Investitionen			Migrationskosten			
	Altsystem	ETCS LS	ETCS L1	ETCS L2	ETCS	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	
2011	1170	0	0	0	0	- €	- €	- €	- €	- €	- €	
2012	1170	0	0	25	0	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	
2013	1170	0	0	75	0	5.529.456 €	5.529.456 €	- €	5.691.493 €	5.691.493 €	- €	
2014	1170	0	0	150	0	10.516.338 €	10.516.338 €	- €	11.128.478 €	11.128.478 €	- €	
2015	1170	0	0	255	0	16.980.816 €	16.980.816 €	- €	18.426.480 €	18.426.480 €	- €	
2016	1170	0	0	340	0	21.826.324 €	21.826.324 €	- €	24.584.016 €	24.584.016 €	- €	
2017	1170	0	0	395	0	24.729.406 €	24.729.406 €	- €	29.106.886 €	29.106.886 €	- €	
2018	1170	0	0	445	105	47.023.421 €	27.173.078 €	19.850.343 €	53.143.320 €	33.292.977 €	19.850.343 €	
2019	1170	0	0	520	215	69.672.592 €	30.567.066 €	39.105.526 €	78.161.463 €	38.504.538 €	39.656.925 €	
2020	1170	0	0	585	315	88.604.230 €	33.290.637 €	55.313.593 €	100.105.099 €	43.194.688 €	56.910.412 €	
2021	1170	0	0	605	332	91.931.446 €	34.066.583 €	57.864.863 €	106.899.040 €	46.019.153 €	60.879.887 €	
2022	1150	0	0	645	487	114.906.881 €	35.503.521 €	79.403.360 €	133.220.122 €	49.417.715 €	83.802.406 €	
2023	1150	0	0	665	562	125.221.994 €	36.168.770 €	89.053.224 €	147.231.347 €	51.899.283 €	95.332.064 €	
2024	1150	0	0	715	637	135.696.981 €	37.708.697 €	97.988.284 €	161.452.309 €	55.176.583 €	106.275.725 €	
2025	1150	0	0	770	762	151.054.098 €	39.277.142 €	111.776.956 €	180.654.811 €	58.482.401 €	122.172.410 €	
2026	1150	0	0	820	812	157.481.254 €	40.597.382 €	116.883.871 €	191.156.604 €	61.542.397 €	129.614.207 €	
2027	1150	0	0	895	962	173.500.797 €	42.431.049 €	131.069.748 €	211.201.153 €	65.097.283 €	146.103.870 €	
2028	1150	0	0	970	1012	179.576.993 €	44.128.888 €	135.448.105 €	221.551.501 €	68.542.087 €	153.009.415 €	
2029	1150	0	0	1015	1082	186.195.885 €	45.072.132 €	141.123.753 €	232.391.454 €	71.244.781 €	161.146.672 €	
2030	1150	0	0	1060	1197	195.702.851 €	45.945.506 €	149.757.345 €	246.043.294 €	73.826.105 €	172.217.189 €	
2031	385	0	0	1085	1237	198.932.662 €	46.394.772 €	152.537.889 €	253.423.764 €	75.929.796 €	177.493.968 €	
2032	310	0	0	1125	1237	199.598.242 €	47.060.353 €	152.537.889 €	255.749.518 €	75.866.985 €	179.882.533 €	
2033	310	0	0	1145	1297	203.482.184 €	47.368.491 €	156.113.693 €	261.017.693 €	75.347.722 €	185.669.971 €	
2034	65	0	0	1170	1312	204.666.559 €	47.725.134 €	156.941.425 €	263.608.845 €	74.964.004 €	188.644.841 €	
2035	0	0	0	1170	1312	204.666.559 €	47.725.134 €	156.941.425 €	264.380.033 €	73.724.109 €	190.655.924 €	

A.4.5 Optimum, Kostenvergleich

Jahr	Bestand:						Kosten:						
	Strecke					Fahrzeuge	Investitionen			Migrationskosten			
	Altsystem	ETCS LS	ETCS L1	ETCS L2	ETCS	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	gesamt	Strecke	Fahrzeuge		
2011	1170	0	0	0	0	- €	- €	- €	- €	- €	- €		
2012	1170	0	0	25	0	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	1.938.900 €	1.938.900 €	- €		
2013	1170	0	0	75	0	5.529.456 €	5.529.456 €	- €	5.691.493 €	5.691.493 €	- €		
2014	1170	0	0	150	0	10.516.338 €	10.516.338 €	- €	11.128.478 €	11.128.478 €	- €		
2015	1170	0	0	255	0	16.980.816 €	16.980.816 €	- €	18.426.480 €	18.426.480 €	- €		
2016	1170	0	0	340	0	21.826.324 €	21.826.324 €	- €	24.584.016 €	24.584.016 €	- €		
2017	1170	0	0	395	0	24.729.406 €	24.729.406 €	- €	29.106.886 €	29.106.886 €	- €		
2018	1170	0	0	445	0	27.173.078 €	27.173.078 €	- €	33.292.977 €	33.292.977 €	- €		
2019	1170	0	0	520	0	30.567.066 €	30.567.066 €	- €	38.504.538 €	38.504.538 €	- €		
2020	1170	0	0	585	45	40.584.267 €	33.290.637 €	7.293.630 €	50.488.318 €	43.194.688 €	7.293.630 €		
2021	1170	0	0	605	185	62.370.670 €	34.066.583 €	28.304.087 €	74.525.841 €	46.019.153 €	28.506.687 €		
2022	1150	0	0	645	202	66.169.894 €	35.503.521 €	30.666.373 €	81.057.907 €	49.417.715 €	31.640.191 €		
2023	1150	0	0	665	237	71.338.413 €	36.168.770 €	35.169.643 €	88.822.453 €	51.899.283 €	36.923.170 €		
2024	1150	0	0	715	272	77.048.035 €	37.708.697 €	39.339.338 €	97.116.492 €	55.176.583 €	41.939.909 €		
2025	1150	0	0	770	312	83.028.855 €	39.277.142 €	43.751.713 €	105.734.809 €	58.482.401 €	47.252.408 €		
2026	1150	0	0	820	352	88.434.628 €	40.597.382 €	47.837.245 €	113.836.352 €	61.542.397 €	52.293.955 €		
2027	1150	0	0	895	352	90.268.294 €	42.431.049 €	47.837.245 €	118.389.924 €	65.097.283 €	53.292.641 €		
2028	1150	0	0	970	402	96.344.490 €	44.128.888 €	52.215.602 €	127.137.793 €	68.542.087 €	58.595.707 €		
2029	1150	0	0	1015	647	117.152.502 €	45.072.132 €	72.080.370 €	150.683.089 €	71.244.781 €	79.438.308 €		
2030	1150	0	0	1060	832	131.914.697 €	45.945.506 €	85.969.191 €	168.610.434 €	73.826.105 €	94.784.329 €		
2031	1150	0	0	1085	967	141.748.303 €	46.394.772 €	95.353.530 €	181.833.524 €	75.929.796 €	105.903.728 €		
2032	1110	0	0	1125	1167	155.286.775 €	47.060.353 €	108.226.423 €	198.808.629 €	78.164.796 €	120.643.833 €		
2033	1110	0	0	1145	1217	158.574.750 €	47.368.491 €	111.206.259 €	205.580.629 €	79.870.478 €	125.710.151 €		
2034	65	0	0	1170	1297	163.345.965 €	47.725.134 €	115.620.831 €	213.686.317 €	81.546.893 €	132.139.423 €		
2035	0	0	0	1170	1312	164.112.383 €	47.725.134 €	116.387.250 €	215.200.931 €	80.306.998 €	134.893.932 €		

A.4.6 Optimum, kritischer Pfad

Jahr	Bestand:						Kosten:						
	Strecke					Fahrzeuge	Investitionen			Migrationskosten			
	Altsystem	ETCS LS	ETCS L1	ETCS L2	ETCS	gesamt	Strecke	Fahrzeuge	gesamt	Strecke	Fahrzeuge		
2011	1170	0	0	0	0	- €	- €	- €	- €	- €	- €		
2012	1170	0	0	25	0	1.938.900 €	1.938.900 €	- €	1.938.900 €	1.938.900 €	- €		
2013	1170	0	0	75	0	5.529.456 €	5.529.456 €	- €	5.691.493 €	5.691.493 €	- €		
2014	1170	0	0	150	0	10.516.338 €	10.516.338 €	- €	11.128.478 €	11.128.478 €	- €		
2015	1170	0	0	255	0	16.980.816 €	16.980.816 €	- €	18.426.480 €	18.426.480 €	- €		
2016	1170	0	0	340	0	21.826.324 €	21.826.324 €	- €	24.584.016 €	24.584.016 €	- €		
2017	1170	0	0	395	0	24.729.406 €	24.729.406 €	- €	29.106.886 €	29.106.886 €	- €		
2018	1170	0	0	445	0	27.173.078 €	27.173.078 €	- €	33.292.977 €	33.292.977 €	- €		
2019	1170	0	0	520	0	30.567.066 €	30.567.066 €	- €	38.504.538 €	38.504.538 €	- €		
2020	1170	0	0	585	45	40.584.267 €	33.290.637 €	7.293.630 €	50.488.318 €	43.194.688 €	7.293.630 €		
2021	1170	0	0	605	185	62.370.670 €	34.066.583 €	28.304.087 €	74.525.841 €	46.019.153 €	28.506.687 €		
2022	1150	0	0	645	202	66.169.894 €	35.503.521 €	30.666.373 €	81.057.907 €	49.417.715 €	31.640.191 €		
2023	1150	0	0	665	237	71.338.413 €	36.168.770 €	35.169.643 €	88.822.453 €	51.899.283 €	36.923.170 €		
2024	1150	0	0	715	272	77.048.035 €	37.708.697 €	39.339.338 €	97.116.492 €	55.176.583 €	41.939.909 €		
2025	1150	0	0	770	312	83.028.855 €	39.277.142 €	43.751.713 €	105.734.809 €	58.482.401 €	47.252.408 €		
2026	1150	0	0	820	312	84.349.095 €	40.597.382 €	43.751.713 €	109.750.819 €	61.542.397 €	48.208.423 €		
2027	1150	0	0	895	352	89.965.662 €	42.431.049 €	47.534.613 €	117.973.805 €	65.097.283 €	52.876.522 €		
2028	1150	0	0	970	402	96.041.858 €	44.128.888 €	51.912.970 €	126.721.674 €	68.542.087 €	58.179.588 €		
2029	1150	0	0	1015	647	116.849.870 €	45.072.132 €	71.777.738 €	150.266.970 €	71.244.781 €	79.022.189 €		
2030	1150	0	0	1060	832	131.612.065 €	45.945.506 €	85.666.559 €	168.194.315 €	73.826.105 €	94.368.210 €		
2031	1150	0	0	1085	967	141.445.671 €	46.394.772 €	95.050.898 €	181.417.404 €	75.929.796 €	105.487.609 €		
2032	1110	0	0	1125	1167	154.984.143 €	47.060.353 €	107.923.790 €	198.392.510 €	78.164.796 €	120.227.714 €		
2033	1110	0	0	1145	1217	158.272.118 €	47.368.491 €	110.903.627 €	205.164.510 €	79.870.478 €	125.294.032 €		
2034	65	0	0	1170	1297	163.043.333 €	47.725.134 €	115.318.199 €	213.270.198 €	81.546.893 €	131.723.304 €		
2035	0	0	0	1170	1312	163.809.751 €	47.725.134 €	116.084.618 €	214.784.812 €	80.306.998 €	134.477.813 €		