Zukunftskonzept Virtuelle Kupplung
–
Ein innovativer Lösungsansatz für die baureihen- und herstellerübergreifende Kuppelbarkeit von Triebfahrzeugen

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Franziska Rüsch
geboren in Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. Oliver Schwedes
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Siegmann
Zweiter Gutachter:	Dr.-Ing. Christoph Gralla

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 23. März 2018

Berlin 2018

„Sage nicht, ich werde es schaffen,
sondern ich schaffe es.“

Danksagung

Danken möchte ich all jenen, die mich auf unterschiedliche Weise bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und gefördert haben.

Zuvorderst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. habil. Jürgen Siegmann für die jahrelange und konstruktive Betreuung dieser Arbeit, den Gestaltungsfreiraum bei ihrer Ausrichtung und für die Möglichkeit von seinen Erfahrungen lernen zu dürfen.

Herrn Dr. Christoph Gralla danke ich für seine engagierte Unterstützung und die vielen hilfreichen Ratschläge, gerade in Bezug auf die technischen Fragestellungen, welche diese Arbeit nachhaltig verbesserten und wesentlich zu ihrem Gelingen beitrugen.

Herrn Axel Schuppe danke ich für die initiale Idee zu der Forschungsfrage und für die Möglichkeit, diese Promotion während meiner Beschäftigung beim Verband der Bahnindustrie in Deutschland (VDB) erstellen zu können.

Für die wertvollen fachlichen Gespräche und Anregungen, welche mir sehr weitergeholfen haben, danke ich insbesondere Johannes Pagenkopf, Sven Maiwald, Christoph Hessel, Christian Irmisch, Eugen Polisky und Prof. Stefan Karch.

Meinem Bruder Markus Rüsch, seiner Frau Hiroe Rüsch-Matsui und meinen lieben Freunden, allen voran Thomas, Kathleen, Melanie, Laura, Beate, Franzi und Andreas danke ich für die vielen schönen Zerstreuungen und Ermunterungen während der letzten Jahre.

Meinen Eltern Sabine und Dr. Thomas Rüsch gilt mein aufrichtiger Dank für ihre unermüdliche Unterstützung und Förderung während meines gesamten Lebens.

Franziska Rüsch

Berlin, im Januar 2018

Zusammenfassung

Die betriebliche baureihen- und herstellerübergreifende Kuppelbarkeit (Multikuppelbarkeit) von Triebfahrzeugen im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) erhöht die betriebliche Flexibilität im Fahrzeugeinsatz und verbessert dessen Wirtschaftlichkeit. Für die Gestaltung eines zukunftsfähigen SPNV gilt die Multikuppelbarkeit daher, insbesondere bei den Eisenbahnverkehrsunternehmen und Aufgabenträgern, als zentrale Anforderung. Heute ist ein betriebliches Kuppeln verschiedener Baureihen nur dann möglich, wenn die gewünschten Kuppelpaare bereits in der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt werden; erhebliche Mehraufwendungen eingeschlossen.

Im Vergleich mehrerer Lösungsansätze zur Etablierung der Multikuppelbarkeit wurde im Rahmen der Analyse der Etablierung der virtuellen Kupplung das größte Erfolgspotenzial beigemessen. Im virtuellen Zugverband existiert keine physische Verbindung zwischen den Fahrzeugen; hier folgt das hintere Fahrzeug dem vorderen automatisiert im dichten Abstand.

Die erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung basiert im Wesentlichen auf ihrer technischen Entwicklung und der Bewältigung von rechtlichen Umsetzungsherausforderungen. Entscheidend ist zudem, welche Wirtschaftlichkeit die virtuelle Kupplung im konkreten Anwendungsfall aufweisen kann. Eine entscheidende Frage ist hier, ob die betriebliche Reserveflotte soweit reduziert werden kann, dass die Kosten für die Integration der virtuellen Kupplung gerechtfertigt sind. In Abhängigkeit davon, wie schnell die technische Umsetzung gelingt, der rechtliche Rahmen weiterentwickelt und die notwendige Kommunikationsinfrastruktur geschaffen wird, ist eine Markteinführung frühestens 2025/26 realistisch umsetzbar.

Das zentrale Ergebnis dieser Arbeit bildet ein Zukunftskonzept, das beschreibt, wie die betriebliche Multikuppelbarkeit mittels der virtuellen Kupplung im SPNV erfolgreich etabliert werden kann. Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit besteht zum Beispiel in Bezug auf die technische Spezifikation und im Kontext der Diskussion rechtlicher Fragestellungen. Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit resultiert aus der Übertragbarkeit des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur ganzheitlichen Bewertung von Innovationen im SPNV, zum Beispiel im Rahmen von Verkehrs- und Fahrzeugausschreibungen.

Abstract

The operational type series and manufacturer coupling capability (multi-coupling capability) of the traction units in the regional passenger rail transport (Schienenpersonennahverkehr, SPNV) increases the operational flexibility of vehicle utilization and improves its economic aspects. Therefore, the multi-coupling capability, especially for the railway transport companies and the regional authorities, is considered a key requirement for creating a future-oriented SPNV. Currently, operational coupling of diverse type series is only possible if the coupling configuration desired has already been taken into consideration during the vehicle's design phase.

Compared to multiple solution approaches for establishing multi-coupling capability, the highest success potential has been attributed to the establishment of virtual coupling. A physical connection between the vehicles does not exist; the vehicle in the rear automatically follows the lead vehicle within close distance.

The successful establishment of virtual coupling is essentially based on the technical development and the ability to handle the legal implementation challenges. The economic efficiency achieved by virtual coupling in the specific use case is also a decisive factor. One relevant question here is, whether the operational reserve fleet can be sufficiently reduced to justify the expenses incurred by integrating virtual coupling.

This concept can realistically be introduced into the market in 2025/26 at the earliest, depending on how quickly the technical implementation is successful, the legal framework is developed and the necessary communication infrastructure is provided.

The central result of this study is a future concept defining how the operational multi-coupling capability via virtual coupling in SPNV can be successfully established. The results can be connected to other fields of research, like technical specifications and legal issues. Further, the potential usability in the economic field results from the transferability of the process developed for the integral evaluation of innovations in SPNV, for instance within the framework of transport and vehicle tendering.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung II

Zusammenfassung III

Abstract IV

Inhaltsverzeichnis V

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis XI

Abkürzungsverzeichnis XIII

1 Einführung 1

1.1 Relevanz der Forschungsfrage 1

1.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit 4

1.3 Definition zentraler Begriffe 6

2 Analyse der Ausgangssituation 8

2.1 Herausforderungen im SPNV in Deutschland 8

2.2 Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit 21

2.3 Status quo und Voraussetzungen der Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen 31

2.3.1 Infrastrukturelle Kompatibilität 32

2.3.2 Kompatibilität in Bezug auf Anforderungen der Aufgabenträger und EVU 35

2.3.3 Fahrzeugtechnische Kompatibilität 36

2.3.4 Voraussetzungen für die betriebliche Multikuppelbarkeit 42

2.4 Motivation zur Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit 43

3 Auswahl des Lösungsansatzes zur Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit 46

3.1 Auswahlmethodik 46

3.2 Bewertungskriterien 48

3.3 Vorstellung und Bewertung der Lösungsansätze 57

3.3.1 Verbindliche Vorgabe im Lastenheft 58

3.3.2 Standardisierung der elektronischen Schnittstelle 62

3.3.3 Entwicklung eines Adapters 64

3.3.4 Etablierung von Konvoiverkehren 67

3.3.5 Etablierung einer virtuellen Kupplung 70

3.4 Identifizierung des chancenreichsten Lösungsansatzes 73

4 Die virtuelle Kupplung 76

4.1 Wirkprinzip und Modulbestandteile 77

4.2 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele 81

4.3 Anforderungen an den Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave 86

4.4 Anforderungen an das Kommunikationskonzept 94
4.5 Anforderungen aus der betrieblichen Umsetzung 100
4.6 Anforderungen an die Schnittstellen und notwendige fahrzeugseitige Anpassungen 105
4.7 Anforderungen aus infrastrukturseitigen Anpassungen 109
4.8 Exkurs: Aufbaukonzept mit mehr als zwei Triebfahrzeugen 111
4.9 Anforderungsprofil virtuelle Kupplung und notwendige betriebliche Rahmenbedingungen 112

5 Einschätzung zur technischen Umsetzbarkeit 117

5.1 Einschätzung zur technischen Reife 117
5.1.1 Reifegradmodell des Verbandes der Bahnindustrie 117
5.1.2 Anwendung der ERG- und IRG-Methodik 120
5.1.3 Zusammenfassung der Reifegradeinschätzung 126
5.2 Risikobeurteilung 127
5.2.1 Auswahl und Beschreibung der anzuwendenden Methodik 128
5.2.2 Anwendung des ersten SIRF-Prozessschrittes 134
5.2.3 Zusammenfassung der Risikobeurteilung 140
5.3 Ergänzende Betrachtung fahrzeugkonzeptbedingter Gefährdungen 141
5.3.1 Erhöhung des Automatisierungsgrades im Fahrbetrieb 142
5.3.2 Drahtlose Informationsübertragung 144
5.3.3 Zusammenfassung notwendiger Schutzmechanismen aufgrund fahrzeugkonzeptbedingter Gefährdungen 147
5.4 Zwischenfazit zur technischen Umsetzbarkeit 148

6 Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit 150

6.1 Auswahl und Beschreibung der anzuwendenden Methodik 150
6.2 Spezifizierung des NOWS-Verfahrens für die virtuelle Kupplung 156
6.2.1 Spezifizierung der Kostenparameter 158
6.2.2 Spezifizierung der Nutzenparameter 163
6.2.3 Zusammenfassung der Variablen zur Berechnung der Einflussparameter 169
6.3 Exemplarische Anwendung des NOWS-Verfahrens 172
6.4 Zwischenfazit zur Wirtschaftlichkeitseinschätzung 181

7 Einschätzung zur Markteinführung und -etablierung 183

7.1 Migrationspfad 183
7.1.1 Beschreibung notwendiger Schritte für die Marktetablierung 183
7.1.2 Abschätzungen zum zeitlichen Rahmen 190
7.2 Rechtliches Umfeld 196
7.2.1 Rechtlich relevante neue Charakteristika und Rahmenbedingungen 197
7.2.2 Eisenbahnrecht des Bundes 198
7.2.3 Eisenbahnrecht der europäischen Union 205

7.2.4 Haftungsrechtliche Fragen 208
7.2.5 Zusammenfassung rechtlicher Herausforderungen 217
7.3 „Security“ – Angriffssicherheit 219
7.4 Einordnung in die aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussion 221
7.5 Zwischenfazit zur Markteinführung und -etablierung 226
8 Fazit 229
8.1 Zukunftskonzept „Erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung“ 229
8.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 231
9 Literaturverzeichnis XV
10 Anhang XXXVIII
Anhang 1 Übersicht zu den Bewertungskriterien XXXVIII
Anhang 2 Detaillierte Erläuterung zu vergleichbaren Anwendungs- und Forschungsbeispielen XL
Anhang 3 Eintrittswahrscheinlichkeiten im Beispielszenario LIX

Abbildungsverzeichnis

1-1 Spannungsfeld der erfolgreichen Etablierung eines Lösungsansatze ... 3

1-2 Aufbau der Arbeit ... 6

2-1 Beispiel für ein typisches Organisationsschema im SPNV ... 9

2-2 Entwicklung marktreflektierender Kennzahlen im SPNV ... 10

2-3 Mittelherkunft und Mittelverwendung im SPNV ... 12

2-4 Überblick über Modelle zur Fahrzeugbeschaffung und -finanzierung ... 15

2-5 Überblick zu Herausforderungen des SPNV in Deutschland ... 21

2-6 Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ... 26

2-7 Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit zur Erhöhung der Angebotsattraktivität ... 30

2-8 Nutzenpotenziale einer betrieblichen Multikuppelbarkeit ... 31

2-9 Dimensionen der betrieblichen Multikuppelbarkeit ... 31

2-10 infrastrukturelle Zugangs- und Nutzungsbedingungen (Auswahl) ... 32

2-11 Vielfältige Anforderungen an Schienenfahrzeuge ... 35

2-12 Modularer Aufbau einer Scharfenbergkupplung ... 37

2-13 Das Kupplungsprinzip einer Scharfenbergkupplung ... 38

2-14 Fahrzeugtechnische Kompatibilität von Bestandsfahrzeugen bei Verwendung der SchaKu ... 42

2-15 Erfolgsfaktor betriebliche Multikuppelbarkeit ... 45

3-1 Paarvergleichsmatrix – Beispiel ... 48

3-2 Bewertungskriterien zur Bestimmung des chancenreichsten Lösungsansatzes ... 49

3-3 Zusammensetzung der Umfrageteilnehmer ... 55

3-4 Ergebnis der Befragung zur Bestimmung der Gewichtung der Bewertungskriterien ... 56

3-5 WTB-Gateways für die Kommunikation zwischen FLIRT3 und KISS ... 66

3-6 Konvoi im Schienenverkehr ... 68

3-7 Virtuelle Kupplung zweier Triebfahrzeuge ... 71

3-8 Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse ... 74

4-1 Prozess des Requirement Engineerings ... 76

4-2 Kernmerkmale der virtuellen Kupplung ... 77

4-3 Modulbestandteile ... 78
4-4 Wirkprinzip Regelungseinheit ... 79
4-5 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele im Schienen- und Straßenverkehr ... 82
4-6 Prinzipdarstellung Aufprallstärke zwischen Master und Slave in Abhängigkeit ihres Abstandes zueinander ... 87
4-7 Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave ... 89
4-8 Regelkreis Sicherheitsabstand ... 93
4-9 Anforderungen an das Kommunikationskonzept ... 100
4-10 Betriebsphasen ... 101
4-11 Anforderungen aus der betrieblichen Umsetzung ... 105
4-12 Benötigte Schnittstellen für die Umsetzung der virtuellen Kupplung ... 106
4-13 Schnittstellen und notwendige fahrzeugseitige Anpassungen ... 109
4-14 Notwendige infrastrukturseitige Anpassungen ... 111
4-15 Virtueller Zugverband mit mehr als zwei Einheiten ... 111
4-16 Definition Muss-, Soll- und Kann-Anforderung ... 113
5-1 Vorgehen zur Bestimmung der technischen Reife des Moduls ... 120
5-2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Umsetzung der virtuellen Kupplung ... 127
5-3 Safety-Prozess und Prozessschritte zur Nachweisführung ... 129
5-4 Bestimmung der SAS für nicht in der TESIP enthaltene Funktionen ... 131
5-5 Anforderungen aufgrund der fahrzeugkonzeptbedingten Gefährdungen ... 147
5-6 Zwischenfazit zur technischen Umsetzbarkeit ... 149
6-1 Kosten-Nutzen-Kurve auf Basis der in Tabelle 6-4 angenommenen Werte ... 155
6-2 Kosten-Nutzen-Kurve der virtuellen Kupplung anhand getroffener Abschätzungen ... 175
6-3 Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer virtuellen Kupplung ... 182
7-1 „V“-Darstellung des Systemlebenszyklus gemäß der EN 50126 ... 184
7-2 Zeitliche Abschätzung zur Markteinführung ... 190
7-3 Möglicher Migrationspfad „Einsatz virtuelle Kupplung in der deutschlandweiten SPNV-Flotte“ ... 195
7-4 Erfolgskritische Faktoren für die Markteinführung und -etablierung der virtuellen Kupplung ... 196

7-5	Rechtlich relevante Charakteristika der virtuellen Kupplung	198
7-6	Rechtsfolgen aus dem AEG	200
7-7	Rechtsfolgen aus der EBO	204
7-8	Rechtsfolgen in Bezug auf das europäische Eisenbahnrecht	208
7-9	Auswirkungen auf die Haftungsverhältnisse	215
7-10	Auswirkungen und Herausforderungen auf das eisenbahnrechtliche Umfeld und auf die Haftung	217
7-11	Automatisierungsgrade gemäß IEC 62267	223
7-12	Einordnung der virtuellen Kupplung in die aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussion	226
7-13	Handlungsbedarf der einzelnen Marktakteure zur Begegnung rechtlicher und prozessualer Herausforderungen	227
8-1	Zukunftskonzept für die erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung	230
8-2	Wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit	231
8-3	Verfahren zur Auswahl und Bewertung innovativer Lösungsansätze	233
10-1	Formblatt "Paarweiser Vergleich"	XXXIX
10-2	Überblick Urbalis Fluence	XLII
10-3	Zugorientiertes CBTC-System	XLIII
10-4	Betriebsleittechnik Neue Bahntechnik Paderborn	XLIV
10-5	prinzipieller Aufbau eines FlexCargoRail-Nutzlastträgers	XLVIII
10-6	ETCS-Level 2	LI
10-7	ETCS-Level 3	LII
10-8	Systemaufbau ATO over ETCS	LIII
10-9	Datenflüsse innerhalb eines FFB-Systems	LIV
10-10	Prinzipdarstellung KONVOI	LVII

Tabellenverzeichnis

3-1 Lösungsansätze zur Herstellung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit 58

4-1 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele im Schienenverkehr 83

4-2 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele bei Verfahren zur Zugfolgesicherung und im Straßenverkehr 84

4-3 Datenaustausch im virtuellen Zugverband 95

4-4 Merkmale der Quality of Service 98

4-5 Funktionale Anforderungen an die virtuelle Kupplung 114

4-6 Nicht funktionale Anforderungen an die virtuelle Kupplung - Teil 1 115

4-7 Nicht funktionale Anforderungen an die virtuelle Kupplung - Teil 2 116

5-1 Kurzbeschreibung der Einsatz- und Integrationsreifegradstufen 119

5-2 Einsatzreifegrad der Modulkomponenten (ERG_K) 121

5-3 Reifegradeinschätzung der Modulkomponenten 122

5-4 Forschungs- und Entwicklungsbedarf für einen höheren IRG_M 123

5-5 Umsetzungsreife administrativer und technischer Rahmenbedingungen - Teil 1 124

5-6 Umsetzungsreife administrativer und technischer Rahmenbedingungen - Teil 2 125

5-7 Umsetzungsreife administrativer und technischer Rahmenbedingungen - Teil 3 126

5-8 Überführung der Parameterausprägungen in Parameterwerte 132

5-9 Definition Schaden (S) 133

5-10 Definition Eintrittswahrscheinlichkeit (W) 133

5-11 Definition Expositionszeit (E) 134

5-12 Definition Vermeidung (V) 134

5-13 Anwendung der Kennzeichnungssystematik der DIN 25002-5 auf die virtuelle Kupplung 136

5-14 Zuordnung der primären Gefährdungen der virtuellen Kupplung zu ihren Kernfunktionen 138

6-1 Definition der Kategorien in der Kosten-Nutzen-Matrix 152

6-2 Beispiel einer Kosten- und einer Nutzen-Matrix 153

6-3 Risikostufen eins bis neun des NOWS-Verfahrens 154

6-4 kumulierte Kosten und Nutzen (am Beispiel von Tabelle 6-2) 154
6-5 Kosten-Nutzen-Matrix „Einsatz virtuelle Kupplung“ 157
6-6 Kostenbestandteile beim Hersteller der virtuellen Kupplung 159
6-7 Variablen mit geringem Datenrisiko 170
6-8 Variablen mit mittlerem oder hohem Datenrisiko 171
6-9 Eintrittswahrscheinlichkeiten im Beispielszenario 173
6-10 Kosten-Matrix mit Eintrittswahrscheinlichkeit im Beispielszenario 173
6-11 Nutzen-Matrix mit Eintrittswahrscheinlichkeit im Beispielszenario 174
10-1 Kriterien zur Auswahl des chancenreichsten Lösungsansatzes XXXVIII

Abkürzungsverzeichnis

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
aMK	automatische Mittelpufferkupplung
AT	Aufgabenträger
ATS	Automatic Train Supervision
BAG-SPNV	Bundesarbeitsgemeinschaft der Aufgabenträger des SPNV
BOA	Betriebsordnung für Anschlussbahnen
BOStrab	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen
CBTC	Communication-Based Train Control
CSM	Common Safety Methods
DB AG	Deutsche Bahn AG
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
E	Expositionszeit
EBA	Eisenbahnbundesamt
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ERG	Einsatzreifegrad
ETCS	European Train Control System
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
F&E	Forschung und Entwicklung
FFB	Funkbasierter Fahrbetrieb
Fzg.	Fahrzeug
Fzg-km	Fahrzeugkilometer
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Rail
HBL	Hauptbehälterleitung
HLL	Hauptluftleitung
IBG	Inbetriebnahmegenehmigung
IRG	Integrationsreifegrad
ISR	Infrastrukturregister
IWLAN	Industrial Wireless Local Area Network
km/h	Kilometer pro Stunde
KWA	Kosten-Wirksamkeitsanalyse
LMA	Limit of movement authority
LNVG	Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen
MK	Modulkomponenten
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NOWS	Nutzenorientierte Wirtschaftlichkeitsschätzung
NWA	Nutzwert-Analyse

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
ProdHaftG	Produkthaftungsgesetz
QoS	Quality of Service (Dienstgüte)
Reg.Mittel	Regionalisierungsmittel
S	Schaden
SAS	Sicherheitsanforderungsstufen
SchaKu	Scharfenbergkupplung
SGV	Schienengüterverkehr
SIRF	Sicherheitsrichtlinie Fahrzeug
SNB	Schienennetz-Benutzungsbedingungen
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
TEIV	Transeuropäischen-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung
TEN	Transeuropäischen Eisenbahnnetz
TFzg	Triebfahrzeug
t_{IV}	Informationsverarbeitungszeit Slave
t_R	Regelungszeit Slave
$t_{RA}(v_{slave})$	Reaktionszeit der Abstandsregelung des Slaves
TSI	Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität
$t_{SiIn}(t)$	Sicherheitszuschlag Infrastruktur
$t_{SiZu}(t)$	Sicherheitszuschlag Zugverband
UIC	internationaler Eisenbahnverband
URS	User Requirements Specification
V	Vermeidung
VDB	Verband der Bahnindustrie in Deutschland
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
W	Eintrittswahrscheinlichkeit
Zug-km	Zugkilometer

1 Einführung

Diese Arbeit hat zum Ziel, einen Lösungsansatz zu identifizieren und ganzheitlich zu bewerten, welcher die betriebliche baureihen- und herstellerübergreifende Kuppelbarkeit (betriebliche Multikuppelbarkeit) von Triebfahrzeugen im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) ermöglicht.

Die Relevanz dieser Zielsetzung zu erläutern (Abschnitt 1.1), sie in einzelne Forschungsfragen zu untergliedern und den Aufbau der vorliegenden Arbeit vorzustellen (Abschnitt 1.2) sowie zentrale Begrifflichkeiten zu definieren (Abschnitt 1.3), sind die Inhalte des ersten Kapitels und sollen zugleich die Erwartungshaltung an diese Arbeit spezifizieren.

1.1 Relevanz der Forschungsfrage

Der SPNV und die Infrastruktur gelten als zentrale zukünftige Handlungs- und Konfliktfelder des deutschen Bahnmarktes[1]. Die Besteller von SPNV-Leistungen stehen trotz der erfolgreichen Entwicklung des SPNV in den vergangenen 20 Jahren der ständigen Herausforderung gegenüber, ihre Verkehrsangebote kontinuierlich zu optimieren und den Fahrgästen eine bedarfsgerechte Mobilität zu ermöglichen. Der demografische Wandel und die gesellschaftliche Entwicklung führen dabei zu einer Steigerung der SPNV-Nachfrage und steigenden Kundenanforderungen, die gleichzeitig neue Aufgaben an Betriebskonzepte, Fahrzeuge und Schieneninfrastruktur stellen.

Handlungsdruck resultiert zudem aus den aktuellen Entwicklungen im Straßenverkehr. So haben selbstfahrende Personenkraftwagen das Potenzial, fahrgastrelevante Alleinstellungsmerkmale des SPNV aufzuheben (so zum Beispiel Fahrzeiten wie Wartezeiten produktiv nutzen zu können, „gefahren zu werden“). Um unter diesem erhöhten Wettbewerbsdruck bestehen zu können, muss der SPNV seine Kernstärken Komfort, Geschwindigkeit und Planbarkeit weiter ausbauen[2] und sich deutlich stärker an den Bedürfnissen seiner Fahrgäste orientieren.

Gründe, wie zum Beispiel knappe finanzielle Mittel, infrastrukturelle Besonderheiten und das Vergabe- und Wettbewerbsrecht führen jedoch dazu, dass dem

[1] Vgl. Leenen, Strang (2013), S. 57.
[2] Vgl. Meyer zu Hörste (2017a), S. 1.

Gestaltungswillen der handelnden Akteure im SPNV ein vergleichsweise enger Rahmen gesetzt ist.

Vor diesem Hintergrund gewinnen flexible Bedienkonzepte zunehmend an Relevanz. Sie können dazu beitragen, in nachfrageschwachen ländlichen Gebieten bedarfsgerechte Verkehre auf der Schiene aufrechtzuerhalten und in den Metropolregionen Fahrgastzuwächse, trotz bestehender Kapazitätsengpässe, auf der Schieneninfrastruktur zu ermöglichen, indem sie ihre Leistungsfähigkeit durch eine intelligente, fahrzeugseitige Lösung erhöht.

Die betriebliche Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen ist ein Beispiel für solch eine fahrzeugseitige Lösung und bildet die zentrale Voraussetzung für mehr Flexibilität in der betrieblichen Gestaltung. Stellte die betriebliche Kuppelbarkeit aufgrund der Marktstrukturen noch bis zur Bahnreform im Jahr 1994 kein Hindernis dar, gewann sie seitdem zunehmend an Bedeutung. Zurückzuführen ist dies vornehmlich auf die organisatorischen und räumlichen Entwicklungen (Regionalisierung, Reurbanisierung), die technologischen Entwicklungen (Automatisierung, Vernetzung, Elektrifizierung) sowie auf die gesellschaftlichen Entwicklungen (Individualisierung, Flexibilisierung, neue Geschäftsmodelle).

In Reaktion darauf fordern die Besteller der SPNV-Leistungen (Aufgabenträger) seit mehreren Jahren nachdrücklich eine betriebliche Multikuppelbarkeit. Sie gehen davon aus, dass mit ihr außer betrieblichen auch wirtschaftliche Effekte sowohl in laufenden Verkehrsverträgen, als auch in der Lebenszyklusbetrachtung zu erzielen sind.[3] Gemeinsam mit dem Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) sehen die Aufgabenträger in der betrieblichen Multikuppelbarkeit sogar eine der zentralen Anforderungen für das SPNV-Fahrzeug der Zukunft[4]. Im Rahmen einer 2012 von der Brancheninitiative Eco Rail Innovation beauftragten Studie zur Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für SPNV-Ausschreibungen, deren Nutzung der Entwicklung nachhaltiger und innovativer Fahrzeuglösungen dienen sollte, wurde die Multikuppelbarkeit als wichtige Innovation für die betriebliche Optimierung herausgearbeitet[5]. Auch der Branchenverband Allianz pro Schiene, welcher sich für die Förderung des umweltfreundlichen und sicheren Schienenverkehrs einsetzt[6],

[3] Vgl. BAG-SPNV (2016d), S. 3.
[4] Vgl. BAG-SPNV, VDV (2016) S. 2.
[5] Vgl. SCI, KCW (2012), Folie 3 und 50.
[6] Vgl. Allianz pro Schiene (2015b), Seite 1.

bezeichnet die universelle Kuppelbarkeit als generationsprägendes Merkmal von SPNV-Fahrzeugen und diskutiert zu der Möglichkeit, diese innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre gesetzlich vorzuschreiben[7].

Aktuell ist zwischen Triebfahrzeugen verschiedener Baureihen nur eine „Notkuppelbarkeit“ zum universellen Abschleppen der Fahrzeuge gegeben. Ein betriebliches Kuppeln ist nur möglich, wenn die Kuppelpartner bekannt sind und diese Anforderung aufgrund vertraglicher Vereinbarungen bereits im Rahmen der Fahrzeugentwicklung berücksichtigt wird. Mit der Vereinbarung einher geht ein großer Entwicklungs- und Nachweisaufwand sowie die Notwendigkeit, dass bestimmte Schnittstellen und Fahrzeugparameter bekannt sind, also offengelegt werden, was zu entsprechenden Herausforderungen insbesondere bei einer herstellerübergreifenden Kuppelbarkeit führt.

Um eine betriebliche Multikuppelbarkeit im SPNV herstellerunabhängig etablieren und ihre Potenziale heben zu können, sind unter Einbindung aller Marktakteure zahlreiche Schritte notwendig. Den Ausgangspunkt bildet die Identifikation eines chancenreichen Lösungsansatzes, welcher sich im Spannungsfeld zwischen dem technisch Machbaren, dem wirtschaftlich Sinnvollen und dem am Markt Umsetzbaren (vgl. Abbildung 1-1) erfolgreich im SPNV etablieren lässt.

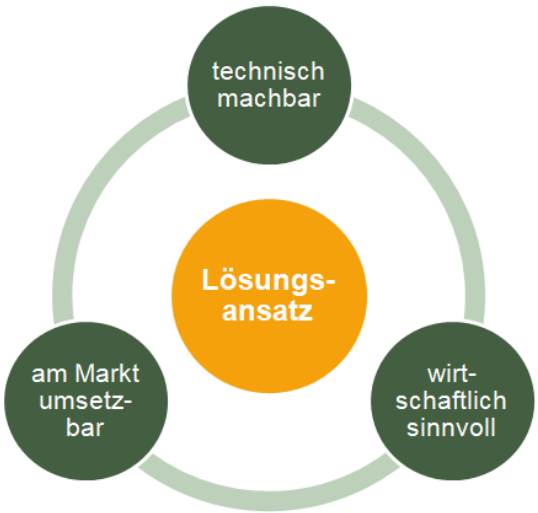


Abbildung 1-1 Spannungsfeld der erfolgreichen Etablierung eines Lösungsansatze
Quelle: eigene Darstellung

[7] Vgl. Allianz pro Schiene (2015a), Folie 20.

Vor diesem Hintergrund versteht sich die vorliegende Arbeit als ein Beitrag im Prozess der perspektivisch umzusetzenden betrieblichen Multikuppelbarkeit im SPNV in Deutschland. Im Ergebnis entsteht ein Zukunftskonzept, das die entscheidenden Faktoren für die erfolgreiche Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit beschreibt. Die zu diskutierenden Forschungsfragen und der Aufbau der Arbeit werden nachfolgend vorgestellt.

1.2 Forschungsfragen und Aufbau der Arbeit

Die Erarbeitung des Zukunftskonzeptes erfolgt entlang von sechs Forschungsfragen, welche nach der Einführung in diesem Kapitel nacheinander bearbeitet werden:

- Woraus ergibt sich die grundsätzliche Notwendigkeit der betrieblichen Multikuppelbarkeit, was ist ihr Nutzen und warum ist sie derzeit nicht gegeben?
- Welcher Lösungsansatz zur Herstellung der betrieblichen Multikuppelbarkeit erscheint besonders chancenreich und sollte deshalb näher untersucht werden?
- Welche Anforderungen ergeben sich für die technische Umsetzung?
- Welche technischen Risiken müssen für die Umsetzung des Lösungsansatzes beherrscht werden, damit der Bahnbetrieb sein aktuelles Sicherheitsniveau beibehält?
- Stehen die Kosten und der Nutzen des Lösungsansatzes in einem positiven Verhältnis, sodass der Lösungsansatz wirtschaftlich sinnvoll ist?
- Kann der Lösungsansatz unter den aktuellen Rahmenbedingungen im SPNV-Markt erfolgreich etabliert werden und wo besteht Handlungsbedarf?

Einleitend werden im *ersten* Kapitel die Problemstellung und der Aufbau der Arbeit beschrieben sowie wichtige Begriffe definiert.

Im *zweiten* Schritt wird anhand wesentlicher aktueller Herausforderungen des SPNV in Deutschland sowie anhand der Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit begründet, inwiefern diese für den SPNV einen Erfolgsfaktor darstellt und es wird erläutert, warum sie derzeit nicht umgesetzt ist.

Im *dritten* Kapitel werden mögliche Lösungsansätze zur Herstellung der betrieblichen Multikuppelbarkeit vorgestellt und mittels ihrer Bewertung der chancenreichste Ansatz herausgearbeitet, welcher in den sich anschließenden Kapiteln detailliert und ganzheitlich bewertet wird.

Als Basis hierfür werden im Kapitel *vier* ein Anforderungsprofil und notwendige betriebliche Rahmenbedingungen erarbeitet. Dabei erfolgt ausschließlich eine funktionale Betrachtung der technischen Aspekte. Notwendige In- und Output-Größen werden zwar definiert, aber der Prozess zur Generierung der Output-Größen wird nicht betrachtet.

Das Kapitel *fünf* dient der Einschätzung zur technischen Umsetzbarkeit und beinhaltet eine Einschätzung zum technischen Reifegrad und zu den technischen Risiken, welche mit der Umsetzung des Lösungsansatzes einhergehen.

Die mit dem Lösungsansatz verbundenen potenziellen Nutzen und Kosten werden im *sechsten* Kapitel identifiziert und hinsichtlich ihrer monetären Ausprägung relativ zueinander abgeschätzt, um so eine erste Einschätzung zu dessen Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen. Zentral ist hierbei weniger eine „Komma“-Rechnung als das Herausarbeiten der zentralen wirtschaftlichen Stellschrauben sowie die Erarbeitung eines Berechnungsmodells, welches zu einem späteren Zeitpunkt szenariospezifisch angewendet werden kann.

Daran anschließend werden im *siebten* Kapitel die Rahmenbedingungen zur Markteinführung und -etablierung untersucht. Dies umfasst die Betrachtung der dafür notwendigen Schritte, der damit in Kontext stehenden rechtlichen Fragestellungen und Securityanforderungen sowie die Einordnung in die aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussion.

Im letzten, dem *achten* Kapitel werden alle Untersuchungsergebnisse zu einem Zukunftskonzept zusammengefasst, welches darstellt, wie der identifizierte Lösungsansatz im Bahnsektor eingeführt und etabliert werden könnte. Abschließend wird ein Ausblick auf die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit gegeben.

Abbildung 1-2 visualisiert den Aufbau der Arbeit.

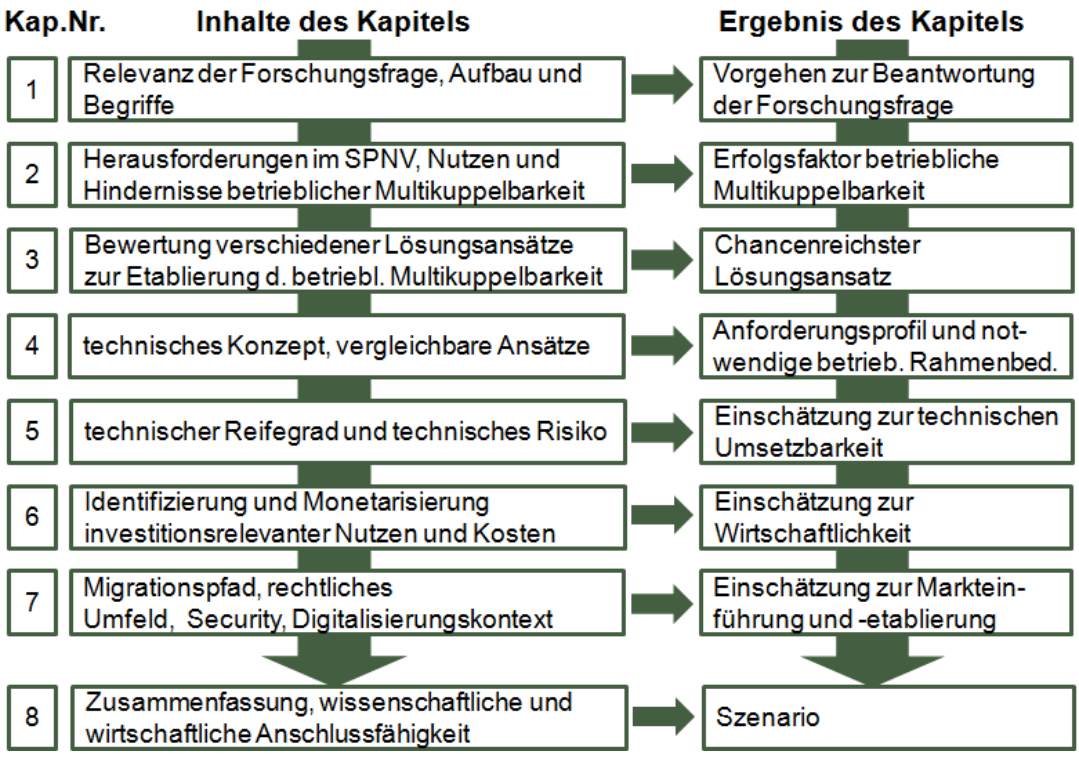


Abbildung 1-2 Aufbau der Arbeit
Quelle: eigene Darstellung

1.3 Definition zentraler Begriffe

Die vorliegende Arbeit untersucht ausgewählte Fragestellungen zur betrieblichen Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen im Umfeld des deutschen SPNV. Nachfolgend werden diese drei zentralen Begrifflichkeiten sowie die Unterscheidung von Master und Slave definiert.

Schienenpersonennahverkehr (SPNV)

Der SPNV ist der Teil des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), der auf der Schiene erbracht wird. Als ÖPNV werden diejenigen Linienverkehre bezeichnet, die der Personenbeförderung dienen, mit öffentlich allgemein zugänglichen Verkehrsmitteln erbracht werden und überwiegend die Verkehrsnachfrage im Stadt-, Vorort- oder Regionalverkehr befriedigen. In Fällen, bei denen diese Zuordnung unklar ist, wird die Reisedistanz betrachtet. Demnach liegt dann Personennahverkehr vor, wenn die Fahrgäste im Durchschnitt mit dem Verkehrsmittel nicht mehr als 50 Kilometer oder nicht länger als eine Stunde reisen.[8]

[8] Vgl. PBefG, § 8, Absatz 1.

Triebfahrzeug

Triebfahrzeuge sind Regelfahrzeuge, die über einen eigenen Fahrantrieb verfügen, zur Zugförderung benutzt werden oder selbsttätig als Zug fahren[9]. Als Regelfahrzeuge werden Eisenbahnfahrzeuge bezeichnet, die für den regelmäßigen Betrieb einer Bahn notwendig sind[10]. Eisenbahnfahrzeuge werden nach den einschlägigen Eisenbahngesetzen und -verordnungen gebaut und betrieben.

Betriebliche Multikuppelbarkeit

Eine betriebliche Multikuppelbarkeit von Triebzügen liegt dann vor, wenn bei Überführungsfahrten und im Normalbetrieb in den Zugverbänden jede Kombination von Triebfahrzeugen ohne betriebliche Einschränkungen möglich ist. Dies betrifft sowohl baureihen- als auch herstellerübergreifende Zugkonfigurationen.

Master und Slave

Die Arbeit fokussiert sich auf Zugverbände, welche aus zwei Fahrzeugeinheiten bestehen. Das in einem Zugverband vorausfahrende Triebfahrzeug wird als Master bezeichnet, das ihm folgende Fahrzeug als Slave.

[9] Vgl. EBO, § 18, Absatz 1ff.
[10] Vgl. Janicki, Reinhard (2008), S. 18.

2 Analyse der Ausgangssituation

Ziel des zweiten Kapitels ist es, die Motivation zur Etablierung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit zu erörtern und herauszuarbeiten, warum diese heute noch nicht existiert. Hierzu werden eingangs die aktuellen Herausforderungen des SPNV-Marktes (Abschnitt 2.1) und die Nutzenpotenziale einer betrieblichen Multikuppelbarkeit (Abschnitt 2.2) aufgezeigt. Im Anschluss wird der Status quo der Kuppelbarkeit von SPNV-Triebfahrzeugen anhand der drei Dimensionen Infrastruktur, Fahrzeugtechnik sowie Anforderungen der Aufgabenträger und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) erläutert (Abschnitt 2.3). Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung zum Erfolgsfaktor „Betriebliche Multikuppelbarkeit“ (Abschnitt 2.4).

2.1 Herausforderungen im SPNV in Deutschland

In Reaktion auf die massiv gesunkenen Marktanteile der Schiene von 1950 bis 1990 und die desolate Ergebnissituation der Bundesbahn und der Reichsbahn[11], wurde 1994 mit der Bahnreform in Deutschland ein struktureller Neubeginn im SPNV eingeleitet[12]. Seitdem ist es Sache der Bundesländer und der von ihnen benannten Stellen, SPNV-Leistungen bei EVU zu bestellen[13] und diesen dafür ein Entgelt zu zahlen[14].

In Abhängigkeit vom Aufgabenträger und der durchgeführten Vergabe existieren im SPNV verschiedene Varianten der Vertragsgestaltung zwischen Aufgabenträger und EVU, welche sich insbesondere hinsichtlich der Fragen unterscheiden, welchen Leistungsumfang das EVU erbringt (Fahrzeugbetrieb und -instandhaltung), wer die Fahrzeuge beschafft, wer deren Eigentümer ist und wie mit den Fahrgasteinnahmen umgegangen wird[15]. Ein typisches Beispiel ist in Abbildung 2-1 dargestellt: zwischen Aufgabenträger und EVU besteht ein Bruttovertrag zur Erbringung der Verkehrsleistung und die Fahrzeuge werden vom EVU beschafft. Im Vergleich dazu sei auf das RRX-Ausschreibungsmodell (Lebenszyklusmodell) verwiesen, das eine vom

[11] Vgl. Schwilling, Bunge (2014), S. 12.
[12] Vgl. Rudhart (2014), S. 36.
[13] Vgl. ebd., S. 6.
[14] Vgl. Schwilling et al. (2014), S. 107.
[15] Vgl. Rudhart (2014), S. 37.

Betrieb der Fahrzeuge getrennte Ausschreibung und Vergabe der Fahrzeugherstellung und Instandhaltung vorsieht[16].

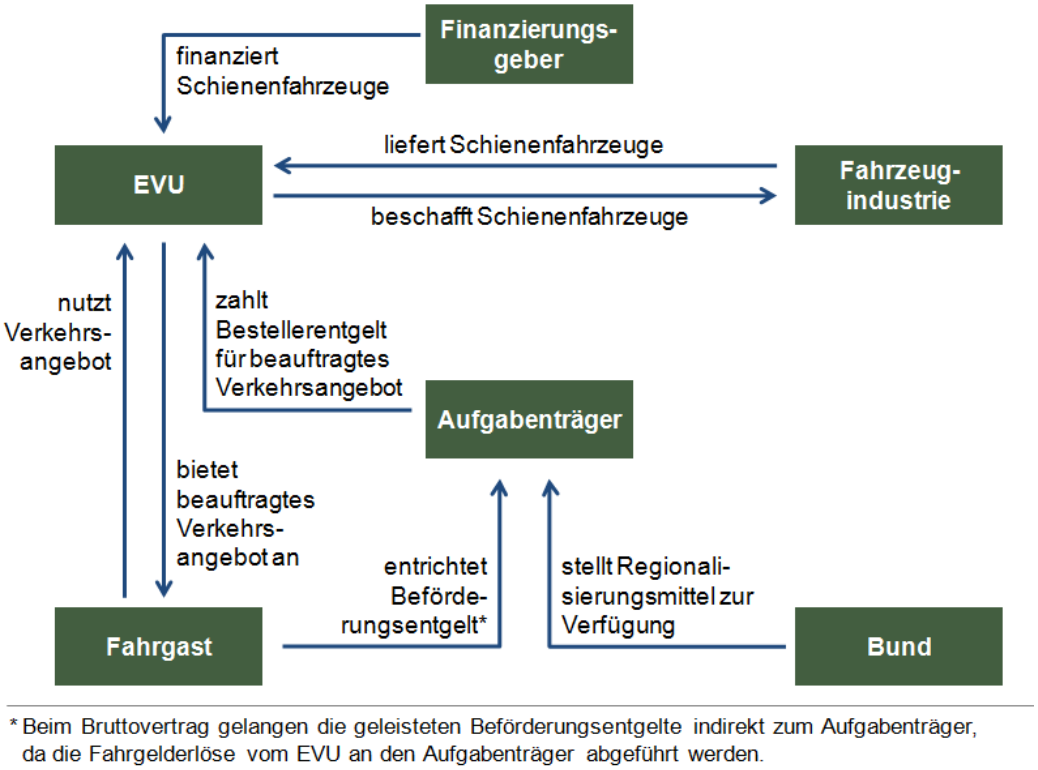


Abbildung 2-1 Beispiel für ein typisches Organisationsschema im SPNV[17]
Quelle: eigene Darstellung

Auch über 20 Jahre nach der Bahnreform wird diese im Eisenbahnsektor als klarer Erfolg bewertet[18], welcher sich zum Beispiel im starken Wachstum marktreflektierender Kennzahlen widerspiegelt (vgl. Abbildung 2-2).

[16] Vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 23.
[17] Dargestellt ist die heute übliche Wertschöpfungskette im SPNV. Je nach Festlegung des Aufgabenträgers existieren jedoch auch Konstellationen bei denen die Fahrgelderlöse direkt beim EVU verbleiben (Nettovertrag) oder er selbst die Fahrzeuge beschafft.
[18] Vgl. SCI, KCW (2012), Folie 7.

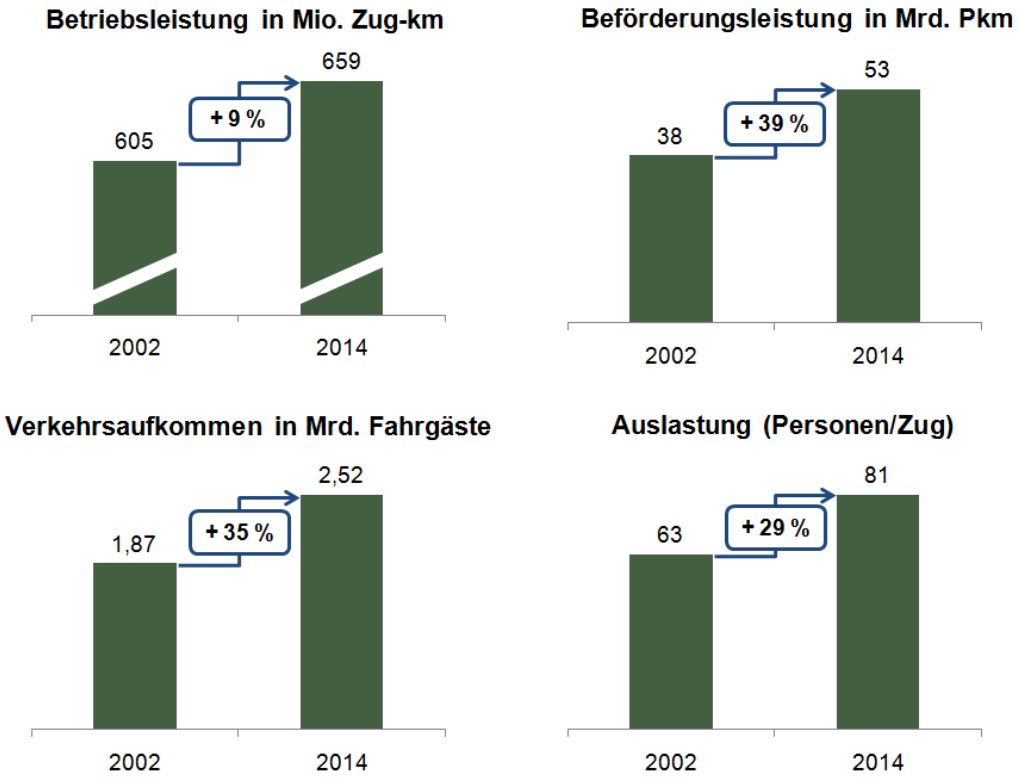


Abbildung 2-2 Entwicklung marktreflektierender Kennzahlen im SPNV
Quelle: eigene Darstellung auf Basis BAG-SPNV (2016a), S. 9 und 11

Inzwischen steht der SPNV vor neuen Herausforderungen, welche die Fortschreibung der positiven Entwicklung gefährden. Hierzu zählen eine signifikante Zunahme des intermodalen Wettbewerbs, eine sinkende Preisakzeptanz der Fahrgäste[19] sowie betriebliche Herausforderungen, zum Beispiel bedingt durch Baumaßnahmen an der Schieneninfrastruktur[20] und bei der betrieblichen Umsetzung und Umlaufplanung der Fahrzeuge. So werden in vielen Fällen zur Abdeckung der Spitzenlast Zugverbände mit mehreren Fahrzeugteilen benötigt, während für die Grundlast häufig ein Fahrzeug genügen würde. Helfen würde hier, eine Flexibilisierung der Zuglängen.

Nachfolgend wird anhand von sechs wesentlichen Herausforderungen die Ausgangssituation im SPNV detaillierter erläutert, um die Forschungsfrage dieser Arbeit in ihren Marktkontext einzuordnen und erste Argumente für die Motivation der betrieblichen Multikuppelbarkeit zu erarbeiten.

[19] Vgl. Theis (2016), Folie 2.
[20] Vgl. Schreyer (2017), Folie 8.

Herausforderung SPNV-Finanzierung

Die zwei wichtigsten Finanzierungsquellen für den SPNV sind die Regionalisierungsmittel und die Fahrgelderlöse. Dabei lag das Verhältnis von Fahrgelderlösen zu Zuschüssen der Aufgabenträger 2012 bei 40 Prozent zu 60 Prozent[21]. Wenngleich dieses Verhältnis je nach Verkehrsraum sehr unterschiedlich ausfällt[22], ist insgesamt eine Tendenz zur stärkeren Nutzerfinanzierung erkennbar[23]. Die Regionalisierungsmittel, welche insbesondere für die Finanzierung des SPNV vorgesehen sind[24], entstammen aus dem Steueraufkommen des Bundes[25]. Die Höhe und die Dynamisierung der jährlich zur Verfügung stehenden Regionalisierungsmittel sowie der Verteilungsschlüssel auf die Bundesländer sind im Regionalisierungsgesetz festgelegt[26] und wurden vom Bund zuletzt 2016 in Reaktion auf die Preisentwicklungen für den Betrieb des SPNV angepasst[27]. 2016 erhielten die Aufgabenträger Regionalisierungsmittel in Höhe von 8,2 Mrd. Euro, welche jährlich mit 1,8 Prozent dynamisiert werden[28]. Der davon für den SPNV verwendete Anteil schwankt je nach Bundesland zwischen 75 und 85 Prozent. Der Differenzbetrag wird für den öffentlichen Straßenpersonennahverkehr und Infrastrukturmaßnahmen des Schienenverkehrs verwendet.[29]

Der Aufgabenträger nutzt die ihm zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel, um damit den SPNV zu finanzieren[30]. Die größten Einzelkostenblöcke entfallen dabei üblicherweise mit etwa 39 Prozent auf die Infrastrukturnutzungsentgelte sowie mit 29 Prozent auf die Fahrzeuge (Fahrzeugkapitalkosten und Instandhaltungskosten)[31]. Abbildung 2-3 fasst die durchschnittliche Mittelherkunft und -verwendung zusammen.

[21] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 73.
[22] Vgl. ebd., S. 72.
[23] Vgl. ebd., (2013), S. 73.
[24] Vgl. Regionalisierungsgesetz, §6 Absatz 1.
[25] Vgl. GG, Art. 106a, Satz 1 und 2.
[26] Vgl. Regionalisierungsgesetz, §5 und Anlage 1.
[27] Vgl. BAG-SPNV (2016c), S. 1.
[28] Vgl. ebd., S. 1.
[29] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 70.
[30] Vgl. Rudhart (2014), S. 37.
[31] Vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 25.

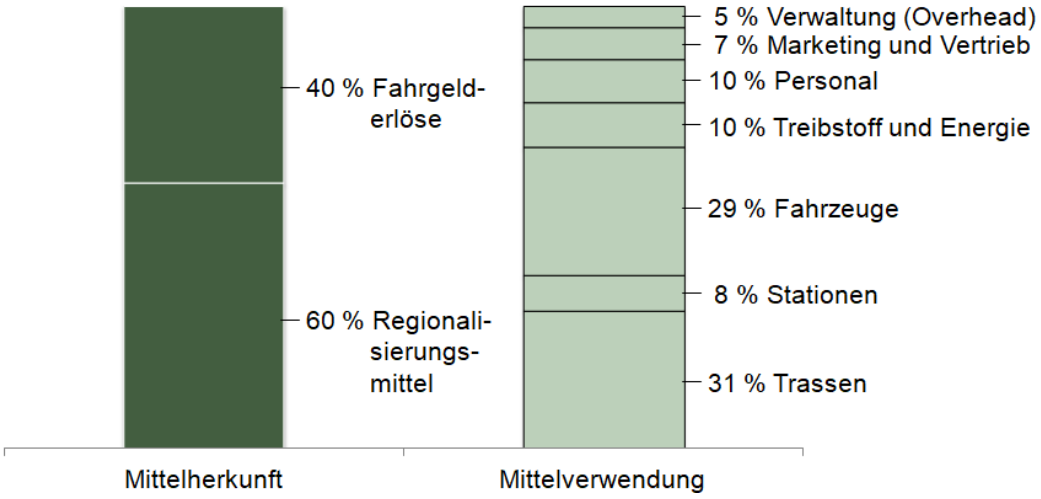


Abbildung 2-3 Mittelherkunft und Mittelverwendung im SPNV[32]
Quelle: eigene Darstellung auf Basis BAG-SPNV (2013), S. 73 und (2016a), S. 25

In den vergangenen Jahren wuchsen die Infrastrukturnutzungsentgelte deutlich stärker als die Regionalisierungsmittel[33] – mit entsprechend negativen Folgen für die verbliebenen Mittel des SPNV-Betriebs. In der Vergangenheit konnte die zunehmende Verknappung der finanziellen Mittel mit einer Steigerung der Mitteleffizienz der Bestellerentgelte ausgeglichen werden: 1994 entrichteten die Aufgabenträger pro Personenkilometer an die EVU ein Bestellerentgelt in Höhe von 17,6 Eurocent. In 2012 waren es nur noch 13,9 Eurocent pro Personenkilometer, was einer Reduktion von rund 21 Prozent entspricht, sodass die Verkehrsleistung trotz sinkender Bestellerentgelte kontinuierlich ansteigen konnte. Bei einer inflationsbereinigten Betrachtung fallen die Effizienzsteigerungen mit etwa 47 Prozent sogar noch deutlich höher aus.[34] Begründet werden kann diese Effizienzsteigerung zu einem erheblichen Maß mit der sogenannten Wettbewerbsdividende: Demnach werden die Verkehrsleistungen deswegen günstiger, weil die EVU, welche sich um einen Verkehrsvertrag bewerben, alle Prozesse hinsichtlich Effizienzpotenziale untersuchen, um das für sie bestmögliche und erfolgversprechendste Angebot abgeben zu können[35]. Mittlerweile ist diese Wettbewerbsdividende jedoch weitestgehend ausgeschöpft[36], sodass weitere Steigerungen der Infrastrukturkosten kaum mehr abgefangen werden können. Positiv ist daher die Einigung zur Trassen- und

[32] Dargestellt ist, wie sich die Gesamtkosten üblicherweise im SPNV aufteilen. Je nach Verkehrsnetz kann diese Verteilung jedoch stark variieren (vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 25).
[33] Vgl. Mofair et al. (2017), S. 50.
[34] Vgl. Schwilling et al. (2014), S. 108.
[35] Vgl. Mofair et al. (2017), S. 73.
[36] Vgl. Aberle (2015a), S. 11.

Stationspreisbremse vom Sommer 2016 zu bewerten, die deren Kostenanstieg auf 1,8 Prozent pro Jahr begrenzt[37].

Die Betrachtung der finanziellen Rahmenbedingungen zeigt, dass der finanzielle Handlungsspielraum für die Aufgabenträger stark begrenzt ist und zudem der wirtschaftliche Druck auf den SPNV zunehmend steigt. Die Aufgabenträger sind daher besonders motiviert, mit den vorhandenen finanziellen Mitteln ein optimales Verkehrsangebot für ihre Fahrgäste zu schaffen.

Herausforderung SPNV-Leistungsbestellung

Derzeit organisieren 27 Aufgabenträger und Aufgabenträgerorganisationen den SPNV in Deutschland[38]. Sie unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich der Organisationsform und der Fragestellung, wie viel Wertschöpfung und wie viele unternehmerische Chancen und Risiken sie selbst übernehmen und an das EVU übertragen. Widergespiegelt wird diese Frage in den Ausschreibungen von Verkehrsleistungen sowie in den Verkehrsverträgen.[39] Die Verkehrsverträge werden zwischen den Aufgabenträgern und den EVU abgeschlossen und definieren den Umfang und die Qualität des Verkehrsangebotes[40]. Werden Verkehrsverträge im Rahmen einer wettbewerblichen Vergabe verhandelt, beträgt ihre Laufzeit im Mittel zwölf Jahre[41]. Entsprechend der europäischen Vorgaben für öffentliche Dienstleistungsaufträge für den Schienenpersonenverkehr darf die Laufzeit höchstens 15 Jahre betragen[42]. Eine Verlängerung um höchstens 50 Prozent ist nur unter Berücksichtigung der Amortisierungsdauer der Wirtschaftsgüter und an Bedingungen geknüpft, welche in der VO (EG) 1370/2007 beschrieben sind[43].

Bezüglich der im Verkehrsvertrag gewählten Regelung zum Umgang mit den Fahrgasteinnahmen wird zwischen Netto- und Bruttoverträgen unterschieden. Beim Bruttovertrag, der immer häufiger Anwendung findet[44], liegt das Erlösrisiko

[37] Vgl. Mofair et al. (2017), S. 51.
[38] Vgl. BAG-SPNV (2016b).
[39] Vgl. Rudhart (2014), S. 37.
[40] Vgl. Personenbeförderungsgesetz, § 8, Absatz 3.
[41] Vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 17.
[42] Vgl. VO (EG) 1370/2007, Artikel 4, Absatz 3.
[43] Vgl. ebd., Artikel 4, Absatz 4.
[44] Vgl. Rudhart (2014), S. 38.

ausschließlich beim Aufgabenträger, beim Nettovertrag hingegen vollständig beim EVU[45].

Welches EVU welche SPNV-Leistung erbringt, wird in der Regel in einem europaweiten wettbewerblichen Vergabeverfahren entschieden[46]. Die Losgrößen der ausgeschriebenen Leistung schwanken zwischen 0,5 Mio. Zug-km und mehr als 5 Mio. Zug-km, wobei geringere Vergabevolumina häufig mit einer höheren Bieterbeteiligung einhergehen[47]. In Sonderfällen, welche den geschätzten Jahresdurchschnittswert, die jährliche öffentliche Personenverkehrsleistung oder die Dringlichkeit der Vergabe betreffen und von der Größe des EVU abhängen, kann eine Direktvergabe der Verkehrsleistung vorgenommen werden, welche jedoch mit einer Verkürzung der maximalen Vertragslaufzeit einhergeht[48].

Die Anzahl der zu vergebenen Leistungen[49] sowie das Volumen, die Komplexität und die Vielfalt der Anforderungen der zu vergebenen Leistungen haben in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen[50]. Gleichzeitig sind die ökonomisch-gestalterischen Spielräume der EVU gesunken[51] und Engpässe auf den Faktor-märkten Kapital, Verfügbarkeit von (Neu-)Fahrzeugen und Personal entstanden[52]. Die geringe Anzahl von möglichen Finanzierungsgebern und damit deren Marktmacht birgt zum Beispiel Gefahren in den Abhängigkeiten zwischen Finanzierern und EVU[53]. Viele Bieter stehen so insbesondere bei den großen Investitionsvolumina für Schienenfahrzeuge vor der Schwierigkeit, hinreichend günstige Zinskonditionen für ein marktfähiges Angebot zu erhalten[54].

Im Ergebnis dieser Herausforderungen war die Anzahl der Bieter in Vergabeverfahren deutlich zurückgegangen[55]. Zur Belebung des Bieterwettbewerbs etablierten die Aufgabenträger in den letzten Jahren verschiedene Modelle zur Unterstützung bei der Beschaffung und Finanzierung der Schienenfahrzeuge. Ziel war es, dass nicht mehr die EVU, sondern die Aufgabenträger oder Leasing-

[45] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 42.
[46] Vgl. VO (EG) 1370/2007, Artikel 5, Absatz 3.
[47] Vgl. Mofair; Netzwerk Europäische Eisenbahnen (2015), S. 28.
[48] Vgl. VO (EG) 1370/2007, Artikel 5, Absatz 4, 5 und 6.
[49] Vgl. Leenen, Strang (2013), S. 55.
[50] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 22.
[51] Vgl. Leenen, Strang (2013), S. 55.
[52] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 54.
[53] Vgl. Kühne (2016), S. 118.
[54] Vgl. Zerban (2015), S. 4.
[55] Vgl. Mofair et al. (2017), S. 78.

gesellschaften Fahrzeugeigentümer sind und die Fahrzeuge von dem beauftragten EVU gemietet werden. Einen Überblick zu solchen Modellen gibt Abbildung 2-4.

	Lebenszyklus-modell	Aufgaben-trägerpool	VRR-Modell	Leasing	EVU-Eigentum
Eigentümer	Aufgabenträger oder Dritte	Aufgabenträger	Aufgabenträger	Leasinggesell-schaft/EVU	EVU
Verantwortung Fahrzeug-auswahl	Aufgabenträger	Aufgabenträger	EVU	EVU bzw. Leasing-gesellschaft	EVU
Beschaffungs-struktur	Ausschreibung durch Aufgaben-träger	Ausschreibung durch Aufgaben-träger	EVU verkauft Fzg. nach Aus-wahl an AT, der diese an EVU zurück verleast	in Verant-wortung der Leasing-gesellschaft	in EVU-Verantwortung
Fahrzeug-finanzierung	Kommunal-kredite (bei Eigentum AT)	Kommunal-kredite oder Reg.Mittel	Kommunal-kredite (wenn möglich)	durch Leasing-gesellschaft	EVU
Fahrzeug-instandhaltung	durch AT mit Fzg.gestellung zusammen ausgeschrieben	durch AT mit Fzg.gestellung zusammen ausgeschrieben	EVU unter Kontrolle Asset Managers	EVU unter Kontrolle Asset Managers	EVU

Abbildung 2-4 Überblick über Modelle zur Fahrzeugbeschaffung und -finanzierung
Quelle: BAG-SPNV (2013), S. 34

Die Anwendung der Modelle konnte den Wettbewerb in den vergangen Jahren erfolgreich stimulieren[56]. Mittlerweile werden sie als Unterstützung von fast allen Aufgabenträgern angewandt[57]. Das in Abbildung 2-4 genannte VRR-Modell und das vergleichbare BAWÜ-Modell fanden beispielsweise bei 14 Prozent der Gesamt-vergaben der in 2015 bis 2020 aufgenommenen Zug-km Anwendung[58]. Gleichzeitig führt dieses Engagement jedoch auch dazu, dass erhebliche technische Zulassungs- und Einsatzrisiken vom EVU zum Aufgabenträger übergehen[59].

Wenngleich seit 2011 eine positive Trendwende festgestellt werden kann, so liegt die Bieteranzahl bei Verkehrsausschreibungen nach wie vor auf einem zu geringem Niveau: 2014 beteiligten sich lediglich 2,4 Bieter pro Verfahren, wobei sich häufig außer dem Altbetreiber lediglich ein bis zwei konkurrierende EVU um den Verkehrs-vertrag bewarben[60]. Die geringe durchschnittliche Bieteranzahl in der Angebotsphase ist insbesondere deswegen als kritisch zu bewerten, da hier der Wettbewerb zwischen

[56] Vgl. mofair, Netzwerk Europäische Eisenbahnen (2015), S. 41.
[57] Vgl. Hoopmann (2016), Folie 19.
[58] Vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 33.
[59] Vgl. Leenen, Strang (2013), S. 56.
[60] Vgl. mofair, Netzwerk Europäische Eisenbahnen (2015), S. 27.

den EVU als ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Entwicklung des SPNV eingeschätzt wird[61].

Anspruch der Aufgabenträger muss es daher sein, eine erneute Trendumkehr zu verhindern, indem sie den Bietern ein optimales Marktumfeld schaffen[62]. Die große Anzahl an Verkehrsverträgen, die in den nächsten Jahren wieder oder erstmalig ausgeschrieben wird[63], verstärkt die Herausforderungen der Aufgabenträger und EVU, die Anforderungen der Verfahren zu bewältigen und dabei gleichzeitig den organisatorischen und finanziellen Möglichkeiten Rechnung zu tragen.

Herausforderung Betreibervielfalt

In Folge des Wettbewerbs zwischen den EVU bei der Vergabe von Verkehrsverträgen stieg der Marktanteil der Wettbewerber der Deutschen Bahn (DB) AG kontinuierlich an. 2016 wurden bereits 33 Prozent der Betriebsleistung, beziehungsweise rund 222 Mio. Zug-km von den Wettbewerbern der DB AG erbracht[64]. 2002 betrug dieser Anteil noch rund acht Prozent[65]. Auf ausländische Staatsbahnen, Finanzbeteiligungen und Landes-/Kommunalbahnen entfallen jeweils zwischen 30 und 35 Prozent. Bezogen auf die Wettbewerbsunternehmen erbringen Transdev, Netinera, BenEX und die Hessische Landesbahn die höchsten Betriebsleistungen[66].

Für die Aufgabenträger ergeben sich aus der Betreibervielfalt neue Herausforderungen, da es ihre Zielsetzung ist, dass der SPNV aus Fahrgastsicht „aus einem Guss“ wahrgenommen wird. Dies umfasst unter anderem die Fahrplanauskunft, Ansprechpartner und die Fahrgastinformation.[67] Weiterhin ergeben sich erhöhte administrative Aufwände und die Gefahr von Informationsverlusten und nicht gehobenen Fahrplanoptimierungspotenzialen bei der Abstimmung einzelner Netze und Linien.

[61] Vgl. Hoopmann (2016), Folie 4 und 8.
[62] Vgl. mofair, Netzwerk Europäische Eisenbahnen (2015), S. 28.
[63] Vgl BAG-SPNV (2016a), S. 17.
[64] Vgl. Geuckler (2017), Folie 2.
[65] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 23.
[66] Vgl. mofair, Netzwerk Europäische Eisenbahnen (2015), S. 22.
[67] Vgl. Husmann (2017), Folie 10.

Herausforderung Fuhrpark

2016 umfasste die SPNV-Flotte etwa 16.000 Fahrzeuge, darunter etwa 12.000 Triebfahrzeuge. Der Anteil der DB AG an der SPNV-Flotte insgesamt und bezogen auf die Triebfahrzeuge liegt jeweils bei 90 Prozent.[68] Analog zum sinkenden Anteil der Verkehrsleistung der DB AG, sinkt auch ihr Anteil am Fuhrpark: 2015, also ein Jahr zuvor, lag ihr Anteile bezogen auf die gesamte SPNV-Flotte noch bei 94 Prozent, beziehungsweise bei 93 Prozent bezogen auf die Triebfahrzeuge.[69]

Außer der Verschiebung des Anteils der DB AG an der SPNV-Fahrzeugflotte, ist auch eine Änderung bei der Aufteilung der Antriebsarten, hin zu einem höheren Anteil der Elektro-Triebfahrzeuge festzustellen, welcher 2016 bei 76 Prozent lag[70] und auch zukünftig weiter steigen wird[71]. Die Elektrotriebfahrzeuge weisen im europäischen Vergleich ein geringes Durchschnittsalter auf. Dieseltriebwagen der DB AG sind im Schnitt 14 Jahre, die der Wettbewerber neun Jahre alt. Die einstöckigen Elektrotriebwagen der DB AG haben ein Durchschnittsalter von elf Jahren, die der DB Wettbewerber sind im Schnitt sieben Jahre jünger.[72]

Rückläufig ist die Entwicklung bei Lokomotiven und Reisezugwagen[73], was den Schluss zulässt, dass Fahrzeugkonzepte mit Triebfahrzeugen stetig an Bedeutung gewinnen werden. Der Betrieb der Fahrzeuge erfolgt entsprechend der Anforderungen aus den Verkehrsverträgen gekuppelt oder ungekuppelt, als Ein-, Zwei- oder Mehrteiler.

Für die Zukunft ergibt sich, abgeleitet aus den erwarteten SPNV-Vergaben und der Flottenstruktur, ein jährlicher Bedarf von 270 bis 350 Neufahrzeugen[74]. Derzeit sind in Deutschland im SPNV die Unternehmen Alstom, Bombardier, Siemens und Stadler die zentralen Schienenfahrzeughersteller. Erste Bestellungen bei ausländischen Wettbewerbern fanden durch die DB AG[75] und die Niederbarnimer Eisenbahn beim polnischen Hersteller Pesa[76] und dem tschechischen Unternehmen

[68] Vgl. VDV (2017), S. 45.
[69] Vgl. VDV (2016), S. 43ff.
[70] Vgl. VDV (2017), S. 45.
[71] Vgl. Leenen et al. (2012), S. 39.
[72] Vgl. Leenen, Strang (2013), S. 55f.
[73] Vgl. Leenen et al. (2012), S. 39.
[74] Vgl. Schuppe, Fleischmann (2015), Folie 9.
[75] Vgl. Deutsche Bahn (2017a).
[76] Vgl. NEB (2016).

Skoda[77] statt. Potenzielle Markteinsteiger in den deutschen SPNV-Fahrzeugmarkt sind zudem die Unternehmen CAF aus Spanien, CSR/CNR aus China sowie Hitachi Rail Europe aus Großbritannien[78].

Je nach Vergabe- und Vertragsmodell (vgl. Herausforderung SPNV-Leistungsbestellung, Abbildung 2-4) beauftragen die EVU oder Aufgabenträger die Schienenfahrzeughersteller mit der Lieferung von kundenspezifischen Lösungen. Die Hersteller erstellen auf Basis von Lastenheften der für die Fahrzeugbeschaffung Verantwortlichen (vgl. Abbildung 2-4) Pflichtenhefte, nach denen sie die neuen Fahrzeuge bauen beziehungsweise vorhandene Fahrzeuge umrüsten[79]. Fahrzeug-eigentümer sind Aufgabenträger, EVU oder Dritte, wie zum Beispiel Leasinggesellschaften. Im Ergebnis verkehren auf dem deutschen SPNV-Netz unterschiedliche Fahrzeugkonzepte und -ausstattungen, welche die historisch gewachsenen Strukturen sowie individuelle Bedingungen und Wünsche der Verkehrsgebiete abbilden[80]. Eine gute Übersicht über die auf dem SPNV-Netz verkehrende Vielfalt an Baureihen bietet die SPNV-Karte, welche jährlich vom Bahn-Report veröffentlicht wird[81]. Für Aufgabenträger und EVU führt diese fehlende Standardisierung zu Einschränkungen beim Fahrzeugeinsatz sowie zu projekt- und netzspezifischen Fahrzeuglösungen und damit zu höheren Fahrzeug-beschaffungskosten. Weiterhin schränkt die große Vielfalt an Ausrüstungs- und Ausstattungsvarianten die Entwicklung eines Sekundärmarktes für Fahrzeuge, welcher den Bieterwettbewerb stimulieren würde, stark ein[82].

Herausforderung Fahrgasterwartungen

Um die Zufriedenheit der Fahrgäste zu gewährleisten, müssen ihre Erwartungen insbesondere in den Bereichen Fahrzeug, Fahrzeit, Fahrgastinformation, Qualität, Zu- und Abgang sowie Angebot/Fahrplan erfüllt werden[83]. Dabei belegen Erfahrungen aus den vergangenen Jahren, dass bei im Wettbewerb vergebenen Netzen bessere Werte bei der Kundenzufriedenheit erreicht werden, als wenn die

[77] Vgl. DB Systemtechnik (2015).
[78] Vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 29.
[79] Vgl. Johner (2017).
[80] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 47.
[81] Vgl. Bahn-Report (2016).
[82] Vgl. Leenen, Strang (2013), S. 56.
[83] Vgl. Husmann (2017), Folie 9.

Leistung direkt vergeben wurde[84]. Grund hierfür sind unter anderem die in den SPNV-Verträgen definierten hohen Anforderungen an Reisequalität und -komfort (zum Beispiel mehr Zugbegleitpersonal, moderne Fahrzeuge, bessere Fahrgastinformation, Sauberkeit)[85]. Zudem führte der oben erläuterte Wettbewerb zwischen den EVU auch zu Verbesserungen bei den Schienenfahrzeugen. Die Züge weisen unter anderem eine höhere Pünktlichkeit und höhere Barrierefreiheit auf, sind geräuscharm und verfügen über Klimatisierungsanlagen und ein höheres Beschleunigungsvermögen.[86] Dass diese Verbesserungen, also der Einsatz qualitativ hochwertiger Neufahrzeuge, zu erheblichen Fahrgaststeigerungen führt, konnte in verschiedenen Studien nachgewiesen werden[87].

Aufgabenträger und EVU sind gefordert, den Erwartungen der Fahrgäste gerecht zu werden und das bestmögliche Verkehrsangebot vorzuhalten. In einer Branchenumfrage gaben 94 Prozent der befragten etwa 200 Akteure des öffentlichen Verkehrs an, dass sie ihr Netz beziehungsweise ihr Angebot in regelmäßigen Abständen anpassen würden, vor allem motiviert durch die Wünsche und Anregungen ihrer Fahrgäste. Andere Studien ergaben, dass sich Fahrgastzahlen nur dann weiter positiv entwickeln, wenn das Angebot mit den Kundenerwartungen Schritt hält[88].

Um das Angebot nachfrage- und serviceorientiert zu gestalten, sowie um den zukünftigen Herausforderungen des Marktes zu begegnen, bedarf es eines ganzheitlichen Lösungsansatzes, der sich aus wettbewerbsfähigen Preisen und wettbewerbsfähigen Produkten zusammensetzt. Die Digitalisierung des Vertriebs, die persönliche Kommunikation und attraktive Produktangebote tragen hierbei eine entscheidende Rolle.[89]

Herausforderung intermodaler Wettbewerb

Den Fahrgästen stehen entlang der Reisekette zunehmend mehr Verkehrsangebote zur Verfügung[90]. Dabei ist die Anzahl der Anbieter bei Ride-, Car- und Bike-

[84] Vgl. Husmann (2017), Folie 7.
[85] Vgl. ebd., Folie 7.
[86] Vgl. Schreyer (2017), Folie 5.
[87] Vgl. BAG-SPNV (ohne Angabe).
[88] Vgl. Mott, Koesling (2013), S.21.
[89] Vgl. Theis (2016), Folie 11.
[90] Vgl. ebd., Folie 3.

Sharing-Angeboten gewachsen, während die Anzahl an Anbietern auf der Schiene stagnierten und die Zahl der Busanbieter sogar gesunken ist[91].

Stark beeinflusst wird der Schienenverkehr vom intermodalen Preis- und Angebotswettbewerb: So ist der SPNV zum Beispiel im Vergleich zu Fernbusangeboten auf längeren Reiseweiten sowohl preislich als auch zeitlich nur sehr eingeschränkt wettbewerbsfähig. Weitere Einflussfaktoren ergeben sich aus der Konjunktur, der Energiekostenentwicklung sowie Streik- und Unwettereffekten.[92]

Prognosen gehen davon aus, dass die Mobilitätsrate auch in den kommenden Jahren weiter zunimmt. Zielsetzung der Aufgabenträger und EVU muss es daher sein, trotz der steigenden intermodalen Wettbewerbsintensität entlang der gesamten Reisekette einen signifikanten Marktanteil zu erhalten beziehungsweise zu gewinnen.[93] Die hohe Auslastung des Schienennetzes zwingt sie dabei, das existierende Transportsystem zu optimieren, ohne die Infrastruktur weiter zu belasten. Schienenfahrzeuge mit hoher Kapazität und innovative Betriebskonzepte stellen hier einen Lösungsbaustein dar.

Zusammenfassung der Herausforderungen im SPNV

Die Betrachtung des organisatorischen Rahmens, der Entwicklungen der letzten fast 25 Jahre und der aktuellen Herausforderungen, verdeutlicht, wie komplex und vielschichtig der SPNV in Deutschland ist. Entsprechend herausfordernd ist auch die Aufgabe, die Zukunftsfähigkeit des SPNV nachhaltig zu gewährleisten (vgl. Abbildung 2-5). Die Marktakteure des SPNV müssen daher eigene, innovative Produkt- und Preisakzente setzen, um die vorhandenen Fahrgäste zu halten und neue Fahrgäste für die Schiene zu gewinnen.

[91] Vgl. Theis (2016), Folie 3.
[92] Vgl. ebd., Folie 5f.
[93] Vgl. ebd., Folie 3 und Folie 9.

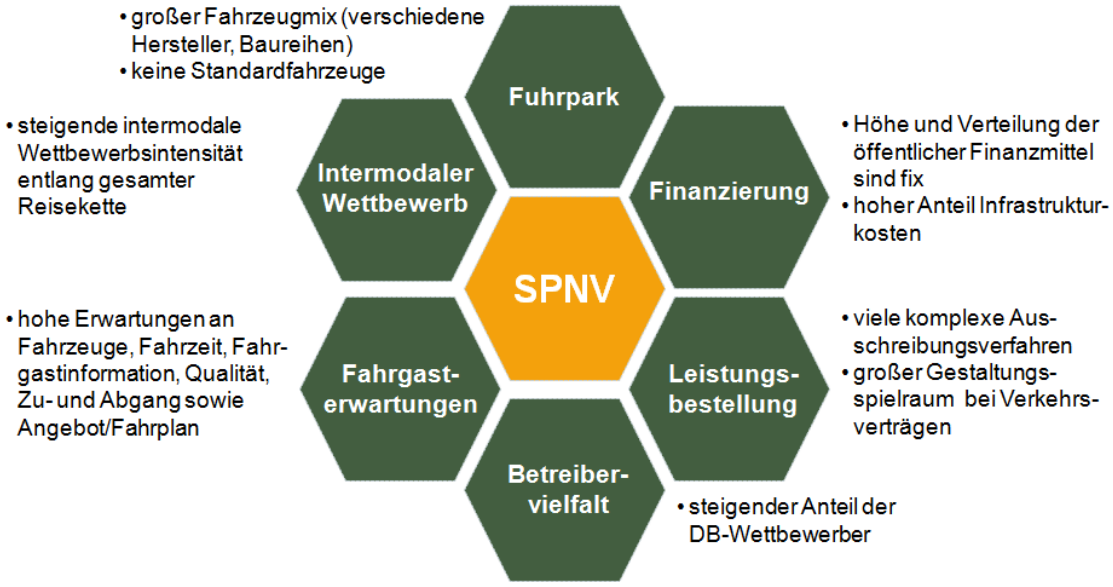


Abbildung 2-5 Überblick zu Herausforderungen des SPNV in Deutschland
Quelle: eigene Darstellung

Die Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit kann dabei unterstützen, den genannten Herausforderungen zu begegnen. Mit ihr wird es möglich, die Triebfahrzeuge flexibler einzusetzen – unter Einhaltung bestimmter Rahmenbedingungen sogar in anderen Netzen. Im Ergebnis werden die Attraktivität und die Wirtschaftlichkeit des SPNV-Angebotes verbessert. Welche Nutzenpotenziale sich im Einzelnen ergeben, wird im nächsten Abschnitt detailliert erläutert.

2.2 Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit

Wenngleich in Deutschland die Sicherstellung einer ausreichenden Bedienung der Bevölkerung mit SPNV-Leistungen eine Aufgabe der Daseinsvorsorge darstellt[94], so ist es für die Zukunftsfähigkeit des SPNV doch wesentlich, dass außer den Ansprüchen der Fahrgäste an das Verkehrsangebot, auch dessen Wirtschaftlichkeit gewährleistet ist. Inwiefern die Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen auf diese beiden Aspekte positive Wirkung haben kann und sich damit die Chance bietet, den SPNV in seiner intermodalen Wettbewerbsfähigkeit zu stärken, wird nachfolgend erläutert.

[94] Vgl. Regionalisierungsgesetz, §1, Absatz 1.

Verbesserung der Wirtschaftlichkeit

Maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit eines Verkehrsangebotes sind einerseits die Ausgaben zur Beschaffung der Fahrzeuge und ihren Betrieb sowie andererseits die Einnahmen aus den Fahrgelderlösen[95]. Nachfolgend wird auf diese Bereiche einzeln eingegangen.

Ausgaben zur Schienenfahrzeugbeschaffung

Die notwendigen Ausgaben zur Beschaffung der Schienenfahrzeuge stellen für Bieter, die sich um Verkehrsleistungen bewerben, eine große Herausforderung dar und gelten als eine der Ursachen für den Rückgang der Bieterzahlen bei Verkehrsausschreibungen mit Fahrzeugkalkulation[96]. Die Ausgaben für die Beschaffung werden zentral beeinflusst von der Anzahl an benötigten Fahrzeugen sowie den Bedingungen der Fahrzeugfinanzierung.

Die Größe der betrieblichen Reserveflotte und die Möglichkeit, auf Gebrauchtfahrzeuge zurückgreifen zu können, stehen in direkter Kausalität zu der Anzahl an insgesamt benötigten Fahrzeugen. Mit Hilfe der betrieblichen Multikuppelbarkeit reduziert sich die Anzahl an benötigten betrieblichen Reservefahrzeugen, da aufgrund der Durchtauschbarkeit der gesamten Fahrzeugflotte, in betrieblichen Störungsszenarien nicht mehr nur auf die Fahrzeuge der selben Baureihe, sondern auf die gesamte Flotte zurückgegriffen werden kann.

Da die Multikuppelbarkeit die Wahrscheinlichkeit auf Wiedereinsatz der Fahrzeuge erhöht, steigt die Akzeptanz und Marktbedeutung von Gebrauchtfahrzeugen. In Folge dessen kann sich ein Gebrauchtfahrzeugmarkt etablieren. Die Marktattraktivität für Fahrzeugeigentümer, Fahrzeugvermieter und Leasinggeber steigt – mit positiver Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit des Systems sowie die Fahrzeugfinanzierungsbedingungen und damit auf den Spielraum der Bieter in Bezug auf die finanzielle Angebotsgestaltung bei Verkehrsausschreibungen.

Vorausgesetzt, Gebrauchtfahrzeuge sind in der Verkehrsausschreibung zugelassen, haben die bietenden EVU zudem mehr Handlungsspielraum bei der fahrzeugseitigen und betrieblichen Gestaltung ihrer Angebote. Stichworte sind hier zum Beispiel die Zusammensetzung der Flotte (Fahrzeugmix) sowie die Fahrzeugeinsatzplanung zur

[95] Die Einnahmen aus den Mitteln der öffentlichen Hand werden an dieser Stelle nicht aufgeführt, da auf sie kein Einfluss genommen werden kann.
[96] Vgl. Zerban (2015), S. 4.

Abdeckung des vorgegebenen Fahrgastaufkommens. Der Bietermarkt wird stimuliert; mit positiven Effekten auf die Wirtschaftlichkeit der Angebote.

Ein Zweitmarkt für den Wiedereinsatz bietet insbesondere großes Potenzial vor dem Hintergrund der Differenz zwischen der durchschnittlichen Länge eines SPNV-Verkehrsvertrages von ungefähr zwölf Jahren zur durchschnittlichen Nutzungsdauer für Elektrotriebwagen von 30 Jahren, beziehungsweise 25 Jahren bei Dieseltriebwagen[97].

Können die Beschaffungskosten reduziert werden, sinken nicht nur die zu investierenden Mittel, sondern auch die Kapitalbindung. Die Liquidität der Fahrzeugeigentümer steigt.

Verringerung der variablen Kosten

Die variablen Kosten umfassen die Ausgaben für den Betrieb der Schienenfahrzeuge und setzen sich im Wesentlichen aus den Kosten für Personal, Energie, Wartung und Instandhaltung als auch für Entgelte für die Trassen- und Stationsnutzung zusammen (vgl. Kapitel 2.1, Abbildung 2-3).

Die betriebliche Multikuppelbarkeit ermöglicht eine deutliche Steigerung der Flexibilität in der Fahrzeugdisposition. Die EVU können auf Nachfrageänderungen im Rahmen der im Verkehrsvertrag gegebenen Möglichkeiten flexibler reagieren, ihr Platzangebot bedarfsgerecht anpassen und die geplanten Zugzusammensetzungen und damit Laufleistungen erhöhen oder reduzieren. Im Ergebnis können die variablen Fahrzeug- und Personalkosten sowie die Produktivität, also das Verhältnis von Verkehrs- zu Betriebsleistung, optimiert werden. Hierzu zählen auch Einsparungen aufgrund des Wegfalls der Disposition von Triebfahrzeugführern.

Weitere Einsparpotenziale existieren bei den betriebs- und umlaufbedingten Überführungskosten, welche zum Beispiel entstehen, wenn Triebfahrzeuge am Umlaufende als Leerfahrt, also ohne wirtschaftlichen Nutzen, an einen anderen Ort gebracht werden müssen, da Start- und Zielhalt voneinander abweichen. Sind Triebzüge beliebig kuppelbar, müssen Triebfahrzeuge verschiedener Bauart und -reihe nicht mehr einzeln oder mit reduzierter Geschwindigkeit überführt werden, sondern verkehren gekuppelt und mit normaler Betriebsgeschwindigkeit. Diese Variantenfreiheit hat direkte Auswirkungen auf die Personalkosten, da für das hintere

[97] Vgl. Leenen et al. (2012), S. 43.

Fahrzeug kein Triebfahrzeugführer benötigt wird und reduziert geringfügig die zu zahlenden Trassenentgelte, um die von der zweiten Lok zurückgelegten Trassenkilometer. Auf dem Streckennetz der DB Netz AG beispielsweise variiert das Trassenentgelt je nach Bundesland und Marktsegment (Last- oder Leerfahrt) zwischen 2,884 und 3,520 Euro je Trassenkilometer bei Leerfahrten und zwischen 4,778 und 5,531 Euro je Trassenkilometer bei Lastfahrten[98]. Zudem unterstützt die betriebliche Multikuppelbarkeit, bei dem Ziel, Leerfahrten auf ein Minimum zu reduzieren, da Triebfahrzeuge mit jedem Fahrzeug gekuppelt werden können, das auf der gleichen Strecke verkehrt.

Die oben genannten Einsparpotenziale bei Überführungsfahrten liegen auch im Normalbetrieb und baustellenbedingt gestörten Betrieb vor, wenn Fahrzeuge gekuppelt betrieben werden können, bei denen dies gewollt aber bisher nicht möglich war. Hier ergeben sich zudem weitere Einsparpotenziale bei den Stationsnutzungsentgelten, die je Stationshalt und damit pro Zug und nicht pro Fahrzeug zu entrichten sind. Im Mittel lagen diese 2016 bei 5,19 Euro pro Stationshalt[99].

Wie im weiteren Verlauf des Kapitels gezeigt werden wird, kann die betriebliche Multikuppelbarkeit dazu beitragen, die Fahrplanstabilität und die Pünktlichkeit des Verkehrssystems weiter zu erhöhen. Ein verspätungsarmer Betriebsablauf senkt für die EVU das Risiko von verspätungs- oder ausfallbedingen Pönalezahlungen.

Die betriebliche Multikuppelbarkeit trägt damit über verschiedene Hebel dazu bei, die variablen Kosten zu senken.

Steigerung der Einnahmen

Die oben erwähnte erhöhte betriebliche Flexibilität in der Fahrzeugdisposition hat weiterhin positiven Einfluss auf die Einnahmen der EVU. Dies begründet sich zum einen in der Möglichkeit, weitere Fahrgelderlöse zu generieren und zum anderen in der Möglichkeit, eigene Fahrzeuge, welche vorübergehend nicht benötigt werden, an andere EVU, Aufgabenträger oder Wagenhalter gegen ein Entgelt zu vermieten.

[98] Vgl. DB Netz (2017d), S. 10.
[99] Vgl. BNetzA (2016), S. 50.

Beispiele für solch einen relativ kurzfristigen und nicht langandauernden Einsatz von Triebfahrzeugen sind:

- Bedarfsdeckung durch verspätete Zulassung bestellter Neufahrzeuge,
- Abdeckung von Bedarfsspitzen oder zur Erhöhung der Kapazität sowie
- Ersatz von Unfallfahrzeugen beziehungsweise Überbrückung bei Wartung oder Reparatur[100].

Weiterhin kann das EVU auf temporäre Nachfragesteigerungen, wie zum Beispiel bei Sportgroßereignissen reagieren, seine geplante Zugzusammensetzung stärken und damit seine Fahrgelderlöse erhöhen. Wurde zwischen dem EVU und dem Aufgabenträger ein Nettovertrag zur Erbringung der Verkehrsleistung abgeschlossen, profitiert das EVU, da sich in diesem Fall das EVU über das Bestellerentgelt und die Fahrgelderlöse finanziert. Wurde ein Bruttovertrag abgeschlossen, liegt der Nutzen beim Aufgabenträger[101].

Wie bereits dargestellt, unterstützt die betriebliche Multikuppelbarkeit die Etablierung eines Gebrauchtfahrzeugmarktes, wodurch beim Verkauf von nicht mehr benötigten Fahrzeugen höhere Preise erzielt werden können, da sich die Bedarfssituation und damit die Nachfrage nach Gebrauchtfahrzeugen positiv entwickelt. Die vorgestellten Aspekte verdeutlichen die positive Wirkung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit auf die Wirtschaftlichkeit des SPNV. Sie sind in Abbildung 2-6 zusammengefasst dargestellt.

[100] Vgl. Leenen et al. (2012), S. 44.
[101] Vgl. Kaumanns (2006), S. 1286 f.

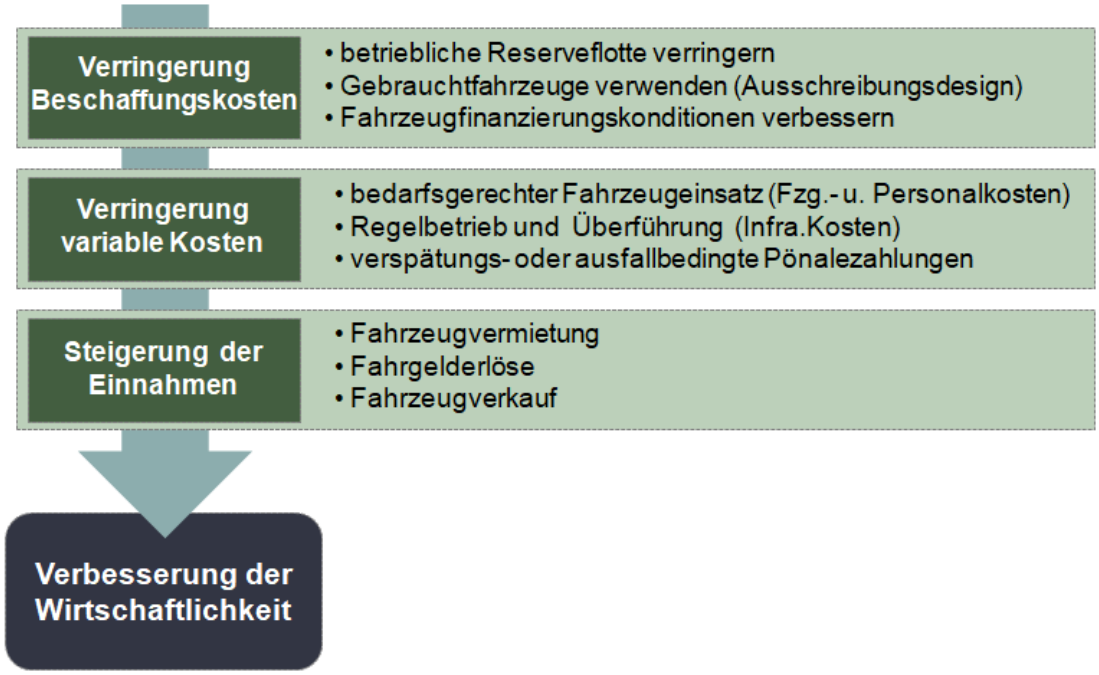


Abbildung 2-6 Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit
Quelle: eigene Darstellung

Welcher Nutzen sich in Bezug auf die Attraktivität des Verkehrsangebotes ergibt, wird nachfolgend vorgestellt.

Erhöhung der Attraktivität des Verkehrsangebotes

Ziel der Aufgabenträger ist es, den Fahrgästen ein attraktives Nahverkehrsangebot zu bezahlbaren Konditionen anzubieten[102]. Für eine konsequente Ausrichtung des Angebotes an den Bedürfnissen der Fahrgäste sind der Preis und der Reisezeitaufwand und dabei insbesondere die Verbindung, die Pünktlichkeit und die Reisegeschwindigkeit die zentralen Kriterien[103]. Nachfolgend wird dargestellt, welchen positiven Einfluss die Multikuppelbarkeit auf diese Qualitätsmerkmale und damit auf die Angebotsattraktivität haben kann.

Verbesserung der Verbindung

Das Verkehrsangebot nachfrage- und serviceorientiert zu entwickeln, wird als Voraussetzung eines Fahrgastzuwachses eingeschätzt[104]. Aus Sicht des Fahrgastes sollte das Verkehrsangebot so aufgebaut sein, dass ein problemloses Reisen möglich ist[105]. Dabei wünschen sich Fahrgäste flexible Angebote, die ihren individuellen

[102] Vgl. Henckel (2011), Folie 6.
[103] Vgl. Brenck et al. (2008), S. 23f.
[104] Vgl. Mott, Koeslin (2013), S. 21.
[105] Vgl. Brenck et al. (2008), S. 22.

Bedürfnissen gerecht werden[106]. Eine gute Verbindung liegt demnach unter anderem dann vor, wenn ein durchgehendes Reisen ohne Umsteigen möglich ist[107]. So wird die Zeit, die für einen Umstieg notwendig ist, 17 Mal höher bewertet als eine Minute Fahrzeit im Zug[108].

Mit Hilfe der Multikuppelbarkeit und der damit einhergehenden Durchtauschbarkeit der Flotte wird auch die Anwendung von Flügelkonzepten deutlich vereinfacht. Bei Flügelkonzepten werden zwei Zugteile, die von verschiedenen Linienästen kommen, am ersten gemeinsamen Halt gekoppelt und verkehren dann auf der Stammstrecke als eine Zugeinheit. Auf der Gegenrichtung werden sie an dem gleichen (nun letzten gemeinsamen) Halt getrennt und verkehren in den Verästelungen als separate Linien. Mit Hilfe der Flügelkonzepte können die Umstiege für die Fahrgäste reduziert und mehr Sitzplätze angeboten werden, ohne dass dabei Kosten für Zusatzfahrzeuge entstehen[109]. Bei der Konstruktion des Regelfahrplans kann dies entsprechend berücksichtigt werden.

Außer für den Regelbetrieb, bietet die Multikuppelbarkeit auch Vorteile bei betrieblichen Störfällen in Folge von Fahrzeugausfällen oder bei Baumaßnahmen. Baumaßnahmen gehen häufig mit Änderungen der Betriebskonzepte einher (zum Beispiel Kürzen von Zugläufen), da baumaßnahmenbedingte Fahrzeitverlängerungen die ursprünglichen Fahrzeugumläufe nicht mehr realisieren lassen. Dank der Multikuppelbarkeit kann auf die gesamte Reserveflotte zurückgegriffen werden, um das ausgefallene Fahrzeug zu ersetzen und den geplanten Betriebsablauf aufrechtzuerhalten beziehungsweise können in Reaktion auf Baumaßnahmen Ersatzkonzepte flexibler gestaltet werden.

Dieser Vorteil kann auch genutzt werden, um die Verfügbarkeit des Verkehrssystems bei temporär sinnvollen oder saisonbedingten Kapazitätsanpassungen, wie zum Beispiel bei Großveranstaltungen mit erwartungsgemäß hohem Fahrgastaufkommen oder Fahrrad- und Skitransporten kurzfristig anzupassen. Den individuellen Bedürfnissen der Fahrgäste kann so besser Rechnung getragen werden, mit positiven Effekten auf die wahrgenommene Angebotsattraktivität.

[106] Vgl. Gerstlberger und Siegl (2009), S. 7.
[107] Vgl. Perrey (1998), S. 260.
[108] Vgl. Brenck et al. (2008), S. 24.
[109] Vgl. BEG (2013), S. 2.

Eine Flexibilität beim Fahrzeugeinsatz bietet mittel- und langfristig außerdem insbesondere nach Ablauf der Laufzeit des ersten Verkehrsvertrages die Chance, Betriebs- und Umlaufkonzepte mit Blick auf den Verkehrsverbund zu optimieren sowie Transportkapazitäten über Nachbeschaffungen oder das Liniennetz zu erweitern, um Ortschaften anzuschließen und die Mobilität der dortigen Bevölkerung zu verbessern. Denn wenngleich seit der Bahnreform insgesamt ein starkes Wachstum der SPNV-Leistungen stattgefunden hat, so zeigt der Vergleich einzelner Regionen stark divergierende Nachfrageentwicklungen auf, insbesondere im Vergleich zwischen städtischen und ländlichen Bereichen: Steigende SPNV-Angebote und starke Fahrgastzuwächse in Städten und Metropolregionen stehen vergleichsweise geringen Fahrgastzahlen und infrage gestellten Angeboten im ländlichen Raum gegenüber[110]. Auch hieraus begründet sich der Bedarf nach einem flexiblen Fahrzeugeinsatz, um bedarfsgerechte (und damit wirtschaftliche) Betriebskonzepte anbieten zu können. Leerfahrten werden vermieden und die Auslastungen der Fahrzeuge erhöht. Die Produktivität des SPNV-Systems steigt.

In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, dass der effizientere Einsatz von Fahrzeugen dazu beiträgt, den Klimavorteil der Schiene zu unterstützen und auszubauen[111].

Erhöhung der Pünktlichkeit

Im SPNV gilt gemäß der Definition der DB AG ein Halt dann als pünktlich, wenn die planmäßige Ankunftszeit um weniger als sechs Minuten überschritten wurde. Verschiedene Störungen im Zugbetrieb können zu einer Abweichung vom geplanten Betriebsablauf und damit zu Unpünktlichkeit führen.[112] Als wesentliche Ursache werden gestörte Fahrzeugumläufe, Personalprobleme sowie eine hohe Auslastung des Schienennetzes gesehen[113]. Zur Erreichung einer hohen Pünktlichkeit, sollten mögliche Störungen daher bereits in der Planungsphase Berücksichtigung finden und der Fahrplan stabil und robust konstruiert werden[114]. Aufgrund verschiedener Ansatzpunkte, kann die Multikuppelbarkeit hierbei unterstützen.

[110] Vgl. BAG-SPNV (2013), S. 10ff.
[111] Vgl. Mott, Koesling (2013), S. 18.
[112] Vgl. Deutsche Bahn (2017b), S. 2f.
[113] Vgl. Significance et al. (2012), S. 42.
[114] Vgl. Büker (2010), S. 21.

Einerseits können Trassenkapazitäten eingespart und als Zeitpuffer für eine Stabilisierung des Fahrplans genutzt werden. Möglich wird dies zum Beispiel durch gebündelte Betriebs- und Überführungsfahrten sowie aufgrund von umsetzbaren Flügelkonzepten.

Weiterhin wird der Betriebsablauf mithilfe der Multikuppelbarkeit stabilisiert, da der Disponent bei störungsbedingten Fahrzeugausfällen, wie oben dargestellt, die Möglichkeit hat, auf ein beliebiges Fahrzeug der Reserveflotte zurückzugreifen. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit von längerfristigen Linieneinschränkungen oder -ausfällen deutlich.

Ein verspätungsarmer Betriebsablauf erhöht die Planbarkeit des Verkehrsangebotes und damit die Zufriedenheit der Fahrgäste. Gleichermaßen ist es aber auch denkbar, dass freigewordene Trassen neu vergeben werden, um die Produktivität des Netzes zu erhöhen.

Erhöhung der Reisegeschwindigkeit

Für die Reisegeschwindigkeit im SPNV sind die geplante Fahrzeit und die tatsächliche Fahrzeit zu betrachten. Inwiefern die betriebliche Multikuppelbarkeit zu einer geringen Abweichung der beiden Kennwerte und damit zu einer hohen Pünktlichkeit beitragen kann, wurde soeben dargestellt.

Weiterhin kann die Multikuppelbarkeit auch dazu beitragen, die geplanten Reisezeiten zu verkürzen. Ein wichtiger Baustein bildet hier der bereits erwähnte vereinfachte Einsatz von Flügelkonzepten, welcher zu einer Optimierung der Reisezeiten führt: Benötigen Fahrgäste weniger Umstiege um an ihr Ziel zu gelangen, reduziert sich die benötigte Fahrzeit sowohl aufgrund der ausbleibenden Zeit für den Umsteigevorgang selbst, als auch aufgrund der fehlenden Fahrgastwechselzeiten.

Weiterhin können, wie oben dargestellt, Trassen eingespart und zur Stabilisierung des Fahrplans genutzt werden. Alternativ können der Takt verdichtet oder Linienverläufe zur Angebotsverbesserung erweitert werden. Die Leistungsfähigkeit des Schienennetzes kann damit gesteigert, die Reisegeschwindigkeit erhöht werden.

Abbildung 2-7 fasst die Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit zur Erhöhung der Angebotsattraktivität zusammen.

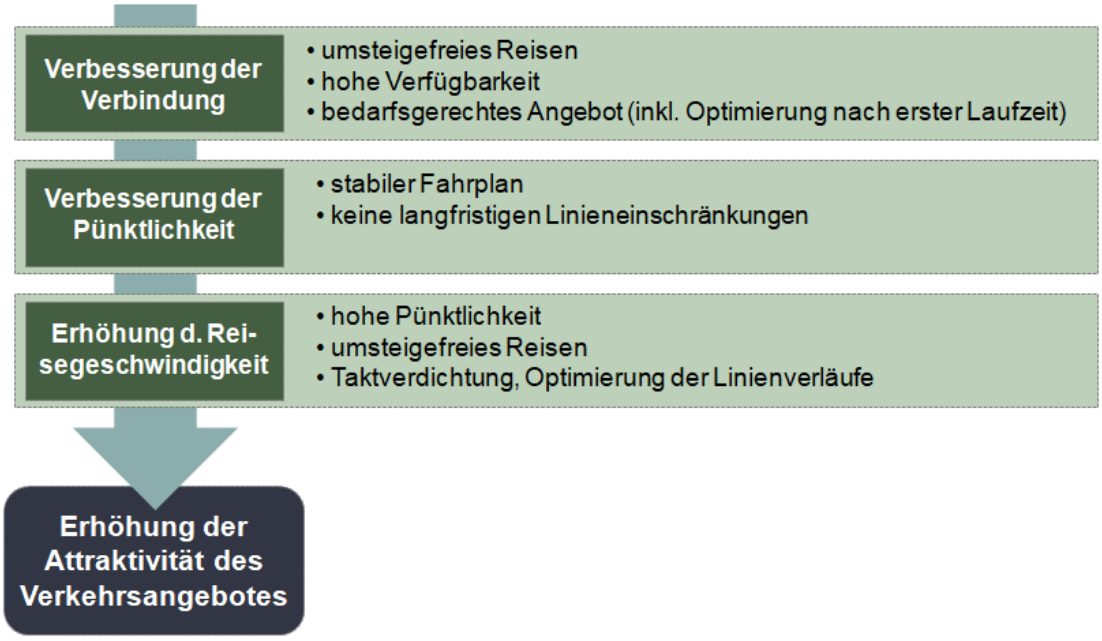


Abbildung 2-7 Nutzenpotenziale der betrieblichen Multikuppelbarkeit zur Erhöhung der Angebotsattraktivität
Quelle: eigene Darstellung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Flexibilisierung des Fahrzeugeinsatzes und der vereinfachte Einsatz von Flügelkonzepten die Kernvorteile der betrieblichen Multikuppelbarkeit bilden, welche sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Attraktivität der SPNV-Angebote verbessern (vgl. Abbildung 2-8). Diese Vorteile können insbesondere nach Ablauf eines Verkehrsvertrages große Wirkung entfalten, wenn für die neuen Verkehrsverträge der Bedarf nach geänderten Fahrzeug- und Betriebskonzepten besteht oder für den Bestandsfuhrpark neue Einsatzmöglichkeiten benötigt werden. Die betriebliche Multikuppelbarkeit bildet damit einen möglichen Baustein für die nachhaltige Zukunftsfähigkeit des SPNV in Deutschland.

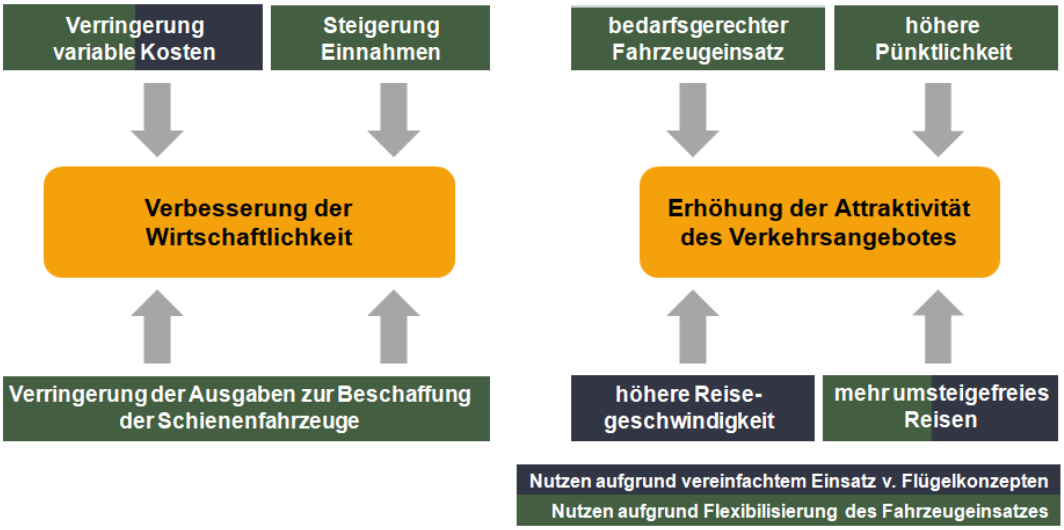


Abbildung 2-8 Nutzenpotenziale einer betrieblichen Multikuppelbarkeit
Quelle: eigene Darstellung

Welche Hindernisse im Status quo die Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit bisher verhindern, wird im nachfolgenden Abschnitt anhand der drei Einflussfaktoren Infrastruktur, netzspezifische Vorgaben der Aufgabenträger/EVU sowie fahrzeugtechnische Voraussetzungen dargestellt.

2.3 Status quo und Voraussetzungen der Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen

Die betriebliche Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen setzt eine Kompatibilität der zu kuppelnden Fahrzeuge auf den drei Ebenen Infrastruktur, Aufgabenträger/EVU-Anforderungen und Fahrzeugtechnik voraus (vgl. Abbildung 2-9).

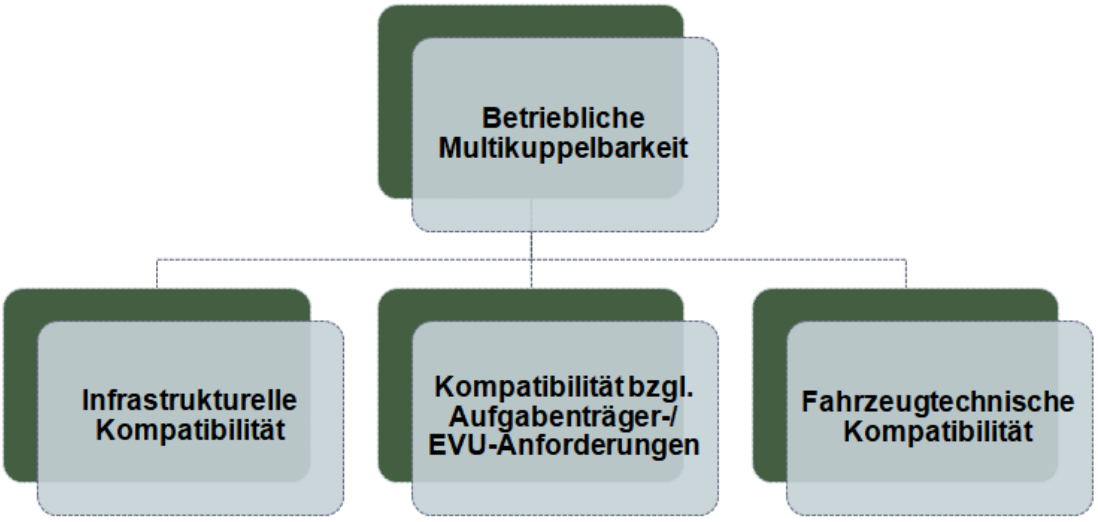


Abbildung 2-9 Dimensionen der betrieblichen Multikuppelbarkeit
Quelle: eigene Darstellung

Nur wenn die Kompatibilität auf allen drei Ebenen erfüllt ist, ist ein uneingeschränkter Betrieb möglich. Die genannten Ebenen werden nachfolgend im Einzelnen erläutert.

2.3.1 Infrastrukturelle Kompatibilität

Die Abwicklung des Eisenbahnbetriebs hat zur grundlegenden Voraussetzung, dass sich das vorgesehen Zugkonzept auf der vorhandenen Infrastruktur umsetzen lässt. Möchte ein EVU das Schienennetz nutzen, muss es daher die Zugangs- und Nutzungsbedingungen der betroffenen Streckenabschnitte, Betriebsstellen, Gleisabschnitte der Betriebsstellen, Bahnsteige, Eisenbahnbrücken, Eisenbahntunnel und Bahnübergänge erfüllen. Abbildung 2-10 zeigt eine Auswahl der infrastrukturellen Zugangsbedingungen.

Je nach Streckenabschnitt resultieren dabei unter anderem aus der Topologie des Streckenverlaufes und aus den installierten technischen Einrichtungen unterschiedliche Anforderungen an die Schienenfahrzeuge.

Abbildung 2-10 infrastrukturelle Zugangs- und Nutzungsbedingungen (Auswahl)
Quelle: eigene Darstellung auf Basis DB Netz (2017a), S. 5 ff

Sollen zwei Fahrzeuge miteinander gekuppelt werden, so ist entsprechend darauf zu achten, dass beide Fahrzeuge die Zugangs- und Nutzungsbedingungen der Strecken

erfüllen, welche als Zugverband befahren werden sollen[115]. Für das Schienennetz der DB Netz AG sind diese Bedingungen in den Schienennetz-Benutzungsbedingungen (SNB)[116] und im Infrastrukturregister (ISR) zusammengefasst[117] und wesentliche Kenndaten in der interaktiven Karte (ISR-Viewer) visualisiert[118].

Wenngleich manche Anforderungen, wie zum Beispiel die Regelspurweite[119] im vom SPNV genutzten Schienennetz einheitlich sind und damit diesbezüglich keine Fahrzeugvarianten bestehen, so existieren bei den meisten Anforderungen verschiedene Ausprägungen. Beispielhaft hierfür können die Anforderungen Bahnsteighöhe und Energieversorgung genannt werden, welche direkte Auswirkung auf die Umsetzung der betrieblichen Multikuppelbarkeit haben.

Bahnsteighöhe

Prinzipiell lässt das europäische Eisenbahnrecht für Bahnsteigneu- und -umbauten lediglich zwei Regel-Bahnsteighöhen zu: 55 cm und 76 cm[120]. In Deutschland gelten als Regelhöhe für den Neu- und Umbau 76 cm[121]. Bedingt durch die historische Entwicklung und die lange Lebensdauer der Bahnsteige, zeigt sich auf dem Schienennetz in Deutschland hinsichtlich der Bahnsteighöhen jedoch ein sehr heterogenes Bild, welches noch über Jahrzehnte Bestand haben wird. Und auch im Bahnsteighöhenkonzept der DB Station&Service AG ist ein Zielzustand keine einheitliche Bahnsteighöhe vorgesehen[122].

Für die betriebliche Multikuppelbarkeit bedeutet die langfristig vorhandene (mindestens) zweifache Ausrichtung bei den Bahnsteighöhen, dass die zu kuppelnden Fahrzeuge entweder technisch für beide Bahnsteige ausgelegt werden müssen oder nur Fahrzeuge miteinander kuppelbar sind, welche für die gleiche Bahnsteighöhe ausgelegt wurden.

[115] Vgl. VO (EU) 2015/995, Abschnitt 4.2.2.5 a) und b) beziehungsweise analoge Regelwerke für nicht-TSI-Strecken.
[116] Vgl. DB Netz (2017b), S. 13.
[117] Vgl. DB Netz (2017a), S. 2.
[118] Vgl. DB Netz (2017c).
[119] Vgl. Statistisches Bundesamt (2017), S. 5.
[120] Vgl. VO (EU) 1299/2014, Anhang, Abschnitt 4.2.9.2, Absatz 1.
[121] Vgl. EBO, § 13, Absatz 1.
[122] Vgl. Kieffer et al. (2014), S. 36ff.

Energieversorgung

In Deutschland sind rund 54 Prozent des Schienennetzes nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung elektrifiziert[123]. Der Anteil der nicht elektrifizierten Strecken schwankt stark, je nach Bundesland zwischen 29 Prozent in Schleswig-Holstein und 96 Prozent in Bremen[124].

Die Elektrifizierung neuer Streckenabschnitte liegt in der Verantwortung des Bundes[125]. Im aktuellen Bundesverkehrswegeplan (BVWP), welcher den Rahmen für dessen Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur absteckt[126], ist für die Elektrifizierung im aktuellen Planungszeitraum bis 2030 ein Gesamtinvestitionsbedarf für 934 km Aus- und Neubau vorgesehen[127]. Der Anteil der elektrifizierten Strecken steigt damit lediglich um zwei Prozent auf 56 Prozent. Demgegenüber steht die Forderung einzelner Experten nach einer Elektrifizierungsquote von 70 Prozent bis 2025[128].

Es ist daher davon auszugehen, dass Schienenfahrzeuge auch langfristig nicht elektrifizierte Strecken befahren werden. Um den Anteil der Dieseltraktion dennoch weiter reduzieren zu können, fordern Aufgabenträger zudem nachhaltige Fahrzeugstrategien mit alternativen Antrieben[129].

Für die betriebliche Multikuppelbarkeit führt dieser langfristig sogar steigende Traktionsmix im Fuhrpark des SPNV entweder zu einer Einschränkung in der Flexibilität des Fahrzeugeinsatzes oder zu erhöhten Anforderungen an die technische Umsetzung, wenn im Traktionsmix dennoch gefahren werden soll.

[123] Vgl. Statistisches Bundesamt (2017), S. 3.
[124] Vgl. Allianz pro Schiene (2017b).
[125] Vgl. DB Energie (2012), S. 6.
[126] Vgl. BMVI (2016), S. 7.
[127] Vgl. BMVI (2016), S. 42.
[128] Vgl. Allianz pro Schiene (2017a).
[129] Vgl. BAG-SPNV (2017), S. 1.

2.3.2 Kompatibilität in Bezug auf Anforderungen der Aufgabenträger und EVU

Im Rahmen von Verkehrsausschreibungen, haben die Aufgabenträger die Möglichkeit, Anforderungen für die Ausstattung von Schienenfahrzeugen festzulegen[130]. Unterschiede bei den Anforderungsvorgaben resultieren aus den spezifischen Ausprägungen der SPNV-Netze und bestehen in Bezug auf die Detailtiefe, welche stark von den bisherigen Erfahrungen und der Ausschreibungsphilosophie abhängt. Im Ergebnis dessen variieren die von den Schienenfahrzeugherstellern zu erfüllenden Lastenhefte der Aufgabenträger und damit die Anforderungen an die Fahrzeuge sehr stark (vgl. Abbildung 2-11).[131] Analoge Zusammenhänge bestehen bei der Fahrzeugausschreibung durch die EVU.

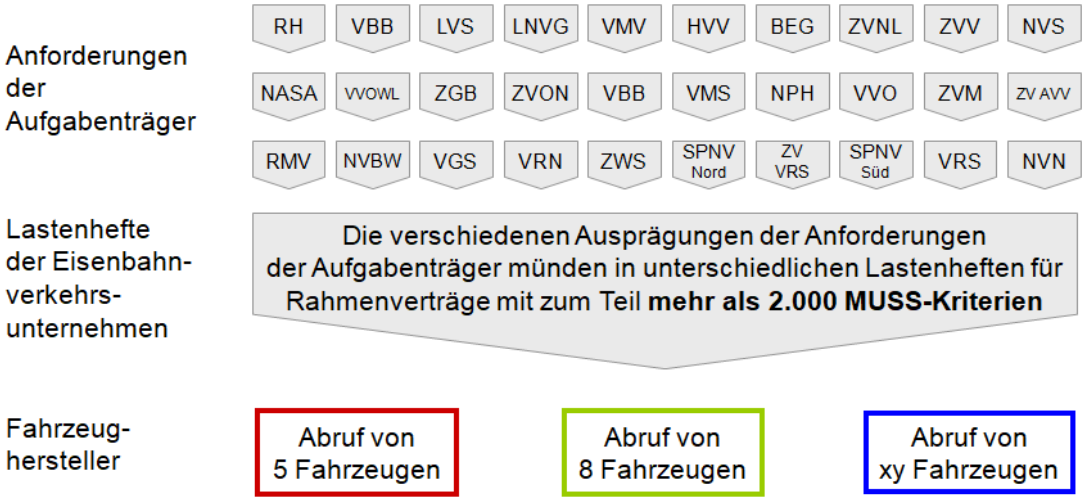


Abbildung 2-11 Vielfältige Anforderungen an Schienenfahrzeuge
Quelle: Woywod (2015), Folie 18

Individuelle oder zu eng gefasste Vorgaben an Fahrzeuge und ihre Ausstattung führen jedoch zu teuren Anpassungen und Sonderentwicklungen bei der Schienenfahrzeugindustrie, mit entsprechenden Auswirkungen auf den Anschaffungspreis der Fahrzeuge. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Erhöhung der Wahrscheinlichkeit auf Wiedereinsatz der Fahrzeuge haben die Aufgabenträger daher ein großes Interesse daran, zu größeren, technisch möglichst ähnlichen und kompatiblen Fahrzeugserien zu kommen.[132] Die für diesen Anspruch von der BAG-SPNV veröffentlichten Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren sollen hier zur Orientierung von den Aufgabenträgern herangezogen

[130] Vgl. BAG-SPNV (ohne Angabe).
[131] Vgl. BAG-SPNV (2016d), Vorwort und S. 1.
[132] Vgl. ebd., S. 1 f.

werden, haben aber ausschließlich empfehlenden Charakter. Weiterhin sind Überlegungen bekannt, erste standardisierte Anforderungen mit dem Zielhorizont nach 2020 zu entwickeln.[133] Gleichwohl muss berücksichtigt werden, dass Fahrzeugmerkmale existieren, bezüglich derer eine Standardisierung weder zu wirtschaftlichen Vorteilen noch zu Vorteilen aus Sicht des Fahrgastes führen[134]. Und auch die unterschiedlichen Einsatzzwecke der Fahrzeuge stehen einer vollständigen Standardisierung von Schienenfahrzeugen entgegen[135]. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass der SPNV-Fuhrpark auch langfristig nicht aus einheitlichen Fahrzeugen bestehen wird.

Für die betriebliche Multikuppelbarkeit bedeutet diese Vielfalt, dass entweder die Potenzial kuppelbarer Fahrzeuge stark eingeschränkt wird oder, dass der Aufgabenträger, wo technisch möglich, Unterschiede in der Fahrzeugausstattung, wie zum Beispiel bei Sitzabständen oder im Beleuchtungskonzept akzeptiert. Langfristig bleibt abzuwarten, inwiefern sich die Absichtserklärung zur Standardisierung der Schienenfahrzeuge von Aufgabenträger und EVU[136] am Markt widerspiegeln wird und damit die Variantenvielfalt sinkt.

2.3.3 Fahrzeugtechnische Kompatibilität

Für den Einsatz in Regionaltriebfahrzeugen stehen grundsätzlich verschiedene Kupplungstypen zur Verfügung. In der Regel wird jedoch stirnseitig je eine automatische Mittelpufferkupplung (MPK) verwendet[137]. Mit Hilfe dieser Kupplung können Fahrzeuge automatisch, vom Führerstand aus, mechanisch, pneumatisch und elektrisch miteinander verbunden werden[138]. Das Trennen erfolgt entweder über die manuelle Betätigung eines Riegels oder vom angrenzenden Führerstand aus[139]. Hersteller von automatischen MPK für den Regionalbahnbereich sind zum Beispiel Voith Turbo GmbH & Co. KG[140], Dellner Couplers AB[141] und Wabtec Corporation[142]. Als Branchenstandard in der Bundesrepublik Deutschland hat sich für Regional- und S-Bahnfahrzeuge die Scharfenbergkupplung (SchaKu) Typ 10 der

[133] Vgl. BAG-SPNV (2016d), S. 1f.
[134] Vgl. BAG-SPNV, VDV (2016), S. 1.
[135] Vgl. BAG-SPNV (2016d), S. 2.
[136] Vgl. BAG-SPNV, VDV (2014), S. 1.
[137] Vgl. Janicke, Reinhard (2008), S. 66.
[138] Vgl. ebd., S. 114.
[139] Vgl. Deine Bahn (2004), S. 110.
[140] Vgl. Voith Turbo (ohne Angabe).
[141] Vgl. Dellner (ohne Angabe), S. 14f.
[142] Vgl. Wabtec Corporation (ohne Angabe).

Voith Turbo GmbH & Co. KG etabliert. Sie erfüllt die Standards für Vollbahn-Triebzüge des internationalen Eisenbahnverbandes (UIC) [143] und ist als Interoperabilitätskomponente Bestandteil des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ der Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität[144]. Aus diesem Grund soll hier anhand der SchaKu exemplarisch die technische Komplexität der Kupplung zweier Fahrzeuge erläutert werden, welche als Zugverband im Normalbetrieb verkehren sollen. Hierbei wird auf die detaillierte Beschreibung der Bestandteile ihres modularen Aufbaus[145] (vgl. Abbildung 2-12) aufgrund der vorliegenden Fragestellung verzichtet und auf die Ausführungen in *Voith Turbo Scharfenberg (2012), Fieberg (2004)* sowie *Bitterberg, Dr. Ulrich; Pöpleu, Jan (2009)* verwiesen.

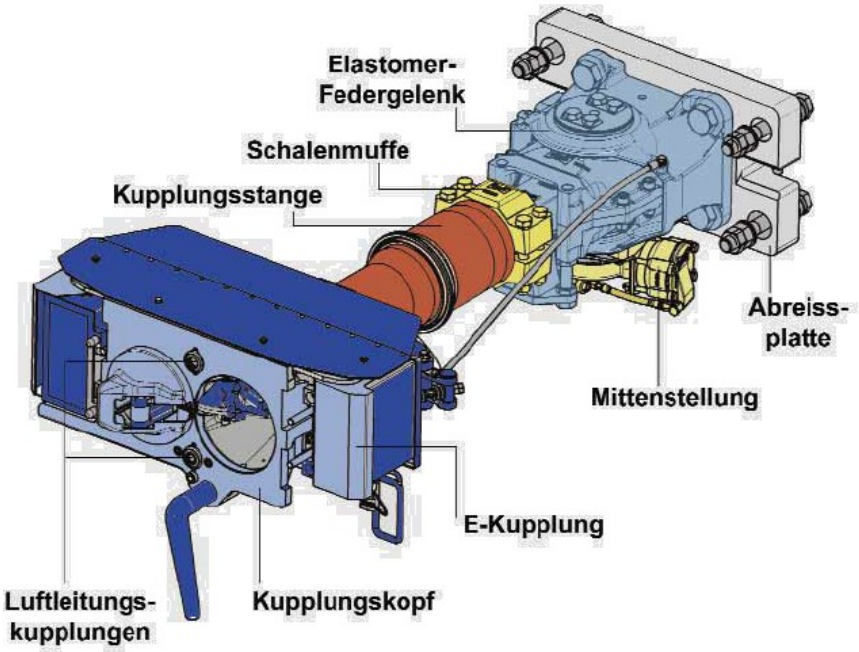


Abbildung 2-12 Modularer Aufbau einer Scharfenbergkupplung
Quelle: Fieberg (2004), S. 132

Das Kuppeln zweier Fahrzeuge ist bei einer Geschwindigkeit zwischen 0,6 km/h und 7 km/h möglich[146]. Der Kupplungsprozess umfasst die mechanische, pneumatische und elektrische Verbindung der beiden Fahrzeuge, wobei zunächst die mechanische und pneumatische Verbindung hergestellt wird[147] und erste im Anschluss, leicht

[143] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 6.
[144] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Abschnitt 4.2.2.2.3, Absatz a-2) sowie Anhang, Abschnitt 5.3.1, Absatz 1 in Verbindung mit Anlage J-1, Ziffer 66.
[145] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 16f.
[146] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 26.
[147] Vgl. ebd., S. 21.

zeitversetzt, die elektrische Kupplung folgt[148]. Die Kupplung zweier Triebfahrzeuge gilt nur dann als erfolgreich abgeschlossen, wenn die drei genannten Kupplungsschritte erfolgreich durchgeführt wurden. Eine mechanische und pneumatische Kupplung (ohne die Verbindung der Elektrokupplung) ermöglicht zumindest den Abschleppbetrieb (oder Überführungen) mit Ansteuerung der Bremsen des abgeschleppten Fahrzeugs über die Hauptluftleitung HLL.

Nachfolgend werden die drei Kupplungsschritte und ihre jeweiligen Voraussetzungen dargestellt sowie eine Einschätzung zur heutigen Multikuppelbarkeit gegeben. Die Darstellungen erfolgen dabei beispielhaft anhand der SchaKu Typ 10.

Mechanische Verbindung

Das mechanische Kuppeln erfolgt automatisiert[149] und dient der Übertragung von Zug- und Druckkräften[150]. Die Kuppelösen der einen Kupplung greifen in die Herzstückmäuler der Gegenkupplung, wodurch eine formschlüssige, spielfreie Verbindung entsteht und ein Kräftegleichgewicht hergestellt wird[151]. Dieses 1903 von Karl Scharfenberg entwickelte, patentierte und unveränderte[152] Kuppelprinzip bietet auch in Extremsituationen ein hohes Maß an Sicherheit[153]. Abbildung 2-13 zeigt die drei wesentlichen Kupplungszustände: kuppelbereite Stellung, gekuppelte Stellung und entkuppelte Stellung.

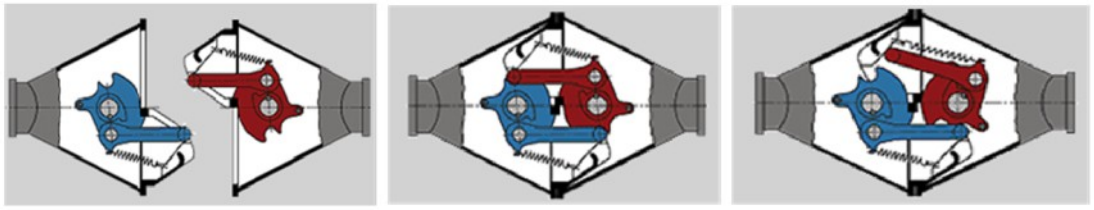


Abbildung 2-13 Das Kupplungsprinzip einer Scharfenbergkupplung
Quelle: Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 19

Grundvoraussetzung einer mechanischen Kuppelbarkeit ist die Verwendung des gleichen Kupplungstyps[154]. Weiterhin ist zu beachten, dass Details der geometrischen Auslegung des Kupplungskopfes, wie zum Beispiel die Ausbildung der

[148] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 21.
[149] Vgl. ebd., S. 19.
[150] Vgl. Deine Bahn (2004), S. 111.
[151] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 18.
[152] Vgl. Fieberg (2004), S. 132.
[153] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 18.
[154] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 24.

Kegel und Trichter, der Abstand des Kupplungskopfes zum Drehzapfen[155] und die jeweiligen Kuppelhöhen über den Achsen zueinander kompatibel sind. Relevant ist weiterhin die Lage der Elektrokupplung: So kann eine seitliche Anordnung zu Einschränkungen für das Befahren enger Kurvenradien führen, wenn diese mit seitlichen Energieverzehreinrichtungen („Crash-Puffer“) des gekuppelten Fahrzeugs kollidieren könnte.

Eine mechanische baureihen- und herstellerübergreifende Kompatibilität ist heute noch nicht uneingeschränkt gegeben, aber nach Meinung der Experten mit vergleichsweise geringem Aufwand erreichbar.

Pneumatische Verbindung

Die pneumatische Verbindung dient der Übertragung von Druckluft, die für die Betätigung der pneumatischen Bremse benötigt wird[156]. Die Verbindung der Druckluftleitungen erfolgt automatisiert, parallel zum mechanischen Kuppeln[157]. Die für die Verbindung notwendigen Maßnahmen sind baulich in den Kupplungskopf und prozessual in den Kupplungs- beziehungsweise Entkupplungsvorgang (Öffnen und Absperren der Luftleitungen) integriert[158]. Die SchaKu Typ 10 stellt zwei pneumatische Kupplungsstellen zwischen Kegel und Trichter zur Verfügung, wobei die obere Stelle der Verbindung der Hauptluftleitung HLL und die untere Kupplung der Verbindung der Hauptbehälterleitung HBL dient. Unterhalb der HBL-Kupplung befindet sich im selben Gehäuse die Entkupplungsleitung, die zur Durchführung des Entkupplungsvorgangs benötigt und von der HBL gespeist wird. Das Entweichen von Luft aus der HBL und HLL wird während des Kuppel- und Entkupplungsvorgangs durch automatisches Absperren und Öffnen der Luftleitungen verhindert.[159]

Voraussetzung für eine pneumatische Kupplung ist eine Kompatibilität hinsichtlich der Anordnungen der Druckluftleitungen sowie gleiche Betriebs- und Steuerdrücke[160]. In der Regel ist diese Kompatibilität gegeben, um das Abschleppen eines nicht mehr funktionstüchtigen Triebfahrzeuges über eine Hilfskupplung zu

[155] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 26.
[156] Vgl. ebd., S. 5.
[157] Vgl. ebd., S. 19.
[158] Vgl. ebd., S. 5.
[159] Vgl. ebd., S. 27.
[160] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 28.

ermöglichen. Verfügen Triebzüge über keine durchgehende HLL, sind diese Triebfahrzeuge pneumatisch nicht kompatibel. Dies kommt derzeit jedoch nur sehr selten vor[161], sodass dieser Anwendungsfall im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden kann.

Elektrische Verbindung

Die Verbindung der elektrischen Leitungen dient der Übertragung von Steuer- und Leistungssignalen sowie von Daten- und zum Teil Videosignalen[162]. Sie wird über Elektrokontaktkupplungen („E-Kontaktleisten“) umgesetzt, welche in der Regel aus federkraftgeführten Kontaktstiften bestehen[163]. Die E-Kontaktleisten können in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps und der Anzahl der zu kuppelnden Leitungen hinsichtlich der Anzahl der Kontaktstifte sowie in Bezug auf ihre Steuerung und der Lage am Kupplungskopf variieren[164]. Prinzipiell stehen zwei Ausführungen für seitliche und ein Gehäuse für oben oder unten montierte E-Kontaktleisten zur Verfügung[165]. Im ungekuppelten Zustand werden die Kontaktleisten durch Klappen vor dem Eindringen von Schmutz und Wasser geschützt[166].

Eine elektrische Verbindung zweier Fahrzeugeinheiten erfordert eine grundsätzliche Kompatibilität der Anordnungen der Elektrokontaktkupplungen am Kupplungskopf und der Belegung der E-Kontaktleisten. Weiterhin ist eine Kompatibilität der dahinterliegenden sicherheitsrelevanten Leitungen (Zugsteuerungsleitung), der elektronischen Leittechnik sowie der Fahrzeugkomponenten erforderlich, welche nicht fahrzeugautark betrieben werden, zum Beispiel Fahrgastinformations-, Diagnosesystem und Anzeigeeinrichtungen im Führerraum. Die elektronische Leittechnik und die Software der zu kuppelnden Fahrzeuge müssen kompatibel sein hinsichtlich ihrer Strukturen und der auszutauschenden Informationen[167]. Eine Verknüpfung zweier unterschiedlicher Leittechniken ist nicht ohne weiteres möglich, da sie zu Störungen und Ausfällen führen kann[168]. Die zu erfüllenden Voraussetzungen sind damit im Vergleich zu den zwei zuvor dargestellten Ebenen deutlich umfangreicher.

[161] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 28.
[162] Vgl. Schulz (2014), S. 15.
[163] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 5.
[164] Vgl. Schulz (2014), S. 15.
[165] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 20.
[166] Vgl. Bollow (2015), S. 141.
[167] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 30.
[168] Vgl. ebd., S. 27.

Wenngleich es sich bei den Kontaktträgern mit Kontakten, Leitungen und Handstecker um Standardmodule handelt[169], variiert die Belegung der Kontakte und die Auslegung der Leittechnik projektspezifisch je nach Schienenfahrzeughersteller, da weder vollständige, allgemeingültige gesetzliche Vorgaben noch eine branchenweite Standardisierung existieren[170]. Die Folge ist, dass es heute im Bahnsektor unterschiedliche Ausprägungen der Leittechnikarchitekturen gibt[171]. Zudem tragen die elektrischen Unterschiede der Fahrzeugprojekte das Potenzial, weitere Differenzierungen zu generieren[172]. Beispielhaft können folgende Ursachen genannt werden: neue projektspezifische Anforderungen der Aufgabenträger, EVU, Finanzierer, Schienenfahrzeughersteller und Zulieferer[173], Anforderungen in Hinsicht auf Baugleichheit mit Bestandsfahrzeugen, Weiterentwicklung von Subsystemen, geänderte gesetzliche oder zulassungsrelevante Anforderungen sowie der allgemeine technische Fortschritt.

Im Ergebnis dessen, variieren die Ausführungen der E-Kontaktleisten, die Belegung der Kontakte[174] und die elektronische Leittechnik stark je nach Hersteller, Bauart und Baureihe. Sofern Standardisierungen weiterhin nur vereinzelt in den Markt gelangen, muss zudem davon ausgegangen werden, dass diese Unterschiede auch zukünftig aufgrund der genannten Argumente bestehen bleiben oder sogar zunehmen werden. Eine elektrische baureihen- und herstellerübergreifende Kompatibilität liegt daher zwischen bereits hergestellten Fahrzeugen per se nicht vor[175], kann jedoch im Rahmen der Beauftragung beim Schienenfahrzeughersteller vorgedacht und entsprechend mit entwickelt werden.

Gespräche mit verschiedenen Akteuren der Bahnindustrie haben gezeigt, dass rein technisch auch grundsätzlich eine baureihen- und herstellerübergreifende elektrische Kompatibilität hergestellt werden kann. Hierzu müssen projektunabhängig, im Vorfeld der Fahrzeugentwicklung, alle notwendigen Informationen über die zu kuppelnden Fahrzeuge vorliegen, um das Anpassen der elektronischen Leittechnik sowie weiterer betroffener Fahrzeugsysteme zu ermöglichen. Die notwendigen Anpassungen sind hochkomplex und zugverbandspezifisch vorzunehmen. Sie haben

[169] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 20.
[170] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 26.
[171] Vgl. Retschy (2015), S. 5.
[172] Vgl. Paral (2012), Folie 8.
[173] Vgl. Schill (2012), Folie 8.
[174] Vgl. Bitterberg, Pöpleu (2009), S. 30.
[175] Vgl. Paral (2012), Folie 8.

Auswirkungen auf die dahinterliegenden Fahrzeugsysteme und sind mit großen Aufwänden, zum Beispiel in der Softwareanpassung und der Nachweisführung verbunden, welche dem Nutzen einer Multikuppelbarkeit gegenüberstehen.

Während, wie dargestellt, eine mechanische und pneumatische Kompatibilität mit Bestandsfahrzeugen prinzipiell vorliegt, ist die elektrische Kompatibilität nur dann zu erreichen, wenn sie im Rahmen der Fahrzeugbeschaffung mitentwickelt wird. Ansonsten sind Bestandsfahrzeuge fahrzeugtechnisch ausschließlich innerhalb der Baureihe betrieblich kuppelbar (vgl. Abbildung 2-14).

Abbildung 2-14 Fahrzeugtechnische Kompatibilität von Bestandsfahrzeugen bei Verwendung der SchaKu
Quelle: eigene Darstellung

2.3.4 Voraussetzungen für die betriebliche Multikuppelbarkeit

In den vorangegangenen Abschnitten wurde dargestellt, dass die betriebliche Multikuppelbarkeit von Triebahrzeugen nur dann möglich ist, wenn eine Kompatibilität der zu kuppelnden Fahrzeuge auf den Ebenen Infrastruktur, Aufgabenträger-/EVU-Anforderungen sowie Fahrzeugtechnik vorliegt.

Festgestellt wurde, dass auf allen drei Ebenen Hemmnisse oder auch wirtschaftlich zweckmäßige Anforderungen existieren, die dazu führen, dass es auch langfristig kein Standard-SPNV-Fahrzeug geben wird, sondern der SPNV-Fuhrpark vielfältig bleibt. Politik, Aufgabenträger und EVU verfügen jedoch über den Handlungs-spielraum, diese Vielfalt auf ein gesamtgesellschaftlich sinnvolles Optimum zu

reduzieren. Denn, wenngleich bei den Schienenfahrzeugherstellern die technischen Möglichkeiten vorliegen, für die unterschiedlichen Anwendungsfelder projektspezifische Lösungen zu liefern, so bieten die damit verbundenen Mehraufwendungen und erhöhten Fahrzeugpreise die Gefahr, das System SPNV wirtschaftlich stark zu belasten. Um diese Gefahr zu begrenzen, haben Politik und Aufgabenträger die Möglichkeit, mit vorausschauender Planung, Anreizsystemen und Fördergeldern Rahmenbedingungen zu schaffen, welche bei der Entwicklung der kostenintensiven Schienenfahrzeugsysteme unterstützen.

Werden hingegen die Unterschiede in der Infrastruktur und bei den Anforderungen der Aufgabenträger und EVU akzeptiert und als nicht veränderbar angenommen, schränkt dies die netzübergreifenden Einsatzmöglichkeiten der Schienenfahrzeuge stark ein. Auch hier liegt es in der Hand der Aufgabenträger beziehungsweise EVU, die netz-, betriebs- und auftragsspezifischen Anforderungen auf ein Minimum zu reduzieren, um das Potenzial der betrieblichen Multikuppelbarkeit auf ein Maximum zu erhöhen. Zum Beispiel wäre die Vereinheitlichung der Anforderungen des Fahrgastinformationssystems (Hintergrundsystem) hier ein erster Schritt, welcher durch die Aufgabenträger beziehungsweise EVU wesentlich beeinflussbar ist.

2.4 Motivation zur Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit

Der SPNV ist in Deutschland für die Bevölkerung ein wichtiger Baustein ihrer täglichen Mobilität. Die Verkehrsleistung und das Verkehrsaufkommen sind in den vergangenen 20 Jahren erheblich gestiegen. Zudem konnte die Produktivität erhöht und Qualitätsverbesserungen erreicht werden. Um diese positive Entwicklung fortzusetzen, ist der Bahnsektor gefragt, kontinuierlich vorhandene Nutzenpotenziale zu identifizieren und zu heben. Die sich aktuell abzeichnenden Herausforderungen erhöhen den Handlungsdruck.

Die betriebliche Multikuppelbarkeit von Triebfahrzeugen stellt solch ein Nutzenpotenzial dar. Sie erhöht die Flexibilität im Fahrzeugeinsatz und kann damit dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit des SPNV zu verbessern und seine Angebotsattraktivität zu erhöhen. Eine betriebliche Multikuppelbarkeit bietet die Möglichkeit, die Kosten des SPNV zu senken, seine Einnahmen zu erhöhen sowie die Verbindungen zu verbessern, die Pünktlichkeit zu steigern und die

Reisegeschwindigkeit im SPNV zu erhöhen. Ein entscheidender Nutzen liegt zudem in der substanziellen Stärkung eines Gebrauchtfahrzeugmarktes.

Dem Wunsch nach der betrieblichen Multikuppelbarkeit steht jedoch die vom Markt geforderte ausgeprägte Einsatzspezifikation der Schienenfahrzeuge entgegen: Die Fahrzeuge müssen an die jeweiligen Transportaufgaben, die spezifischen Betriebs- und Infrastrukturbedingungen angepasst sein und die Anforderungen von Aufgabenträger und EVU erfüllen. Die Vielschichtigkeit des SPNV-Marktes, die Komplexität von Infrastruktur- und Kundenanforderungen sowie die herstellerindividuellen Entwicklungen ließ die Anzahl an projekt- und herstellerspezifischen Lösungen und damit die Menge von unterschiedlichen und damit nicht kompatiblen Fahrzeugen steigen.

Im Ergebnis dessen ist aktuell nur eine mechanische und pneumatische Kupplung von Bestandsfahrzeuge flexibel möglich, welche den Abschleppbetrieb oder Überführungen ermöglicht. Betrieblich sind Bestandsfahrzeuge nur dann kuppelbar, wenn sie der gleichen Baureihe angehören oder wenn die elektrische Kompatibilität zueinander im Rahmen der Beschaffung mitentwickelt wurde. Darüber hinaus gehendes betriebliches Kuppeln ist nur mit großen Anpassungen der Fahrzeuge möglich. Diese Anpassungen sind zugverbandspezifisch, hochkomplex und mit großen Aufwänden, zum Beispiel in der Entwicklung und der Nachweisführung verbunden.

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass der SPNV vielfältigen Herausforderungen gegenübersteht, bei deren Überwindung die betriebliche Multikuppelbarkeit mit ihren Nutzenpotenzialen grundsätzlich unterstützen kann. Gleichzeitig muss konstatiert werden, dass die Voraussetzungen zur Herstellung der betrieblichen Multikuppelbarkeit sehr vielfältig und zum Teil mit größeren Herausforderungen verbunden sind. Je nachdem, wie stark diese im betrachteten Netz oder Untersuchungsraum ausgeprägt sind, kann sich das Nutzenpotenzial der betrieblichen Multikuppelbarkeit unterschiedlich stark entfalten (vgl. Abbildung 2-15).

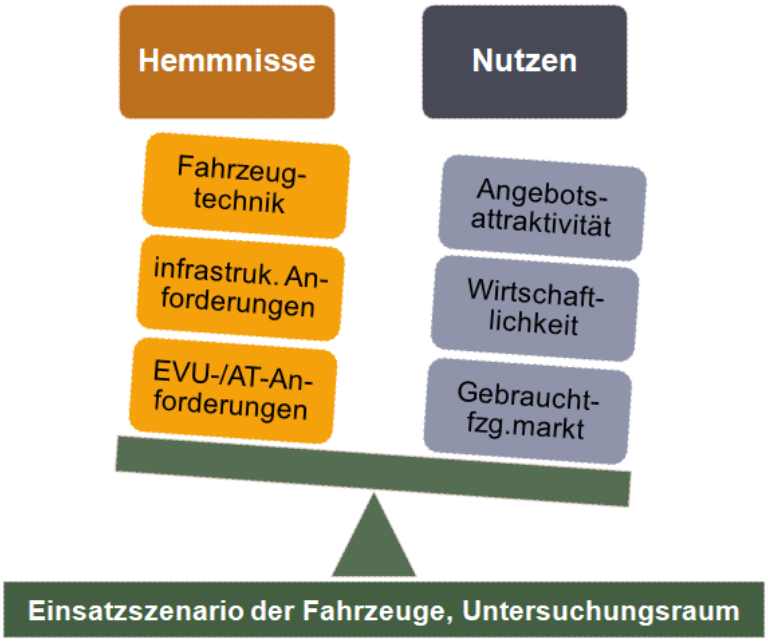


Abbildung 2-15 Erfolgsfaktor betriebliche Multikuppelbarkeit
Quelle: eigene Darstellung

Für eine ganzheitliche Einschätzung des Nutzenpotenzials ist es daher von zentraler Bedeutung, auch ihre Kosten und Risiken näher zu bewerten. Zu betrachten sind dabei alle Phasen, die mit der technologischen Umsetzung der betrieblichen Multikuppelbarkeit einhergehen: die Entwicklung einer Umsetzungslösung, das Erreichen ihrer Marktreife sowie ihre Markteinführung und -etablierung.

In den nachfolgenden Abschnitten werden daher anhand eines zunächst zu identifizierenden Lösungsansatzes relevante Aufwände und Risiken bis zur Marktetablierung analysiert, um schließlich eine Aussage darüber treffen zu können, ob eine betriebliche Multikuppelbarkeit von Triebzügen im deutschen SPNV mit Hilfe des Lösungsansatzes erreicht und die dargestellten Nutzenpotenziale zur nachhaltigen Stärkung des SPNV gehoben werden können.

3 Auswahl des Lösungsansatzes zur Etablierung der betrieblichen Multikuppelbarkeit

Ziel des Kapitels ist es, den Lösungsansatz zur Etablierung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit herauszuarbeiten, welcher die größten Chancen auf eine erfolgreiche Marktetablierung hat und daher in dieser Arbeit weiter untersucht wird. Hierzu werden eingangs die Auswahlmethodik vorgestellt (Abschnitt 3.1) sowie die Bewertungskriterien beschrieben und ihre Gewichtungen bestimmt (Abschnitt 3.2). Es folgt die Vorstellung und Bewertung von fünf Lösungsansätzen (Abschnitt 3.3). Das Kapitel schließt mit der Identifizierung des aus heutiger Sicht chancenreichsten Lösungsansatzes (Abschnitt 3.4).

3.1 Auswahlmethodik

Zur Identifizierung des chancenreichsten Lösungsansatzes werden fünf Lösungsansätze anhand von zehn Kriterien bewertet, welche entsprechend ihrer Gewichtung (vgl. Abschnitt 3.2) unterschiedlich stark in die Bewertung einfließen. Im Rahmen der Bewertung eines Lösungsansatzes wird dabei eingeschätzt, welche Kriterien er erfüllt. Nachdem die Einschätzung für alle Kriterien vorgenommen wurde, wird das Bewertungsergebnis des Lösungsansatzes bestimmt, indem die Teilbewertungen (Gewichtungen) der Kriterien summiert werden, welche mit „erfüllt“ eingeschätzt wurden. Erfüllt ein Lösungsansatz alle Kriterien, erreicht er demnach die höchstmögliche Bewertung „100 Prozent“, tut er dies nicht, fällt der Wert entsprechend kleiner aus. Der Lösungsansatz, der den höchsten Wert erreicht, wird aus heutiger Sicht als chancenreichster Lösungsansatz eingestuft und im weiteren Verlauf der Arbeit detailliert untersucht.

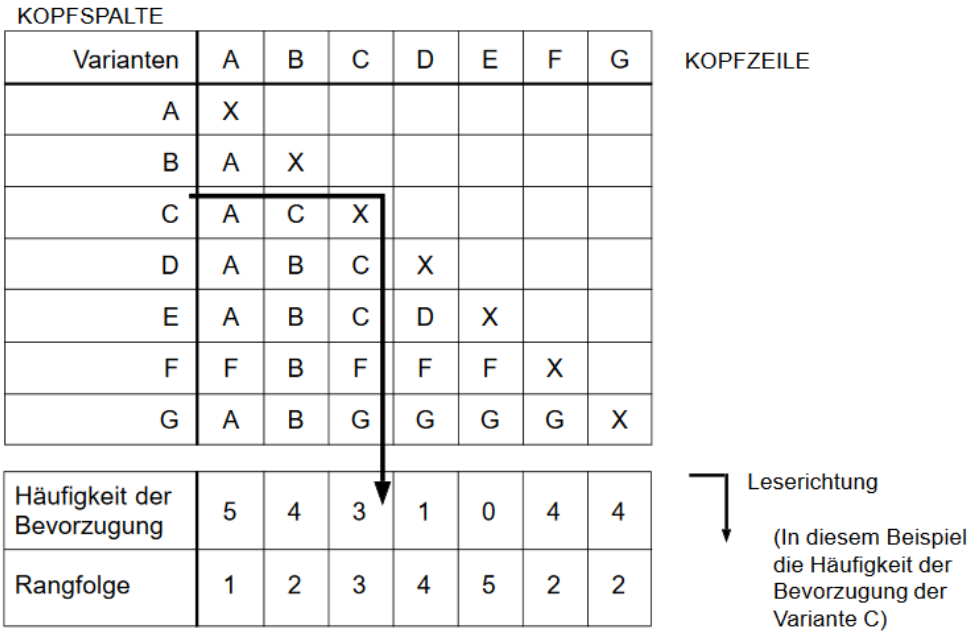
Zur Bestimmung der Gewichtung der Bewertungskriterien kann zwischen intuitiven und dialektischen Methoden ausgewählt werden. Während bei dialektischen Bewertungen Vor- und Nachteile argumentativ abgewogen werden, um ein differenziertes Meinungsbild zu erhalten, wird bei intuitiven Methoden aufgrund des Gesamteindrucks bewertet, welcher – so die Annahme – auf mehr oder weniger bewussten Kriterien basiert und welche für das eigene Orientierungsvermögen

ausreichen. Die Bewertung wird bei diesen Methoden mehr oder weniger spontan abgegeben, ohne dass hinterfragt wird, welche Aspekte dazu geführt haben.[176]

Um in die Bestimmung der Gewichtungen möglichst viele Perspektiven einfließen zu lassen, soll diese mit Experten aus dem direkten und indirekten Umfeld des Eisenbahnsektors durchgeführt werden. Um dies zu ermöglichen, soll der Aufwand für jeden einzelnen Experten optimal kurz gehalten werden. Dabei wird die subjektive Einschätzung jedes Einzelnen als ausreichend für die hier zu diskutierende Fragestellung eingeschätzt, sodass für diese Arbeit eine intuitive Methode ausgewählt wird. Hierzu zählen zum Beispiel Punktvergabe, Rangplatzvergabe, Paarvergleich und die Paarvergleichsmatrix[177]. Ausgewählt wird die Methode Paarvergleichsmatrix, da bei ihr die Aussagekraft des Bewertungsergebnisses aufgrund des detaillierten Vergleichs als am größten eingeschätzt wird und bereits im ersten Einschätzungsdurchlauf die Gewichtungen bestimmt werden können.

Bei der Paarvergleichsmatrix werden mehrere Varianten in eine Rangfolge gebracht und ihre prozentualen Gewichtungen bestimmt, indem diese Varianten systematisch einzeln gegeneinander abgewogen werden. Nicht zu definieren ist vorab, nach welchen Kriterien die Einschätzung vorzunehmen ist.[178] Es wird jede Variante der Kopfzeile mit allen Varianten der Kopfspalte verglichen und in die jeweilige Zelle die beim paarweisen Vergleich bevorzugte Variante eingetragen (vgl. Abbildung 3-1). Alternativ ist es auch möglich jede Variante der Kopfspalte mit allen Varianten der Kopfzeile zu vergleichen. Beide Methoden führen zum selben Ergebnis. Da sich die obere Matrixhälfte spiegelbildlich zur unteren verhält, ist der Vergleichsvorgang nur ein Mal je Vergleichspaar durchzuführen, also nur die obere oder untere Hälfte auszufüllen.[179]

[176] Vgl. Müller-Herbers (2007), S. 24 und 27.
[177] Vgl. ebd., S. 24f.
[178] Vgl. Sonntag (2015), S. 1.
[179] Vgl. Müller-Herbers (2007), S. 26.



Varianten	A	B	C	D	E	F	G
A	X						
B	A	X					
C	A	C	X				
D	A	B	C	X			
E	A	B	C	D	X		
F	F	B	F	F	F	X	
G	A	B	G	G	G	G	X
Häufigkeit der Bevorzugung	5	4	3	1	0	4	4
Rangfolge	1	2	3	4	5	2	2

Abbildung 3-1 Paarvergleichsmatrix – Beispiel
Quelle: Müller-Herbers (2007), S. 26

Nach Abschluss des Vergleichs wird gezählt, wie häufig die einzelnen Varianten jeweils bevorzugt wurden, um daraus die Rangfolge und Gewichtung jeder Variante abzuleiten[180]. Im Beispiel von Abbildung 3-1 wurden insgesamt 21 Bewertungen vorgenommen. Dabei wurde die Variante A am häufigsten, fünf Mal, bevorzugt, aus der Häufigkeit fünf von 21 ergibt sich die Gewichtung 24 Prozent. Die Gewichtungen der Varianten B bis G können analog bestimmt werden.

3.2 Bewertungskriterien

Zur Bestimmung des Lösungsansatzes, welcher für die Etablierung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit als am chancenreichsten eingeschätzt wird, wurden zehn Kriterien ausgewählt (vgl. Abbildung 3-2).

Auf das Kriterium „Wirtschaftlichkeit“ wurde hier bewusst verzichtet, da der Aufwand zur monetären Einschätzung aller Lösungsalternativen den Rahmen dieser Arbeit deutlich übersteigen würde. Als unkritisch ist dies hier zu bewerten, da möglichst ergebnisoffen bewertet werden soll und die Annahme getroffen wird, dass die öffentliche Hand (Bund, Aufgabenträger) mit Entwicklungsförderung oder Anreizen in Ausschreibungen einen Lösungsansatz unterstützen würde, welcher für das System SPNV den größten Nutzen erbringt, aber zunächst eine vergleichsweise schlechtere Wirtschaftlichkeit aufweist.

[180] Vgl. Sonntag (2015), S. 2.

Abbildung 3-2 Bewertungskriterien zur Bestimmung des chancenreichsten Lösungsansatzes
Quelle: eigene Darstellung

Die zehn Bewertungskriterien werden nachfolgend im Kontext der vorliegenden Fragestellung näher erläutert.

1. Kriterium: betrieblich praktikabel

Der Betrieb von SPNV-Fahrzeugen unterliegt genauen Vorgaben, die sich aus gesetzlichen Regelungen und aus den Verkehrsverträgen beziehungsweise aus dem Fahrplan ergeben. Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, ist für den Fahrgast die Einhaltung des Fahrplans ein wichtiges Qualitätsmerkmal.

Insbesondere in Netzen mit hoher Streckenauslastung, also kurzen Zugfolgezeiten, und bei infrastrukturellen Kapazitätsengpässen kann die betriebliche Multikuppelbarkeit besonders großen Nutzen entfalten. Gleichzeitig sind dies besonders sensible Netze, bei denen Einschränkungen im Betriebsablauf besonders große Auswirkungen haben und daher zu vermeiden sind.

Der zu präferierende Lösungsansatz sollte daher zu keinen lösungsansatzbedingten betrieblichen Einschränkungen führen, welche mit erhöhter Wahrscheinlichkeit die Einhaltung des Fahrplans gefährden.

2. Kriterium: bewährt

Können für die Entwicklung eines Lösungsansatzes Erfahrungen aus vergleichbaren Fragestellungen genutzt und auf den Anwendungsfall spezifiziert übertragen werden, sinkt das technische Risiko bei dessen Umsetzung. Ein solcher, abgeleiteter Lösungsansatz bietet zudem die Chance, das wirtschaftliche Risiko zu reduzieren und trägt dazu bei, die Umsetzungszeit der zu entwickelnden Lösung deutlich zu verkürzen. Ein Beispiel für eine solche Übertragung von Erfahrungen stellt die Entwicklung des Brennstoffzellentriebwagens dar, dessen Entwicklung auf Erfahrungen aus dem Straßenverkehr basierte[181].

Der Lösungsansatz sollte sein Potenzial in vergleichbaren Anwendungen bereits nachgewiesen haben.

3. Kriterium: europäisch interoperabel

Im Zeitalter eines wirtschaftlich und kulturell zusammenwachsenden Europas kommt die Interoperabilität der Eisenbahnsysteme als wichtige Forderung hinzu[182]. Ziel ist es, dass die Eisenbahnnetze in Europa durchgängig nutzbar sind und der Übergang zwischen den nationalen Netzen reibungslos und sicher erfolgt[183].

Auch im SPNV existieren grenzüberschreitende Verkehre. Einer der Vorreiter ist hier die Vogtlandbahn, welche seit dem Jahr 2000 im deutsch-tschechischen Grenzgebiet einen länderüberschreitenden SPNV betreibt[184]. Betrachtet man die von der BAG-SPNV jährlich veröffentlichte SPNV-Karte, wird deutlich, dass seitdem die Anzahl grenzüberschreitender Verkehrsverbindungen stark gestiegen ist[185]. Darüber zeigen Erfahrungen verschiedener Aufgabenträger, wie zum Beispiel des VRR und des VBB, dass auch das Verkehrsaufkommen grenzüberschreitender Verkehre und damit deren Bedeutung weiter ansteigen[186].

Der Lösungsansatz sollte auch grenzüberschreitend, auf europäischer Ebene zur Anwendung kommen können.

[181] Vgl. Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (2016), S. 31.
[182] Vgl. Buhl, Eberhard (2016b), S. 21.
[183] Vgl. Europäisches Parlament (2017), S. 1.
[184] Vgl. Allianz pro Schiene (2005), S. 11.
[185] Vgl. BAG-SPNV (2015).
[186] Vgl. VRR (2013), S.1. und VBB (2015), Folie 6 ff.

4. Kriterium: fahrgastverträglich

Aufgabenträger, Politik, EVU und Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) haben die Aufgabe, den SPNV im Interesse der Fahrgäste gemeinsam zu finanzieren und zu gestalten[187]. Seit der Bahnreform Mitte der 1990er Jahre entwickelte sich der SPNV sehr positiv (vgl. Abschnitt 2.1). Die Fahrgastzufriedenheit und Nachfrage zeigen, dass der SPNV deutlich an Attraktivität gewinnen konnte. Kundenrelevante Ideen und Innovationen können dabei unterstützen, diesen Trend fortzuführen und das Image des SPNV weiter zu verbessern.[188] Zugleich wird die Kundenzufriedenheit vor dem Hintergrund der sich wandelnden Kundenstruktur, vom „SPNV-gebundenen" zum wahlfreien Fahrgast, immer mehr zum entscheidenden Faktor bei der Generierung von Fahrgelderlösen. Die Qualitätsanforderungen der Fahrgäste zu erkennen und zu erfüllen, wird damit zu einem strategischen Faktor der EVU und der Aufgabenträger[189].

Der Lösungsansatz sollte vom Fahrgast akzeptiert werden und zu dessen Zufriedenheit mit dem Verkehrsangebot beitragen.

5. Kriterium: herstellerunabhängig entwickelt

Der SPNV-Markt in Deutschland ist stark diversifiziert. Dies spiegelt sich zum einen in der Vielzahl an EVU wieder, welche die Verkehre erbringen, aber auch in dem Spektrum der eingesetzten Fahrzeugflotte (vgl. Abschnitt 2.1), welche aus den in Abschnitt 2.3 dargestellten Gründen netzspezifisch erworben und ausgelegt werden.

Der Nutzen einer betrieblichen Multikuppelbarkeit ist dann besonders groß, wenn Unterschiede in der Ausgestaltung der Fahrzeuge keine Auswirkungen mehr auf eine mögliche betriebliche Multikuppelbarkeit haben und wenn diese möglichst flächendeckend etabliert werden kann, ohne in vorhandene herstellerspezifische Fahrzeugkonzepte eingreifen zu müssen.

Der Lösungsansatz sollte herstellerunabhängig entwickelt werden können.

[187] Vgl. Hoopmann (2016), Folie 3.
[188] Vgl. Hoopmann (2016), Folie 8.
[189] Vgl. Rothenstein (2010), S. 147.

6. Kriterium: kapazitätssteigernd

Das deutsche Schienennetz besteht zu großen Teilen aus Mischbetriebsstrecken, welche von verschiedenen Verkehrsarten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten genutzt werden. Dieser Mischbetrieb führt zu entsprechenden Kapazitätseinbußen, da die Kapazität einer Strecke dann am besten genutzt werden kann, wenn die dort gefahrenen Geschwindigkeiten möglichst ähnlich sind.[190]

Der Mischbetrieb führt zudem zu erhöhten Herausforderungen bei der Trassenplanung und zu einer erhöhten Streckenbelastung, da gleichzeitig mehrere Verkehrsarten um eine Trasse konkurrieren[191]. Schon heute sind auf dem Gesamtnetz Kapazitätsreserven kaum noch vorhanden, was sich zum Beispiel darin zeigt, dass bei Baustellen zu wenig Kapazität für die umzuleitenden Verkehre verfügbar ist[192]. Verstärkt wird diese Situation durch das prognostizierte Verkehrswachstum auf der Schiene bis 2030: im Personenverkehr um 12,2 Prozent, im Güterverkehr um 38 Prozent gegenüber 2010[193].

Der Lösungsansatz sollte die Leistungsfähigkeit des Schienennetzes erhöhen, indem er die verfügbare Streckenkapazität steigert.

7. Kriterium: nachrüstbar

Der Nutzen einer betrieblichen Multikuppelbarkeit ist umso größer, je mehr Fahrzeuge diese netz- oder flottenübergreifend verwenden können. Die Beteiligungen des Mobilitätsdienstleisters BeNEX GmbH[194], welche sich über das gesamte Bundesgebiet verteilen, sind ein gutes Beispiel für das betriebliche Einsatzpotenzial eines netzübergreifenden Einsatzes von Schienenfahrzeugen[195]. Der Eigentümer (oder der Halter) der Fahrzeuge sollte daher in die Lage versetzt werden, in seinen Flotten eine Multikuppelbarkeit sowohl bei Neubeschaffung als auch durch Umrüsten der Bestandsflotte zu erreichen.

---

[190] Vgl. Wendt (2012), S. 35.
[191] Beispielhaft kann hier das SPNV-Ausschreibungsnetz der Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen (LNVG) aus 2012 genannt werden, das die für den Schienengüter- und Schienenpersonenfernverkehr wichtigen und hochausgelasteten Knoten Hamburg, Bremen und Hannover tangierte (vgl. Stahlhut (2009), Folie 9).
[192] Vgl. BNetzA (2016), S. 26.
[193] Vgl. BMVI (2016), S. 1.
[194] Unter dem Dach der BENEX GmbH verkehren in Deutschland fünf EVU und ein Busverkehrsunternehmen in Lübeck (vgl. BeNEX (2016), S. 1).
[195] Vgl. BeNEX (2016), S. 1.

Die Nachrüstbarkeit ist zudem von besonderer Bedeutung aufgrund der langen Fahrzeuglebensdauer, der Vielfalt an eingesetzten Baureihen sowie der Forderung nach Wiedereinsatzfähigkeit der Fahrzeuge nach Ablauf der Verkehrsverträge (vgl. Abschnitt 2.2).

Der zu favorisierende Lösungsansatz sollte daher sowohl für Neu- als auch für Bestandsfahrzeuge anwendbar sein.

8. Kriterium: stabil anwendbar

Der Nutzen einer Multikuppelbarkeit darf nicht nur kurzfristig, sondern muss langfristig nachweisbar sein. Nach der Implementierung des Lösungsansatzes dürfen technische Anpassungen nicht zu großen Aufwänden, wie zum Beispiel Neuzulassungen, führen. Weiterentwicklungen und nächste Generationen eines Lösungsansatzes sollten schrittweise etabliert werden können. Auf diese Weise kann auch der Langlebigkeit der Fahrzeuge und der Wiedereinsatzfähigkeit nach Ende der Verkehrsvertragslaufzeit Rechnung getragen werden.

Als Negativbeispiel kann die historische Entwicklung des europäischen Zugbeeinflussungssystems ETCS genannt werden. Über einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren fand ein intensiver Abstimmungsprozess statt, in dessen Ergebnis dennoch kein einheitlicher Standard, sondern verschiedene, weiterentwickelte Versionen eines Standards verabschiedet wurden[196] – mit hohen Anforderungen an den interoperablen Einsatz der einzelnen Subsysteme.

Der Lösungsansatz sollte nach der Umsetzung über einen langen Zeitraum nachhaltig stabil zur Anwendung kommen können, ohne dass größere technische Anpassungen notwendig werden.

9. Kriterium: technisch kompatibel

Wie bereits mehrfach betont, ist der SPNV-Fuhrpark sehr inhomogen, da Fahrzeuge in der Regel netzspezifisch beschafft werden. Neue Lösungen müssen sich daher in die etablierten technischen Basiskonzepte der SPNV-Fahrzeuge integrieren lassen, ohne deren etablierte Strukturen grundlegend verändern zu müssen. Insbesondere vor dem Hintergrund der langen Innovationszyklen im Eisenbahnsektor ist dies von elementarer Bedeutung[197]. Technische Anforderungen, die sich aus dem Kuppeln der

[196] Vgl. Meyer zu Hörste (2013), Folie 5f.
[197] Vgl. Schuppe, Weidner (2015), S. 334.

SPNV-Fahrzeuge ergeben und mit dem Betrieb der Fahrzeuge einhergehen, sind zwingend zu erfüllen.

Der Lösungsansatz sollte eine betriebliche Multikuppelbarkeit ermöglichen und gleichzeitig zu der in SPNV-Fahrzeugen etablierten Technik kompatibel sein und deren Funktionalität nicht einschränken.

10. Kriterium: wettbewerbsfördernd

Der SPNV-Markt unterliegt, unter anderem aufgrund der begrenzten und sinkenden öffentlichen finanziellen Mittel für den Betrieb, einem großen Kostendruck (vgl. Abschnitt 2.1). Aufgabenträger und EVU haben daher ein großes Interesse daran, bei der Fahrzeugbeschaffung das über den Lebenszyklus der Fahrzeuge wirtschaftlichste Angebot von den Schienenfahrzeugherstellern zu erhalten. Aufgrund der zahlreichen gesetzlichen sowie infrastruktur- und aufgabenträgerbedingten Vorgaben ist der technische Gestaltungsspielraum der Hersteller bei der Angebotslegung heute nur sehr klein.

Wichtig ist in diesem Kontext zudem, dass weder bei der Verkehrsausschreibung noch bei der sich daran anschließenden Fahrzeugausschreibung Anbieter durch die Forderung nach Kompatibilität mit Altfahrzeugen diskriminiert werden.

Der Lösungsansatz sollte den Wettbewerb der Schienenfahrzeughersteller in der Fahrzeugbeschaffung der EVU und Aufgabenträger unterstützen.

Gewichtung der Kriterien

Zur Festlegung der Kriteriengewichtung wurden die zehn Kriterien mit einer Paarvergleichsmatrix von 46 Personen bewertet. Bei der Auswahl der Umfrageteilnehmer war es das Ziel, einerseits ein möglichst ganzheitliches Bild der SPNV-Akteursstruktur (EVU, Aufgabenträger, Bahnindustrie, Fahrgast) widerzuspiegeln und andererseits durch Einbeziehung der Wissenschaft (Vertreter aus Universitäten, Fachhochschulen und dem DLR) einen reflektierten Blick auf die Situation im SPNV einfließen zu lassen. Abbildung 3-3 zeigt die Zusammensetzung der Teilnehmer.

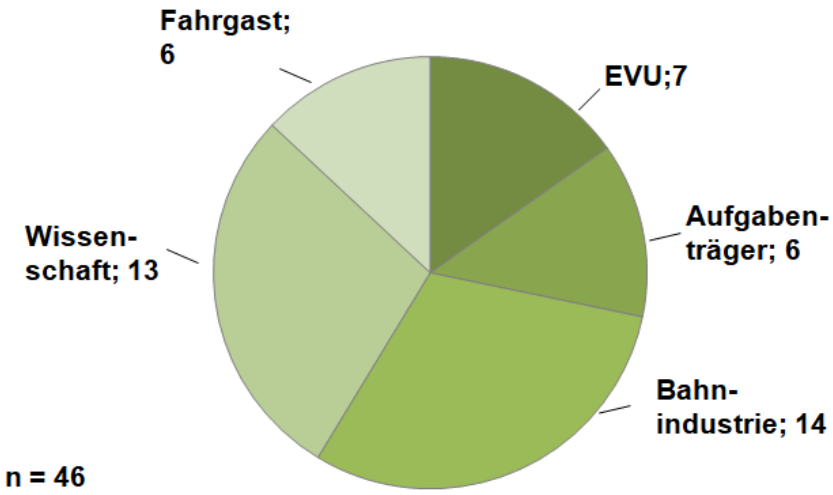


Abbildung 3-3 Zusammensetzung der Umfrageteilnehmer[198]
Quelle: eigene Darstellung

Die Teilnehmer wurden gebeten, bei jedem Vergleich eine Einschätzung darüber zu treffen, welches der beiden Kriterien aus ihrer Sicht für die erfolgreiche Markteinführung und -etablierung eines Lösungsansatzes zur Etablierung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit wichtiger und daher zu bevorzugen sei. Zur Erläuterung und Visualisierung der Fragestellung und der Auswahlkriterien erhielten die Teilnehmer die Abbildung 3-2 und die in Anhang 1 enthaltende Übersicht. Für die Durchführung der Bewertung wurde das ebenfalls in Anhang 1 enthaltende Formblatt zur Verfügung gestellt. Zudem stand die Autorin dieser Arbeit für Rückfragen zur Verfügung.

Das Ergebnis der Befragung ist in Abbildung 3-4 dargestellt, wobei jede Säule das Befragungsergebnis einer Befragungsgruppe wiedergibt. Beispielsweise wurde das Kriterium „betrieblich praktikabel“ von den EVU-Vertretern bei 16,8 Prozent der paarweisen Vergleiche bevorzugt. Die Säule „Gesamt“ stellt das Ergebnis ohne Berücksichtigung der Befragungsgruppe dar.

[198] Angegeben ist jeweils die Anzahl an Teilnehmern.

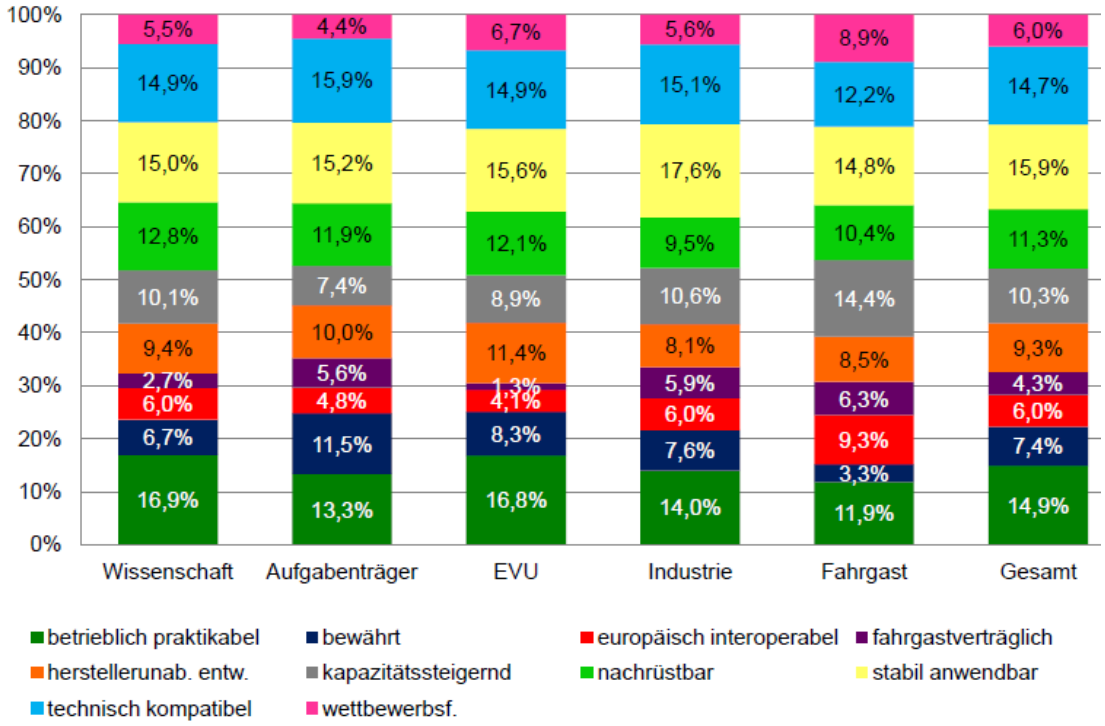


Abbildung 3-4 Ergebnis der Befragung zur Bestimmung der Gewichtung der Bewertungskriterien
Quelle: eigene Darstellung

In Auswertung der Grafik können folgende Aussagen getroffen werden.

Auswertung in Bezug auf die Befragungsgruppen

- Drei Kriterien („betrieblich praktikabel“, „technisch kompatibel“ und „stabil anwendbar“) wurden von allen Befragungsgruppen jeweils unter den vier zu favorisierenden Kriterien eingestuft.
- Drei Kriterien („fahrgastverträglich“, „europäisch interoperabel“ und „wettbewerbsfördernd“) erhielten von fast allen Befragungsgruppen die drei geringsten Wertigkeiten. Ausnahme bilden die Fahrgäste, die das Kriterium „bewährt“ mit Abstand als am unwichtigsten einschätzen und den Kriterien „europäisch interoperabel“ und „wettbewerbsfördernd“ eine höhere Bewertung gaben; das Kriterium „herstellerunabhängig entwickelt“ erhielt von den Fahrgästen nur die drittletzte und damit im Vergleich zu den anderen Gruppen vergleichsweise geringe Wertigkeit.
- Die Tendenz der Wertigkeiten (weniger wichtig oder eher wichtig) der übrigen Kriterien variiert stark je nach Befragungsgruppe.

Auswertung über alle befragten Teilnehmer (Säule „Gesamt“)

- Höchste Bewertungen, mit mindestens je zehn Prozent, erhielten die Kriterien „betrieblich praktikabel“, „kapazitätssteigernd“, „nachrüstbar“, „stabil anwendbar“ und „technisch kompatibel“.
- Untereinander unterscheiden sich die drei höchsten Bewertungen nur geringfügig um 1,2 Prozentpunkte, sodass diese als für die Experten gleich wichtig interpretiert werden können.
- Gemeinsam ist diesen von allen Teilnehmern sehr hoch priorisierten Kriterien („betrieblich praktikabel“, „stabil anwendbar“ und „technisch kompatibel“), dass ihre Erfüllung zu einem Lösungsansatz führt, der heute und zukünftig die geringsten Anpassungen im heutigen System erfordert.
- Die geringsten Bedeutungen mit 4,3 und 6,0 Prozentpunkten sahen die Experten bei den Kriterien „fahrgastverträglich“, „europäisch interoperabel“ und „wettbewerbsfördernd“.
- Zwei dieser drei Kriterien erhielten die gleiche Wertigkeit, der dritte eine um 1,7 Prozentpunkte niedrigere, sodass auch hier die Aussage getroffen werden kann, dass die drei Kriterien von den Experten als gleichwertig unwichtig eingestuft wurden.

Die in Abbildung 3-4 dargestellten Gewichtungen „Gesamt“ stellen die Einschätzung aller Teilnehmer dar und werden daher für die Bewertung der Lösungsansätze zur Herstellung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit verwendet.

3.3 Vorstellung und Bewertung der Lösungsansätze

Nachfolgend werden die Grundkonzepte von fünf Lösungsansätzen zur Herstellung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit (vgl. Tabelle 3-1) vorgestellt und in Bezug auf die Erfüllung der vorgestellten Kriterien bewertet (vgl. Abschnitte 3.3.1 bis 3.3.5). Im Anschluss folgt die vergleichende Auswertung der Untersuchungsergebnisse, um den Lösungsansatz herauszufiltern, welcher die größte Chance auf eine erfolgreiche Marktetablierung hat (vgl. Abschnitt 3.4).

Tabelle 3-1 Lösungsansätze zur Herstellung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit
Quelle: eigene Darstellung

Lösungsansatz	Kurzbeschreibung	Treiber/Verantwortlich
verbindliche Vorgabe im Lastenheft[199]	Auftraggeber formuliert Muss-Vorgabe im Lastenheft einer Ausschreibung	Aufgabenträger, EVU oder Bund/Gesetzgeber
Standardisierung der elektronischen Schnittstelle[200]	Normungsvorhaben auf europäischer Ebene	Europäisches Normungsgremium (CENELEC)
Entwicklung eines Adapters	Entwicklung von Soft- und Hardware zur Übersetzung von relevanten Protokollen	Engineeringdienstleister oder Komponentenlieferant in Zusammenarbeit mit Schienenfahrzeugherstellern
Etablierung von Konvoi-Verkehren	Entwicklung eines Systems, das es dem hinteren Fahrzeug ermöglicht, dem Vorderen auf Basis eines Fahrerassistenz-systems zu folgen	Engineeringdienstleister oder Komponentenlieferant in Zusammenarbeit mit Schienenfahrzeugherstellern
Etablierung einer virtuellen Kupplung	Entwicklung eines Systems, das es dem hinteren Fahrzeug ermöglicht, dem Vorderen auf Basis einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu folgen	Engineeringdienstleister, Komponentenlieferant oder Schienenfahrzeughersteller

3.3.1 Verbindliche Vorgabe im Lastenheft

Der Lösungsansatz enthält die Forderung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit im Rahmen von Verkehrs- beziehungsweise Fahrzeugausschreibungen durch Aufgabenträger, EVU oder den Bund.

Die Aufgabenträger haben als Besteller der SPNV-Leistungen die Möglichkeit, im Rahmen der Verkehrs- und/oder Fahrzeugausschreibungen fahrzeugseitige Anforderungen festzulegen. Diese Vorgaben werden in das Fahrzeuglastenheft aufgenommen und sind von den Schienenfahrzeugherstellern bei der Fahrzeugauslegung zu berücksichtigen und umzusetzen.

Eine analoge Vorgehensweise ist auch von EVU im Rahmen ihrer Fahrzeugausschreibungen denkbar, wenn diese (perspektivisch) die betriebliche Kuppelbarkeit mit ihrem eigenen Fuhrpark gewährleisten wollen. Darüber hinaus bestünde die Möglichkeit, dass der Bund hier ein Gesetz erlässt.

[199] Angenommen wird, dass die technische Umsetzung des Lösungsansatzes mit dem heutigen Kupplungssystem vergleichbar ist.
[200] Angenommen wird, dass die technische Umsetzung des Lösungsansatzes mit dem heutigen Kupplungssystem vergleichbar ist.

1. Kriterium: betrieblich praktikabel

Unter der Annahme, dass es dem Schienenfahrzeughersteller gelingt, eine technische Kompatibilität herzustellen, ist von keiner betrieblichen Einschränkung auszugehen. Der Ansatz ist betrieblich praktikabel.

2. Kriterium: bewährt

Die Aufgabenträger sind seit der Bahnreform in der Verantwortung, Verkehre auszuschreiben und in diesem Zusammenhang befähigt, Funktionalitäten einzufordern.

Dass die Forderung nach einer Kuppelbarkeit – zumindest zu einem Bestandsfahrzeug des gleichen Herstellers – erfolgreich sein kann, zeigt die Bestellung von Doppelstocktriebzügen (Bauart KISS) der Luxemburgischen Staatsbahn beim Schienenfahrzeughersteller Stadler, die eine Kuppelfähigkeit mit dessen einstöckigem Niederflurtriebzug der Bauart FLIRT forderte[201]. In Mischtraktion verkehrt der „SÜWEX“ (Südwest-Express) seit März 2015 zwischen Koblenz und Trier[202]. Vorangegangen war eine europaweite Ausschreibung der Aufgabenträger aus Rheinland-Pfalz, dem Saarland, Hessen und Baden Württemberg, im Ergebnis derer die DB Regio Südwest mit dem Betrieb des SÜWEX für die Dauer von 15 Jahren beauftragt wurde[203]. Der Ansatz konnte sich bereits in einer anderen Anwendung bewähren.

3. Kriterium: europäisch interoperabel

Von einzelnen grenzüberschreitenden Verbindungen abgesehen, verantworten die Aufgabenträger ausschließlich die Verkehre für ihre Regionen. Die Berücksichtigung von Anforderungen anderer Regionen ist nicht notwendig. Im Ergebnis entstehen aufgabenträgerspezifische Fahrzeuglösungen, welche auf europäischer Ebene nicht zwingend interoperabel sind.

[201] Vgl. Rheinland-Pfalz-Takt (ohne Angabe).
[202] Vgl. Rheinland-Pfalz-Takt (2015).
[203] Vgl. DB Regio (2015), S. 6.

4. Kriterium: fahrgastverträglich

Angenommen wird, dass die technische Umsetzung des Lösungsansatzes mit dem heutigen Kuppelsystem vergleichbar ist. Für die Fahrgäste entsteht daher aus der Umsetzung des Lösungsansatzes keine Änderung bei der Wahrnehmung des Verkehrsangebotes. Von ihrer Akzeptanz ist daher auszugehen.

5. Kriterium: herstellerunabhängig entwickelt

Einhergehend mit der Forderung der Aufgabenträger nach einer betrieblichen Multikuppelbarkeit besteht die Forderung nach der Offenlegung der dafür notwendigen technischen Daten und Schnittstellen (vgl. 2.3.3). Der Ansatz greift damit einerseits stark in die unternehmerische Expertise der Fahrzeughersteller ein und führt aber gleichzeitig zu herstellerindividuellen Lösungen, um die unter Umständen fremde Leittechnik mit der eigenen Leittechnik verbinden zu können. Der Ansatz kann nicht herstellerunabhängig entwickelt werden.

6. Kriterium: kapazitätssteigernd

Aufgrund der Annahme, dass die technische Umsetzung des Lösungsansatzes mit dem heutigen Kuppelsystem vergleichbar ist, führt der Ansatz zu keiner Änderung des grundsätzlichen Betriebskonzeptes. Die Fahrzeuge würden weiterhin als konventioneller Zugverband verkehren. Der Ansatz unterstützt nicht bei der Steigerung der Infrastrukturleistungsfähigkeit.

7. Kriterium: nachrüstbar

Der Lösungsansatz führt lediglich zu einer zukünftigen betrieblichen Multikuppelbarkeit von neu zu beschaffenden Fahrzeugen, da die Forderung nach der Kuppelbarkeit mit Bestandsfahrzeugen in Ausschreibungen nicht vergabekonform wäre. Grund ist, dass nur der Hersteller diese Forderung erfüllen kann, welcher die Bestandsfahrzeuge hergestellt hat, da nur dieser über die notwendigen Informationen verfügt. Die übrigen Hersteller wären diskriminiert, was das Vergaberecht nicht erlaubt. Der Ansatz ist nicht für eine Nachrüstung geeignet.

8. Kriterium: stabil anwendbar

Die Vorgabe der Aufgabenträger ist nicht technisch spezifiziert, sondern rein funktional und unterliegt damit direkt keiner Marktdynamik. Wenngleich die Forderung bei jeder weiteren Ausschreibung zur Entwicklung neuer Lösungen führt – welche untereinander nicht zwingend kompatibel sind – so ist dennoch die Funktionsfähigkeit einer einmal entwickelten Lösung davon nicht betroffen. Eine stabile Anwendbarkeit ist daher gegeben.

9. Kriterium: technisch kompatibel

Wie im Abschnitt 2.3.3 erläutert, stehen einer fahrzeugtechnischen Kuppelbarkeit viele Hemmnisse, insbesondere hinsichtlich der elektrischen Kompatibilität der Fahrzeuge, entgegen. Fordert der Aufgabenträger diese dennoch ein, ist die technische Umsetzung mit großem Aufwand und der Bereitstellung von technischen Daten des bereits existierenden, mit dem zu kuppelnden Fahrzeugs verbunden. Der Ansatz ist nicht ohne Weiteres technikkompatibel.

10. Kriterium: wettbewerbsfördernd

Verkehrs- und Fahrzeugausschreibungen finden in der Regel öffentlich statt. Entsprechend haben alle Fahrzeughersteller die Chance, die Ausschreibungsbedingungen zu erfüllen. Wenngleich es, wie oben dargestellt, zwingende Voraussetzung ist, dass die für die Herstellung des Zugverbandes notwendigen Daten und Schnittstellen offengelegt werden, so hat doch der Hersteller einen entscheidenden Vorteil, der die zu kuppelnden Fahrzeuge hergestellt hat, da er über die umfangsreichsten Fahrzeugkenntnisse verfügt.

Gleichzeitig gehen mit dieser Forderung höhere Fahrzeugkosten und eine sinkende Planungssicherheit einher, zum Beispiel in Folge erhöhter Zulassungsaufwände und -risiken. Die Attraktivität der Fahrzeugausschreibung und damit die Anzahl potenzieller Bieter sinkt. Es besteht zudem sogar das Risiko, dass der Aufgabenträger oder das EVU kein wirtschaftliches Angebot erhält und die Ausschreibung anzupassen und erneut durchzuführen ist – mit entsprechend hohen Aufwänden auf der Bieter- und Auftraggeberseite. Der Ansatz unterstützt nicht den Wettbewerb zwischen den Herstellern.

3.3.2 Standardisierung der elektronischen Schnittstelle

Es wird davon ausgegangen, dass die WTB/MVB-Struktur langfristig vom Ethernet abgelöst wird[204]. Der Lösungsansatz beschreibt daher die Standardisierung der Ethernetschnittstelle am Kupplungskopf auf europäischer Ebene. Hierzu ist beim zuständigen Normungsgremium (CENELEC[205]) ein entsprechendes Normungsvorhaben anzustoßen und umzusetzen. Der Normungsprozess umfasst neun Arbeitsschritte und ist mit durchschnittlich 36 Monaten[206] entsprechend zeit- und kostenintensiv. Die standardisierte elektronische Schnittstelle könnte in Ergänzung zur bereits vorhandenen Spezifikation der mechanischen und pneumatischen Schnittstelle[207], langfristig in die TSI Loc&Pas aufgenommen werden.

1. Kriterium: betrieblich praktikabel

Wird im Rahmen eines Normungsvorhabens ein Standard festgelegt, ist nach dessen Umsetzung von keiner betrieblichen Einschränkung auszugehen. Der Ansatz ist betrieblich praktikabel.

2. Kriterium: bewährt

Im Rahmen der Normungsarbeit wurden und werden zahlreiche technische Details spezifiziert und standardisiert. Entsprechend kann auf vorhandene Erfahrungen aufgebaut werden. Der Ansatz hat sich bereits in vergleichbaren Anwendungsfällen bewährt.

3. Kriterium: europäisch interoperabel

Wird ein Standard auf europäischer Ebene erarbeitet und verabschiedet, erfüllt dieser auf europäischer Ebene die Anforderung nach interoperabler Anwendbarkeit.

4. Kriterium: fahrgastverträglich

Angenommen wird, dass die technische Umsetzung des Lösungsansatzes mit dem heutigen Kuppelsystem vergleichbar ist. Für die Fahrgäste entsteht daher aus der Umsetzung des Lösungsansatzes keine Änderung bei der Wahrnehmung des Verkehrsangebotes. Es ist von ihrer Akzeptanz auszugehen.

[204] Vgl. Retschy (2015), Folie 25.
[205] Vgl. CENELEC (2017).
[206] Vgl. Wendt (2013), Folie 18.
[207] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Abschnitt 4.2.2.2.3, Absatz a-2) sowie Anhang, Abschnitt 5.3.1, Absatz 1 in Verbindung mit Anlage J-1, Ziffer 66.

5. Kriterium: herstellerunabhängig entwickelt

Im Rahmen der Normung ist es notwendig, dass Schienenfahrzeughersteller einzelne Elemente ihrer bisherigen Leittechnikarchitektur anpassen müssen, damit die Kommunikation verschiedener Leittechnik möglich wird. Daraus und aus gegebenenfalls notwendigen Anpassungen in der Produktion und der Produktpalette entstehen Anpassungskosten, die zunächst in Vorleistung vom Hersteller zu tragen sind und sich später in einem erhöhten Fahrzeugpreis widerspiegeln.

Die Normungsarbeit reflektiert zudem die Interessen der in den Gremien Beteiligten und bietet ihnen die Möglichkeit, aktiv an der Normung mitzuwirken. Der Ansatz ist nicht herstellerunabhängig.

6. Kriterium: kapazitätssteigernd

Der Ansatz führt aufgrund der Annahme, dass die technische Umsetzung des Lösungsansatzes mit dem heutigen Kupplungssystem vergleichbar ist, zu keiner Änderung des grundsätzlichen Betriebskonzeptes, da die Fahrzeuge weiterhin als konventioneller Zugverband verkehren würden. Der Ansatz unterstützt nicht bei der Steigerung der Infrastrukturleistungsfähigkeit.

7. Kriterium: nachrüstbar

Wird die elektronische Schnittstelle standardisiert, hat dies unmittelbar ausschließlich einen Effekt auf Neufahrzeuge. Eine Mischtraktion mit Bestandsfahrzeugen, welche einem Bestandsschutz unterliegen, ist nur dann möglich, wenn diese (freiwillig) umgerüstet werden. Je nachdem wie der Standard ausgestaltet wurde, besteht jedoch die Gefahr, dass die standardisierte elektronische Schnittstelle nicht ohne Weiteres bei den Bestandsfahrzeugen umgesetzt werden kann und zu unverhältnismäßig großen Aufwänden führt. Der Ansatz ist nicht ohne Weiteres nachrüstbar.

8. Kriterium: stabil anwendbar

Aufgrund der in Abschnitt 2.3.3 erläuterten regelmäßigen Änderungen in der Leittechnikarchitektur ist der Schnittstellenstandard laufend auf Aktualität und Anpassungsbedarf zu überprüfen. Die rasante Entwicklung im IT-Sektor lässt vermuten, dass in Zukunft entwickelte technische Normen und Standards schnell

veralten[208]. In Folge dessen wird sich die Technologie schneller weiterentwickeln als der Standard. Hersteller können sich damit auf die langfristige Gültigkeit einzelner technischer Normen nur bedingt verlassen. So ist zum Beispiel für die von der Europäischen Union erarbeiteten Normen ein Überarbeitungsrhythmus von fünf bis sieben Jahren üblich. Der Ansatz ist nicht stabil anwendbar.

9. Kriterium: technisch kompatibel

Die von einem Normungsgremium erarbeiteten Standards und Leitlinien folgen dem Anspruch, auf den gesicherten Ergebnissen von Wissenschaft, Technik und auf Erfahrungen zu basieren. Wird eine elektronische Schnittstelle normiert, ist entsprechend davon auszugehen, dass diese die technischen Anforderungen, die sich aus der Kupplung von Fahrzeugen ergeben, erfüllt und zu der in SPNV-Fahrzeugen etablierten Technik grundsätzlich kompatibel ist. Der Ansatz ist technikkompatibel.

10. Kriterium: wettbewerbsfördernd

Wird der Standard am Markt eingeführt und dessen Einhaltung verbindlich vereinbart, ist er von allen Marktteilnehmern anzuwenden. Nachdem der Standard von den Schienenfahrzeugherstellern auskonstruiert und umgesetzt wurde, stellt die elektronische Schnittstelle mittelfristig kein Diversifizierungsmerkmal in den Vergabeverfahren mehr dar. In Folge dessen erhöht sich die Kosteneffizienz und aus Sicht der Aufgabenträger/EVU steigt das Angebot an möglichen Herstellern. Zudem trägt die Standardisierung dazu bei, dass sich technisches Wissen schneller verbreitet. Der Ansatz wirkt wettbewerbsfördernd.

3.3.3 Entwicklung eines Adapters

Der Lösungsansatz umfasst die Entwicklung eines Adapters (Gateways) inklusive der dafür notwendigen Hard- und Software. Adapter sind Anpassungselemente, die zum Beispiel zwei verschiedene Stecker mit nicht aufeinander abgestimmten Arbeitsweisen kombinieren. Der zwischen zwei Kupplungen zu installierende Adapter übernimmt die Protokollübersetzung zwischen der Leittechnik der zu kuppelnden Fahrzeuge und konvertiert die Daten, die zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden, passend für das jeweilige Zielnetzwerk.

[208] Vgl. Ebers (2017), S. 104.

Um die Kommunikation zweier „fremder“ Triebfahrzeuge zu ermöglichen, sind bei der Auslegung des Adapters Parameter und Randbedingungen abzustimmen. Dabei ist auch festzulegen, wie mit eventuell vorhandenen Unterschieden in den Fahrzeugfunktionalitäten (zum Beispiel Klimatisierung, selektive Türfreigabe, Umfang der Fahrgastinformation) umzugehen ist.

Die Entwicklung könnte in Verantwortung eines Engineeringdienstleisters oder Komponentenherstellers der Bahnindustrie, in Zusammenarbeit mit den Schienenfahrzeugherstellern erfolgen.

1. Kriterium: betrieblich praktikabel

Wie unter „9. Kriterium: technisch kompatibel“ dargestellt werden wird, ist es möglich, dass Fahrzeugfunktionalitäten reduziert werden müssen, um die Kommunikationsfähigkeit zu gewährleisten. Sind zum Beispiel die Fahrzeugdynamik oder die Türschließzeiten betroffen, können sich aus der Reduktion der Fahrgeschwindigkeiten oder Steigerung der Fahrgastwechselzeiten Einschränkungen für den Betriebsablauf ergeben, da dann der kleinste gemeinsame Nenner genutzt werden muss. Der Ansatz ist betrieblich nicht uneingeschränkt praktikabel.

2. Kriterium: bewährt

Eine vergleichbare Anwendung wurde für die Umsetzung der von der luxemburgischen Staatsbahn geforderten Kuppelbarkeit zwischen dem FLIRT und dem KISS der Firma Stadler eingesetzt. WTB-Gateways mit identischer Software ermöglichen hier die Kommunikation der beiden Fahrzeugleittechniken, welche ähnliche Strukturen aufweisen (vgl. Abbildung 3-5). [209] Der Ansatz hat sich bewährt.

[209] Vgl. Zander et al. (2015), Folie 16.

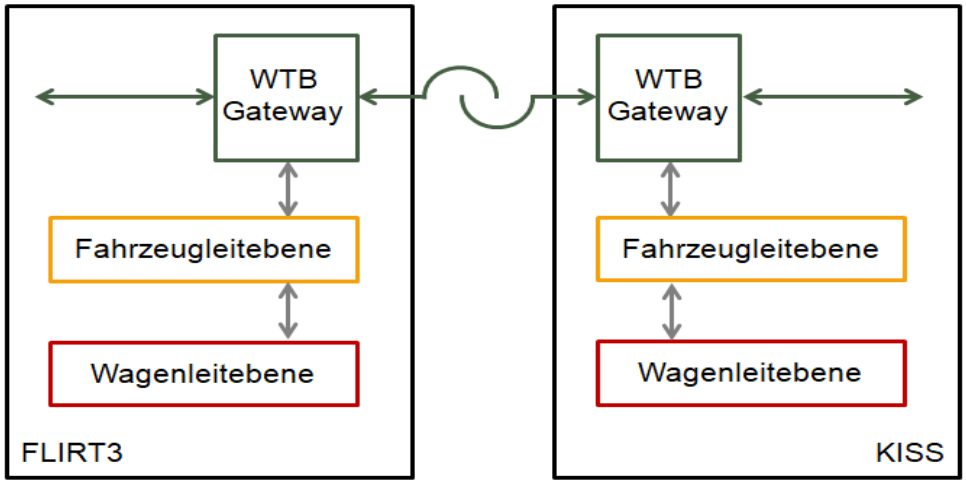


Abbildung 3-5 WTB-Gateways für die Kommunikation zwischen FLIRT3 und KISS
Quelle: eigene Darstellung nach Zander et al. (2015), Folie 16

3. Kriterium: europäisch interoperabel

Wesentliches Erfolgsmoment des Lösungsansatzes ist die Standardisierung der Schnittstellen. Hier obliegt es den Entwicklern, diese national oder auf europäischer Ebene zu definieren. Sofern gewollt, ist der Ansatz damit europäisch interoperabel.

4. Kriterium: fahrgastverträglich

Wie oben dargestellt, besteht die Gefahr, dass es zu betrieblichen oder qualitativen Einschränkungen des Verkehrsangebotes kommt. Aus Sicht der Fahrgäste ist die Akzeptanz des Ansatzes damit gefährdet.

5. Kriterium: herstellerunabhängig entwickelt

Der Lösungsansatz ist im Vergleich zu einer standardisierten Schnittstelle einfacher umzusetzen, da hier die vorhandenen Umsetzungen der Schienenfahrzeughersteller unberührt bleiben. Sie sind jedoch in die Adapterentwicklung einzubeziehen, um die Parameter (Ein- und Ausgangsdaten) mit ihren vorhandenen Konzepten abzugleichen, und zu diesem Zweck in Teilen gegebenenfalls offenzulegen. Der Ansatz greift nicht in vorhandene Fahrzeugkonzepte ein und ist herstellerunabhängig entwickelbar.

6. Kriterium: kapazitätssteigernd

Der Ansatz führt zu keiner Änderung des grundsätzlichen Betriebskonzeptes, da die Fahrzeuge weiterhin als konventioneller Zugverband verkehren würden. Der Ansatz unterstützt nicht bei der Steigerung der Infrastrukturleistungsfähigkeit.

7. Kriterium: nachrüstbar

Unter der Annahme, dass bei der Entwicklung des Adapters alle relevanten Zugkonfigurationen berücksichtigt werden, ist der Adapter auch in der Lage, die dort notwendigen Daten passend zu konvertieren. Dies gilt sowohl für Bestandsfahrzeuge als auch für Neufahrzeuge. Der Ansatz ist nachrüstbar.

8. Kriterium: stabil anwendbar

Wie in Abschnitt 2.3.3 dargestellt, unterliegen die Leittechnikarchitektur und die zu übertragenden Daten einer starken Marktdynamik. Damit die Funktionalität des Adapters erhalten bleibt, sind regelmäßige Anpassungen der Adaptersoftware notwendig, welche jedoch über Softwareupdates realisierbar sind, sofern der Adapter als „futureproof"-Konzept, also lern- und erweiterungsfähig, gestaltet wurde. Der Ansatz ist stabil anwendbar.

9. Kriterium: technisch kompatibel

Bei der Festlegung der Konvertierungsmethodik ist es zur Sicherstellung der Kommunikationsfähigkeit und in Reaktion auf die verzögerte Kommunikationsgeschwindigkeit in Folge der benötigten Konvertierungszeit gegebenenfalls notwendig, den Umfang der Fahrzeugfunktionalität zu reduzieren. Von einer grundsätzlichen technischen Umsetzbarkeit und einer Kompatibilität zur etablierten Technik ist jedoch auszugehen. Der Ansatz ist technikkompatibel.

10. Kriterium: wettbewerbsfördernd

Wie auch bei dem Ansatz „Standardisierung der elektronischen Schnittstelle" erhöht die Einführung eines Adapters aus Sicht der EVU die Anzahl möglicher Lieferanten, da die elektronische Schnittstelle kein Diversifizierungsmerkmal in den Vergabeverfahren mehr darstellt. Der Ansatz wirkt wettbewerbsfördernd.

3.3.4 Etablierung von Konvoiverkehren

Der Lösungsansatz umfasst die Entwicklung einer technischen Lösung zur Etablierung von Konvoi-Verkehren. Treiber könnten erneut die Engineeringdienstleister oder Komponentenlieferanten, in Zusammenarbeit mit Schienenfahrzeugherstellern sein.

Bei einer Konvoilösung verkehren die Triebfahrzeuge ohne eine physische Verbindung als Zugverband hintereinander. Das hintere Fahrzeug orientiert sich

hierzu ausschließlich an der Bewegung des Vorderen, wobei das zu entwickelnde System nur auf Informationen zum aktuellen Abstand zurückgreift, die per Sensorik ermittelt und bereitgestellt werden. Es erfolgt kein Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen untereinander (vgl. Abbildung 3-6).

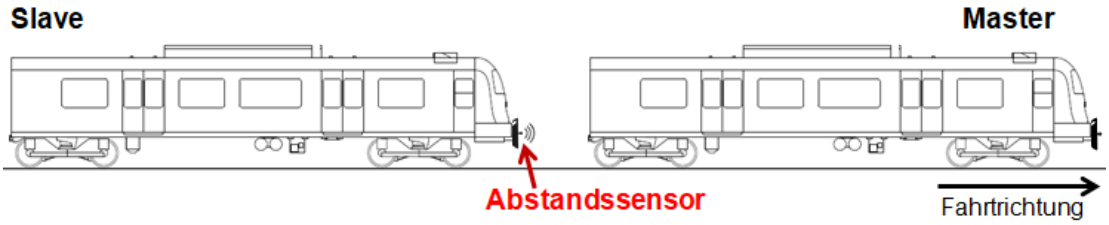


Abbildung 3-6 Konvoi im Schienenverkehr
Quelle: eigene Darstellung

Vergleichbar mit den bereits etablierten Fahrerassistenzsystemen zur energieeffizienten Fahrweise wird dem Triebfahrzeugführer des hinteren Fahrzeugs über ein Assistenzsystem mitgeteilt, wie er sein aktuelles Fahrverhalten anpassen muss, um den benötigten Sicherheitsabstand einzuhalten.

1. Kriterium: betrieblich praktikabel

Die Sensordaten zur Abstandsbestimmung stellen bei diesem Ansatz die einzige Informationsquelle dar. Gegenüber den jetzigen Fahrzeugkonzepten ergibt sich in Folge des einzuhaltenden Sicherheitsabstands zwischen den Fahrzeugen des Zugverbandes pro Zugverband ein erhöhter Streckenkapazitätsbedarf. Hieraus resultieren Einschränkungen im Betriebsablauf oder sogar Anpassungen des Fahrplans (zum Beispiel Taktdichte). Weiterhin bedarf es in allen Fahrzeugen des Konvois eines Triebfahrzeugführers, welcher die Befehle des Fahrerassistenzsystems umsetzen muss. Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.1 dargestellten personellen Engpässe, insbesondere bei den Triebfahrzeugführern, könnte die Umsetzung des Ansatzes mit betrieblichen Einschränkungen verbunden sein, wenn nicht alle Fahrzeuge mit Triebfahrzeugführern besetzt werden können. Der Ansatz ist betrieblich nicht praktikabel.

2. Kriterium: bewährt

Der Konvoi-Betrieb im PKW- und LKW-Verkehr wird bereits getestet und vorangetrieben (vgl. Anhang 2). Es fand jedoch weder eine Umsetzung im täglichen Betrieb auf der Straße statt, noch existieren Erfahrungen aus dem Vollbahnbereich. Der Ansatz hat sich bisher nicht bewähren können.

3. Kriterium: europäisch interoperabel

Der Ansatz basiert auf der Entwicklung eines Konvoi-Moduls, welches keine Schnittstelle zur elektronischen Leittechnik aufweist und daher leicht auch auf europäischer Ebene eingesetzt werden kann.

4. Kriterium: fahrgastverträglich

Die Umsetzung des Lösungsansatzes führt für die Fahrgäste zu einer Verbesserung der wahrgenommenen Servicequalität, da pro gekuppeltem Fahrzeug ein Triebfahrzeugführer anwesend sein muss und damit die Anzahl der Ansprechpartner für die Fahrgäste, zum Beispiel in Störungs- oder Notfallsituationen, steigt. Es ist daher von der Akzeptanz der Fahrgäste auszugehen.

5. Kriterium: herstellerunabhängig entwickelt

Das benötigte Konvoi-Modul verfügt über keine Schnittstelle zur elektronischen Leittechnik und kann, vergleichbar mit den Fahrerassistenzsystemen, herstellerunabhängig entwickelt und nachgerüstet werden. Ein Anpassen der etablierten Fahrzeugstrukturen ist nicht notwendig. Der Ansatz ist herstellerunabhängig.

6. Kriterium: kapazitätssteigernd

Die Umsetzung des Lösungsansatzes unterstützt nicht die Steigerung der Infrastrukturleistungsfähigkeit. Stattdessen birgt sie die Gefahr, dass aus dem einzuhaltenden Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen innerhalb des Fahrzeugverbands ein erhöhter Streckenbedarf resultiert und die Infrastruktur zusätzlich beansprucht wird.

7. Kriterium: nachrüstbar

Das für die Konvoi-Lösung benötigte Modul bedarf, wie auch ein Fahrerassistenzsystem, keiner Schnittstelle zur elektronischen Leittechnik. Es wertet nur die von der Sensorik vorgenommene Abstandsmessung aus und teilt dem Triebfahrzeugführer mit, ob er seine Geschwindigkeit beibehalten, verzögern oder erhöhen muss. Es handelt sich um ein nachrüstbares Modul, das sowohl bei Neufahrzeugen direkt eingebaut als auch bei Bestandsfahrzeugen nachgerüstet werden kann.

8. Kriterium: stabil anwendbar

Das Konvoi-Modul arbeitet autark, unabhängig von anderen Fahrzeugsystemen. Es sind keine Systemanpassungen notwendig. Der Ansatz ist stabil anwendbar.

9. Kriterium: technisch kompatibel

Das notwendige, mit einem Fahrerassistenzsystem vergleichbare Konvoi-Modul arbeitet autark und ist nachrüstbar. Da der Triebfahrzeugführer auf Hinweis des Moduls agiert, sind keine Änderungen in den vorhandenen Fahrzeugstrukturen notwendig. Zwischen den im Konvoi betriebenen Fahrzeugen besteht keine Verbindung, weder physisch noch virtuell, um für den Fahrgastbetrieb relevante Informationen auszutauschen (zum Beispiel Änderungen im Betriebsablauf, Fahrgastinformationssystem und seitenselektive Türfreigabe). Die Funktionalität des Zugverbandes ist eingeschränkt. Der Ansatz ist daher nicht technikkompatibel.

10. Kriterium: wettbewerbsfördernd

Nachrüstbare Module, die keine Anpassungen in vorhandenen Fahrzeugkonzepten benötigen, erhöhen aus Sicht der Aufgabenträger das Angebot möglicher Lieferanten. Der Ansatz wirkt wettbewerbsfördernd.

3.3.5 Etablierung einer virtuellen Kupplung

Der Lösungsansatz umfasst die Entwicklung einer technischen Lösung zur Etablierung einer virtuellen Kupplung zwischen Triebfahrzeugen. Engineering-dienstleister, Komponentenlieferanten und Schienenfahrzeughersteller können die zentralen Entwicklungstreiber sein.

Bei einem virtuellen Zugverband fahren die Fahrzeugeinheiten ohne eine physische Verbindung dicht hintereinander und kommunizieren über zwei voneinander unabhängige Kommunikationskanäle (vgl. Abbildung 3-7). Ein Abstandssensor dient der ergänzenden Überprüfung des Sicherheitsabstandes.

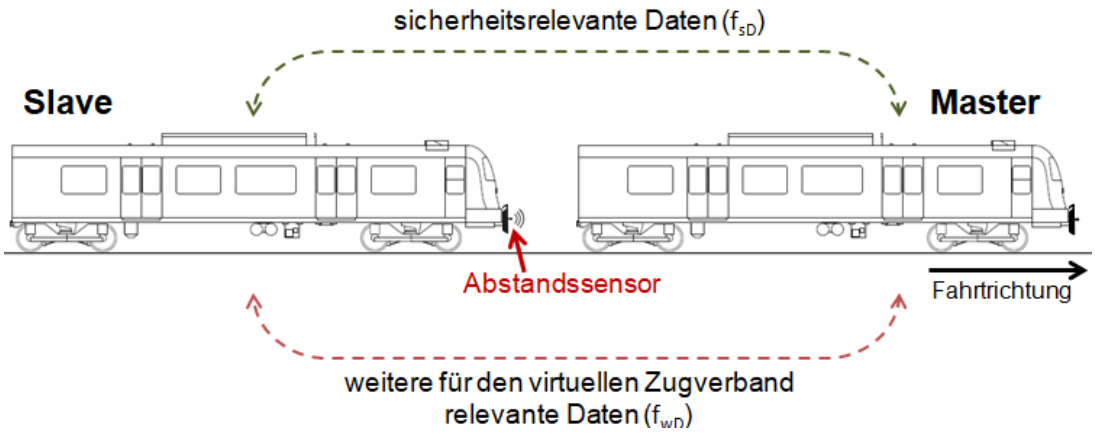


Abbildung 3-7 Virtuelle Kupplung zweier Triebfahrzeuge
Quelle: eigene Darstellung

Das hintere Fahrzeug (Slave) nutzt die vom vorderen Fahrzeug (Master) über einen Kommunikationskanal bereitgestellten Informationen, um diesem automatisiert mit einem optimal kurzen Abstand zu folgen. Auf einem separaten Kommunikationskanal werden die weiteren für die Herstellung und den Betrieb des virtuellen Zugverbandes relevanten Daten ausgetauscht.

1. Kriterium: betrieblich praktikabel

Die Verknüpfung der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation mit dem automatisierten Folgen ermöglicht eine optimale Regelung des hinteren Fahrzeugs und damit sehr geringe Fahrzeugabstände. Es ist von keinen betrieblichen Einschränkungen auszugehen. Der Ansatz ist betrieblich praktikabel.

2. Kriterium: bewährt

Anwendungen, die eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation und ein (teil-) automatisiertes Folgen/Fahren der Fahrzeuge aufweisen, sind im Urban Rail/Stadtbahnbereich vorhanden (zum Beispiel Linie 4 der Metro von São Paulo[210] und die Métro Lille[211]). Der Lösungsansatz hat sich bereits bewährt.

3. Kriterium: europäisch interoperabel

Der Ansatz basiert auf der Entwicklung eines Moduls „virtuelle Kupplung“, wobei die Standardisierung der Schnittstellen ein Schlüsselfaktor für den Erfolg des Ansatzes darstellt. Hier obliegt es den Entwicklern, diese national oder auf

[210] Vgl. Siemens (2013c), S. 1.
[211] Vgl. Alstom (2013a), S. 1.

europäischer Ebene zu definieren. Sofern gewollt, ist der Ansatz damit europäisch interoperabel.

4. Kriterium: fahrgastverträglich

Die Umsetzung des Lösungsansatzes führt zu einem neuen Fahrzeugkonzept, da der Slave dem Master führerlos, automatisiert folgt. Wenngleich sich automatisierte Systeme bei U- und S-Bahnen bereits bewährt haben, so fehlt es im Nah- und Fernverkehr auf der Schiene noch an Akzeptanz[212].

5. Kriterium: herstellerunabhängig entwickelt

Das Modul „virtuelle Kupplung“ bedarf einer abgestimmten Regelungs- und Kommunikationslogik. Vergleichbar mit der Adapterlösung müssen Eingangs- und Ausgangsdaten unter Berücksichtigung etablierter Fahrzeugkonzepte abgestimmt werden. Es ist jedoch kein separates Modul für jeden Schienenfahrzeughersteller zu entwickeln. Der Ansatz ist herstellerunabhängig.

6. Kriterium: kapazitätssteigernd

Der Lösungsansatz befähigt ein Fahrzeug mit dem ihm vorausfahrenden Fahrzeug zu kommunizieren und diesem zu folgen. Auf lange Sicht ist es vorstellbar, dass mehrere Zugverbände auf der freien Strecke virtuelle Zugverbände bilden und damit die Abstände zwischen zwei Zugverbänden reduziert und neue Streckenkapazitäten nutzbar gemacht werden können. Langfristig kann der Lösungsansatz dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur zu erhöhen.

7. Kriterium: nachrüstbar

Wie auch bei der zuvor dargestellten Konvoilösung und vergleichbar mit einem Fahrerassistenzsystem handelt es sich um eine nachrüstbare Lösung. Im Unterschied zur Konvoilösung benötigt die virtuelle Kupplung jedoch einer Verbindung zur elektronischen Schnittstelle, um auf relevante Funktionen und Informationen des hinteren Fahrzeugs zugreifen zu können. Dies führt zu höheren Umrüstungsaufwänden.

8. Kriterium: stabil anwendbar

Für die automatisierte Regelung von Traktion und Bremse bedarf es der Informationen über die Geschwindigkeit und die Position von Master und Slave. Die

[212] Vgl. Gralla (2016a), S. 26.

Schnittstelle zur elektronischen Leittechnik sowie die Regelungslogik des Slaves sind stabil. Gleiches gilt für die Schnittstelle und die Kommunikationsebene zwischen Master und Slave für die Übertragung der weiteren zugverbandrelevanten Informationen und Befehle. Der Ansatz kann daher über einen langen Zeitraum stabil zur Anwendung kommen. Etwaig notwendige Softwareanpassungen können über Updates erreicht werden („futureproof"-Konzept).

9. Kriterium: technisch kompatibel

Eine virtuelle Kupplung bedarf verschiedener Schnittstellen zum Fahrzeug. Gewährleistet werden muss, dass die Regelungseinheit Zugriff auf die Traktion und die Bremse hat. Darüber hinaus ist für den Austausch der weiteren für den Fahrgastbetrieb relevanten Daten ein separater, vom fahrdynamikrelevanten Kommunikationsweg unabhängiger Kanal bereitzustellen. Für beide Schnittstellen bedarf es jedoch einiger Anpassungen in der Leittechnikarchitektur. Der Ansatz ist nicht uneingeschränkt technikkompatibel.

10. Kriterium: wettbewerbsfördernd

Das Modul „virtuelle Kupplung" ist eine standardisierte Lösung, in Folge derer zu erwarten ist, dass die Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen auf eine erhöhte Anzahl möglicher Lieferanten zurückgreifen können. Der Ansatz wirkt wettbewerbsfördernd.

3.4 Identifizierung des chancenreichsten Lösungsansatzes

Um zu ermitteln, welcher Ansatz im weiteren Verlauf dieser Arbeit detaillierter zu untersuchen ist, sind die soeben vorgenommenen Einschätzungen zu den fünf Lösungsansätzen jeweils in ein Bewertungsergebnis zu überführen. Dazu werden bei jedem dieser Lösungsansätze die in Abschnitt 3.2 ermittelten Gewichtungen der Kriterien addiert, welche vom Lösungsansatz erfüllt werden. Hieraus kann bei jedem Lösungsansatz ein Bewertungsergebnis zwischen Null und 100 Prozent entstehen.

Zum Beispiel ist das Bewertungsergebnis des Lösungsansatzes „Verbindliche Vorgabe im Lastenheft" 42,5 Prozent. Es entsteht aus der Addition der Kriteriengewichtungen, welche er erfüllt, also betrieblich praktikabel (14,9), bewährt (7,4), fahrgastverträglich (4,3) und stabil anwendbar (15,9). Analog werden die Bewertungsergebnisse der anderen Lösungsansätze bestimmt (vgl. Abbildung 3-8).

Der Lösungsansatz mit dem höchsten Bewertungsergebnis wird als chancenreichster Lösungsansatz eingestuft.

Lösungs-ansatz	1. betrieblich praktikabel	2. bewährt	3. europäisch interoperabel	4. fahrgast-verträglich	5. hersteller-unab. entw.	6. kapazitäts-steigernd	7. nachrüst-bar	8. stabil anwendbar	9. technisch kompatibel	10. wettbe-werbsf.	Bewertungs-ergebnis
verb. Vorgabe	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	**42,5**
	14,9	7,4		4,3				15,9			
elektr. Stand.	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	**53,3**
	14,9	7,4	6,0	4,3					14,7	6,0	
Adapter	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	**70,6**
		7,4	6,0		9,3		11,3	15,9	14,7	6,0	
Konvoi	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	**52,8**
			6,0	4,3	9,3		11,3	15,9		6,0	
virtuelle Kuppl.	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✓	**81,1**
	14,9	7,4	6,0		9,3	10,3	11,3	15,9		6,0	

Abbildung 3-8 Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse[213]
Quelle: eigene Darstellung

Deutlich wird, dass kein Lösungsansatz alle gewünschten Kriterien erfüllt. Je nach Lösungsansatz variiert die Anzahl an erfüllten Kriterien zwischen vier und acht, wobei die Kriterien bewährt, europäisch interoperabel, stabil anwendbar und wettbewerbsfördernd am häufigsten (von vier Ansätzen) und das Kriterium kapazitätssteigernd von lediglich einem Ansatz erfüllt wird. Interessant dabei ist, dass drei von den im ersten Satz zuerst genannten Kriterien von den Experten als vergleichsweise unwichtig eingestuft wurden, während dem letztgenannten Kriterium eher eine hohe Wertigkeit zugesprochen wurde.

Das niedrigste und damit schlechteste Ergebnis erzielt der Lösungsansatz „verbindliche Vorgabe in einem Lastenheft“. Die virtuelle Kupplung erreicht das höchste und damit beste Bewertungsergebnis. Sie wird daher im Rahmen dieser Arbeit als chancenreichster Lösungsansatz eingestuft. Das zweitbeste Ergebnis erreicht die Adapterlösung. Auffällig ist, dass keiner der beiden Ansätze alle drei von

[213] Die angegebenen Werte entsprechen den in Abschnitt 3.2 ermittelten Gewichtungen der einzelnen Bewertungskriterien (vgl. Abbildung 3-4, Säule „Gesamt“).

den Experten als am wichtigsten eingestuften Kriterien erfüllt. Während die virtuelle Kupplung mit Anpassungen in der vorhandenen Leittechnikarchitektur verbunden ist, fehlt bei der Adapterlösung die betriebliche Praktikabilität.

Zudem sei darauf hingewiesen, dass die vorangegangenen Bewertungen auf der wissenschaftlichen Einschätzung des Autors sowie, wo vorhanden, auf anerkannten wissenschaftlichen Quellen basieren. Um das Ergebnis zu stabilisieren, sind Expertenbefragungen durchzuführen, was jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit geleistet werden kann.

Im Kontext der Marktetablierung und -durchdringung der virtuellen Kupplung existieren technische, wirtschaftliche sowie prozessuale Marktumsetzungsrisiken und rechtliche Risiken. In den nachfolgenden Kapiteln wird der Lösungsansatz daher detailliert hinsichtlich seiner technischen Umsetzbarkeit, seiner Wirtschaftlichkeit und der Chance auf seine Marktumsetzung und -etablierung bewertet. Hierzu ist es notwendig, die virtuelle Kupplung zunächst umfassend zu erläutern.

4 Die virtuelle Kupplung

Ziel des Kapitels ist es, die Anforderungen herauszuarbeiten, welche die virtuelle Kupplung erfüllen muss. Dies umfasst sowohl die Anforderungen, welche das Modul selbst betreffen, als auch die Rahmenbedingungen, unter denen sie entwickelt, implementiert und betrieben werden soll[214]. Eine Methode für ein strukturiertes Vorgehen bei der Anforderungsanalyse (Requirements Engineering) ist zum Beispiel in *Lemmer (2009)* dargestellt. Der Prozess setzt sich aus den in Abbildung 4-1 dargestellten vier Schritten zusammen, deren Ergebnisse aufeinander aufbauende Dokumente mit steigendem Detaillierungsgrad sind[215].

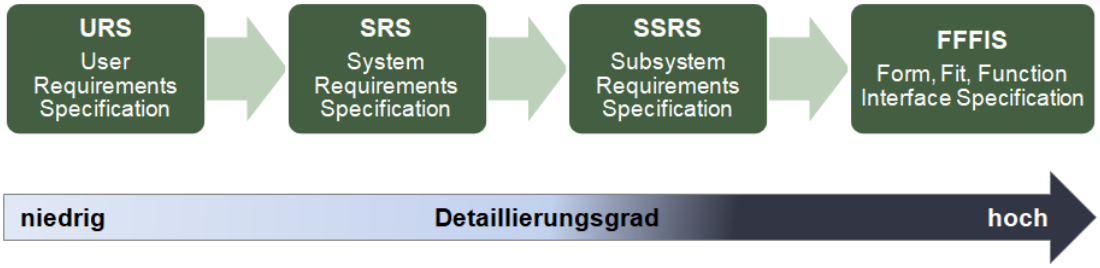


Abbildung 4-1 Prozess des Requirement Engineerings
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Lemmer (2009), S. 28

Im Zentrum dieses Kapitels steht der erste Prozessschritt, die Erarbeitung der User Requirements Specification (URS), welche sich in die vier Abschnitte

- allgemeine Angaben,
- funktionale Anforderungen,
- nicht funktionale Anforderungen und
- spezifische Anforderungen der Feldtests

gliedert[216]. Da diese Anforderungen und Funktionen nur das externe Verhalten des Systems festlegen, wird hier eine Vorentscheidung bezüglich des Systemdesigns vermieden[217]. Die URS soll in den sich anschließenden Kapiteln genutzt werden, um die Frage zu untersuchen, ob die virtuelle Kupplung geeignet ist, die betriebliche Multikuppelbarkeit im SPNV zu etablieren. Fällt die Einschätzung positiv aus, können darauf aufbauend die drei nächsten Entwicklungsschritte durchgeführt werden.

[214] Vgl. Knauber (2006), Folie 2.
[215] Vgl. Lemmer (2009), S. 28.
[216] Vgl. ebd., S. 28f.
[217] Vgl. Harhurin, Hiebenthal (2011), S. 25.

Zur Erarbeitung der URS werden zunächst das Wirkprinzip und die Modulbestandteile der virtuellen Kupplung beschrieben (Abschnitt 4.1) sowie vergleichbare Anwendungs- und Forschungsbeispiele vorgestellt (Abschnitt 4.2). Im Anschluss folgen Anforderungen an den Sicherheitsabstand zwischen den Fahrzeugen (Abschnitt 4.3), an das Kommunikationskonzept (Abschnitt 4.4), Anforderungen aus der betrieblichen Umsetzung (Abschnitt 4.5) sowie Anforderungen an die Schnittstellen und notwendige fahrzeugseitige (Abschnitt 4.6) und infrastrukturelle Anpassungen (Abschnitt 4.7). Der Abschnitt schließt mit einem Exkurs zu virtuellen Zugverbänden mit mehr als zwei Fahrzeugeinheiten (Abschnitt 4.8) und einer Zusammenfassung, welche die URS der virtuellen Kupplung enthält (Abschnitt 4.9).

4.1 Wirkprinzip und Modulbestandteile

Die virtuelle Kupplung von Triebfahrzeugen soll die bisherige, konventionelle Kupplung ersetzen. Sie basiert auf dem Prinzip, dass das vordere Fahrzeug, der Master, von einem Triebfahrzeugführer gesteuert wird, während das hintere Fahrzeug, der Slave, fahrerlos, automatisiert dem Master folgt, ohne das zwischen ihnen eine physische Verbindung besteht.

Das Konzept der virtuellen Kupplung basiert damit im Kern auf zwei Merkmalen: erstens, der Erhöhung des Automatisierungsgrades im Fahrbetrieb (berührungslos) sowie zweitens, der drahtlose Übertragung der dafür notwendigen Informationen (vgl. Abbildung 4-2).

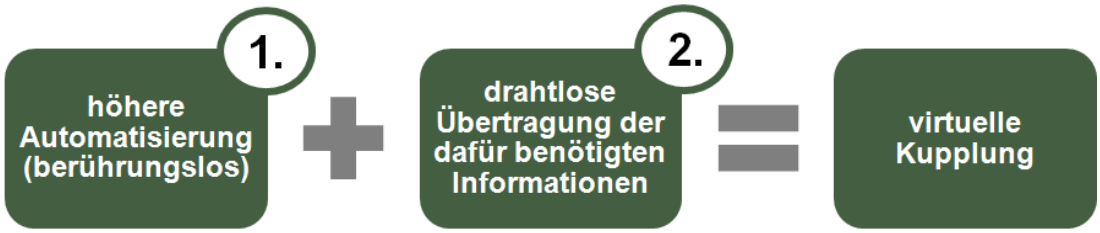


Abbildung 4-2 Kernmerkmale der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Das Modul „Virtuelle Kupplung“ ermöglicht ein kooperatives Fahren zweier Triebfahrzeuge: Die Fahrzeuge können durch einen automatisierten Informationsaustausch miteinander kommunizieren und agieren. Die Basis bildet die Integration von Fahrzeugsteuerung, Kommunikationsmodulen und Sensoren.

Das Modul „Virtuelle Kupplung“ setzt sich aus fünf Komponenten zusammen: zwei Übertragungseinheiten, einem Abstandssensor sowie einer Regelungs- und einer Diagnoseeinheit (vgl. Abbildung 4-3) und ist in jedem potenziell zu kuppelnden Triebfahrzeug zu installieren.

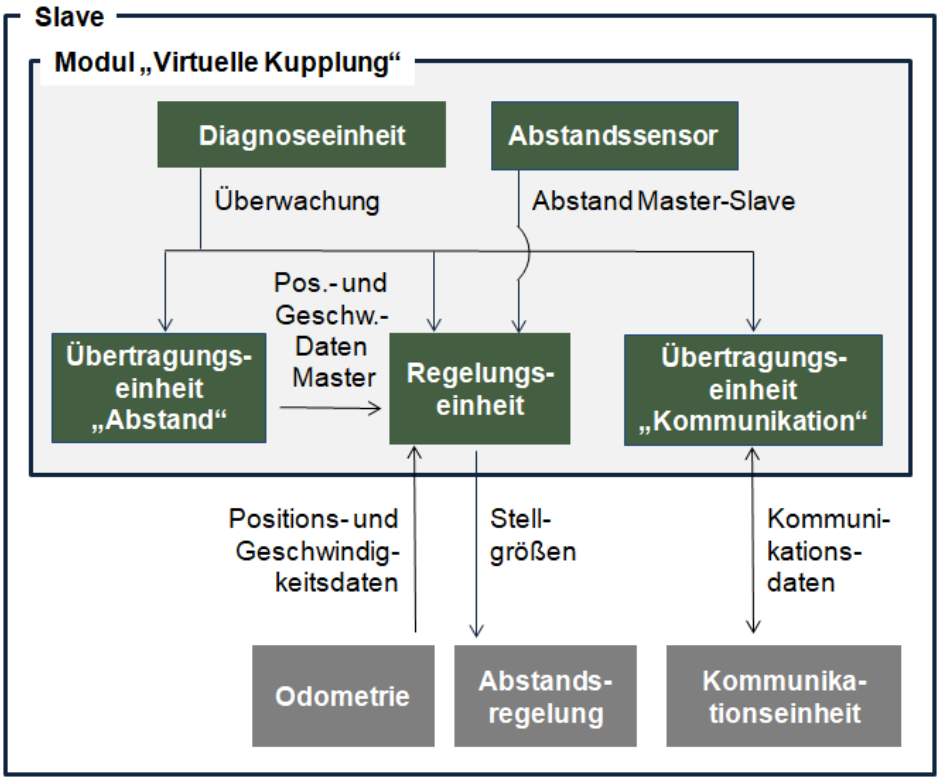


Abbildung 4-3 Modulbestandteile
Quelle: eigene Darstellung

Übertragungseinheit „Abstand“

Die Übertragungseinheit „Abstand“ empfängt auf dem Kommunikationskanal f_{sD}[218] vom Master die sicherheitsrelevanten Daten, wie zum Beispiel dessen Position und Geschwindigkeit und leitet diese an die Regelungseinheit weiter. Es wird davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitpunkt und in jeder infrastrukturellen Situation der Fahrt als virtueller Zugverband, fahrzeugseitig eine zuverlässige und hochgenaue Eigenlokalisierung gewährleistet ist.

Regelungseinheit

Die Regelungseinheit bildet die Grundlage für die automatische Fahr- und Bremssteuerung. Sie berechnet auf Basis der vom Slave und Master bereitgestellten Informationen zu deren Positionen und Geschwindigkeiten und anhand des

[218] Ergänzende Informationen im Abschnitt 4.4.

Algorithmus zur Bestimmung des Sicherheitsabstandes (vgl. Abschnitt 4.3) die notwendige Änderung von Zug- oder Bremskraft. Die Steuerungskommandos zur Umsetzung der notwendigen Änderung sendet die Regelungseinheit automatisch an die Abstandsregelung des Slaves, welche die erforderliche Regelung im Antriebs- und Bremssystem umsetzt (vgl. Abbildung 4-4).

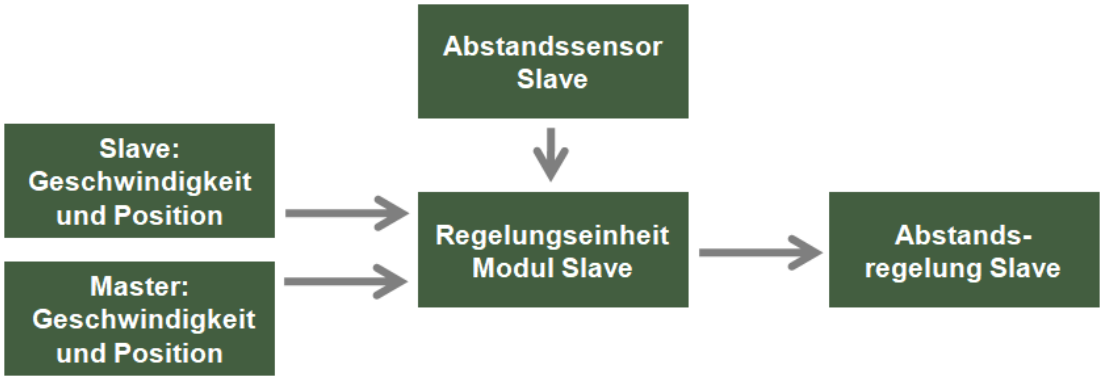


Abbildung 4-4 Wirkprinzip Regelungseinheit
Quelle: eigene Darstellung

Die Regelungseinheit ist so zu programmieren, dass sie selbsttätig in der Lage ist, alle Situationen zu bewältigen, die während des automatisch geregelten Folgens auftreten können.

Abstandssensor

Der Abstandssensor bestimmt redundant und unabhängig den Ist-Abstand zwischen Master und Slave und stellt diese Information der Regelungseinheit zur Verfügung. Er unterstützt damit die Überwachung des einzuhaltenden Sicherheitsabstandes. Für die sensorische Vorschau können zum Beispiel Radar- oder Lidar-Sensoren verwendet werden.

Übertragungseinheit „Kommunikation“

Die Übertragungseinheit „Kommunikation“ ermöglicht über eine separate, von der Übertragungseinheit „Abstand“ unabhängige, drahtlose Kommunikation den Austausch der weiteren Informationen, die für die Herstellung und den Betrieb eines virtuellen Zugverbandes benötigt werden (vgl. Abschnitt 4.4). Die über den Kommunikationskanal f_{wD} empfangenen und zu versendenden Daten werden über die Kommunikationseinheit des Slaves bereitgestellt beziehungsweise zu dieser weitergeleitet[219].

[219] Ergänzende Informationen im Abschnitt 4.4.

Diagnoseeinheit

Die Diagnoseeinheit überprüft fortlaufend die ordnungsgemäße und fehlerfreie Funktionsfähigkeit des Moduls und seiner Bestandteile. Das Modul ist damit in der Lage, selbsttätig zu ermitteln, ob es zuverlässig arbeitet und kann mögliche Fehlerursachen erkennen. Die Diagnosemeldungen werden entsprechend ihrer Relevanz für die Gefährdung des sicheren virtuellen Zugbetriebs hierarchisch geclusterte Einheiten „Zugbegleiter, Zugführer und Werkstatt“ zugeordnet, um eine abgestufte Bearbeitung der Meldungen zu ermöglichen.

„Futureproof“-Konzept

Zur Gewährleistung einer langanhaltenden stabilen Anwendbarkeit des Moduls, auch bei nachträglicher Funktionsausweitung oder neuen Sicherheitsanforderungen, ist dessen Software als „Futureproof“-Konzept auszulegen. Diese Funktion ermöglicht es, dass spätere Funktions- und Leistungsänderungen von Systemen bereits in deren Konzeptions- und Konstruktionsphase berücksichtigt werden[220]. Die Software wird lern- und erweiterungsfähig gestaltet, sodass ab dem Zeitpunkt der Markteinführung eine Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität mit den zukünftigen Generationen einer virtuellen Kupplung möglich ist.

Die Steuerung von Traktion und Bremse von Master und Slave erfolgt dezentral in den jeweiligen Fahrzeugteilen. Gleiches gilt für all diejenigen Fahrzeugfunktionen, welche keiner Interaktion der Fahrzeuge bedürfen, wie zum Beispiel Übertragung der Bild-/Videoaufnahmen an die Leitstelle, Steuerung der Klimatisierung und Beleuchtung,

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt ausschließlich eine funktionale Betrachtung der technischen Aspekte. Notwendige In- und Output-Größen werden definiert. Der Prozess zur Generierung der Output-Größen wird als „Blackbox“ betrachtet. Es wird also nur der Nachrichtenaustausch an den identifizierten Systemgrenzen betrachtet. Erst zu einem späteren Zeitpunkt ist zu definieren, wie das Modul „Virtuelle Kupplung“ hinter seinen Schnittstellen agiert und wie die formulierten abstrakten Nachrichten in konkrete Telegramme überführt werden können.[221] Beide Aufgaben

[220] Vgl. Everding, Fürstenau (2015), S. 60.
[221] Vgl. Harhurin, Hiebenthal (2011), S. 23.

sind jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit, sondern Gegenstand weiterer Forschungsaktivitäten.

Mit dem Ziel, aus bereits vorhandenen Erfahrungen Erkenntnisse zur generellen technischen Umsetzbarkeit, zum notwendigen Anforderungsprofil sowie zu sonstigen erfolgskritischen Rahmenbedingungen ableiten zu können, werden im nächsten Abschnitt vergleichbare Anwendungs- und Forschungsbeispiele vorgestellt.

4.2 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele

Grundsätzlich existiert bereits eine Vielzahl an Praxisbeispielen und Forschungsaktivitäten, auf welche die zwei oben genannten Kernmerkmale der virtuellen Kupplung zutreffen. Angefangen bei Autopiloten in Schiffen[222] und Verkehrsflugzeugen, über ferngesteuerte Transportsysteme und Serviceroboter bei der Polizei und beim Militär[223] bis hin zu automatischen U-Bahn-Systemen und autonom fahrenden Transporteinheiten im Straßenverkehr.

Aufgrund der in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen, wird nachfolgend jedoch ausschließlich auf vergleichbare Beispiele aus dem Schienen- und Straßenverkehr fokussiert, welche in Abbildung 4-5 zusammengefasst sind.

[222] Vgl. Jahn (2016), Folie 18 ff.
[223] Vgl. Wagner (2017), S. 13.

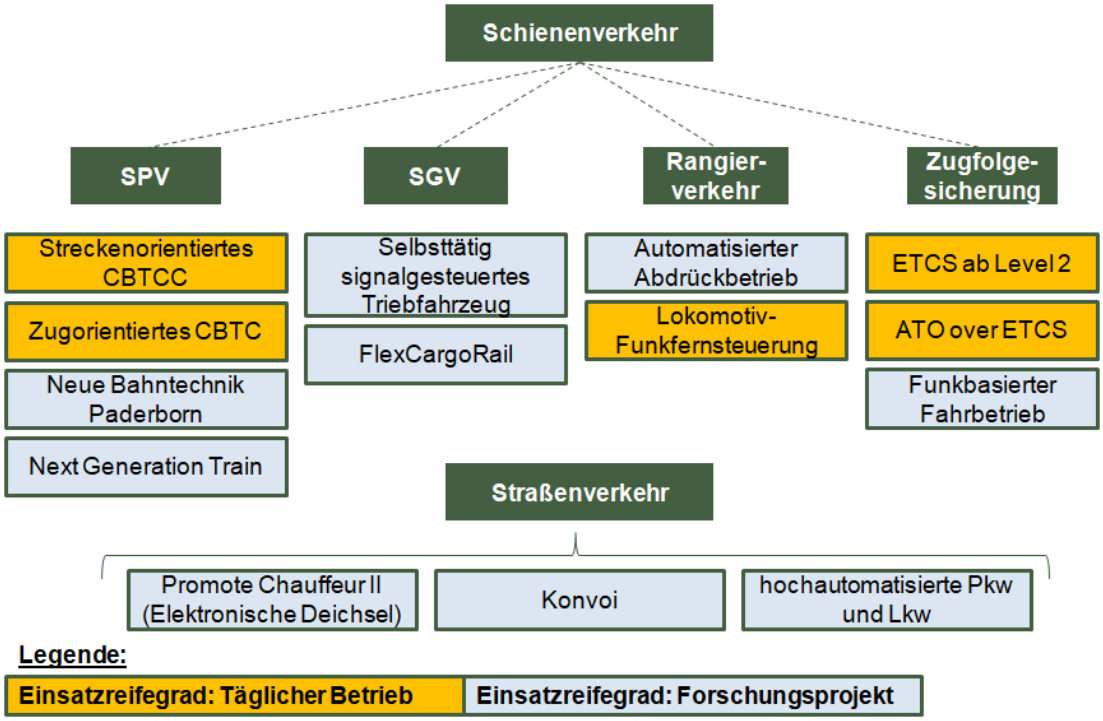


Abbildung 4-5 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele im Schienen- und Straßenverkehr
Quelle: eigene Darstellung

Die Untersuchung erfolgt anhand der Fragestellungen:

- Was ist das Anwendungsgebiet? Gibt es spezielle Rahmenbedingungen für den Einsatz?
- Wie hoch ist der Einsatzreifegrad (Forschung, Erprobungsträger, täglicher Betrieb)?
- Wie wird die Fahrberechtigung erteilt?
- Wie wird die betriebliche Situation überwacht?

Die Tabelle 4-1 und die Tabelle 4-2 fassen die Ergebnisse zusammen. Detaillierte Ausführungen können dem Anhang 2 entnommen werden.

Tabelle 4-1 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele im Schienenverkehr
Quelle: eigene Darstellung

Praxis-/ Forschungs-beispiel	Anwendungs-gebiet	Einsatzreifegrad	Fahrberechtigung (Fahrb.)	Überwachung der betrieblichen Situation
Schiene **a) Schienenpersonenverkehr**				
Fahrerlose Stadtbahnsysteme (Strecken-orientiertes CBTC)	• Stadtbahnsystem → BOStraB-Umgebung	• täglicher Betrieb → erprobte Technik	• streckenseitiger Prozessor erhält Informationen von Fahrzeugen und zum Netzzustand und erteilt Fahrb.	• fahrzeugseitige Geschwindigkeits-überwachung und im Gleis verlegte Signalleitung
Fahrerlose Stadtbahnsysteme (Zugorientiertes CBTC)	• Stadtbahnsystem → BOStraB-Umgebung	• täglicher Betrieb → erprobte Technik	• Fahrzeug erhält Fahrb. vom ATS und erweitert mittels Informa-tionen über andere Fahr-zeugpositionen und Strecke	• Steuerungsinfra-struktur überwacht Streckenbelegung
Neue Bahntechnik Paderborn	• neues, eigenständiges System → Inselbetrieb	• Forschungs-projekt • technische Realisierbarkeit auf Versuchs-strecke nachge-wiesen • keine Realisie-rung am Markt	• Fahren in Abhängigkeit anderer Konvoi-fahrzeuge • eigenständige Erteilung der Fahrb. • autonomes Fahren	• fahrzeugseitig • Streckenrechner • Sensorik zur Umfelderkennung
Next Generation Train (NGT)	• Vollbahnnetz	• Forschungs-projekt	• Fahrzeuge verkehren im flexiblen Blockabstand	• fahrzeugseitig • Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation
b) Schienengüterverkehr				
Selbsttätig signalgesteuertes Triebfahrzeug (SST)	• Werksverkehr/ Inselbetrieb	• Testbetrieb von 1994 bis 1996	• autonome Fahrzeuge • „umgedrehtes Be-triebsverfahren“: Fzg. halten automatisch am Signal	• EUROLOOP-System im Gleis und Fahrzeug • Fahrdienstleiter
Verbundprojekt „FlexCargoRail“	• Gleisanschluss / letzte Meile	• Forschungs-projekt	• manuelle Funk-fernsteuerung	• optische Überwachung
c) Rangierverkehr				
Automatisierter Abdrückbetrieb	• Rangierbahnhof	• Pilotversuche Anfang 2000er, sowie seit 2017	• Lokfunk-Fern-steuerungs-rechner	• fahrzeugseitig • Lokfunk-Fern-steuerungs-rechner
Lokomotiv-Funkfernsteuerung	• Rangierbahnhof	• täglicher Betrieb	• manuelle Funk-fernsteuerung	• optische Überwachung

Tabelle 4-2 Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele bei Verfahren zur Zugfolgesicherung und im Straßenverkehr
Quelle: eigene Darstellung

Praxis-/ Forschungs-beispiel	Anwendungs-gebiet	Einsatzreifegrad	Fahrberechtigung (Fahrb.)	Überwachung der betrieblichen Situation
Schiene **d) Funkbasierte Verfahren zur Zugfolgesicherung**				
ETCS, ab Level 2	• keine Einschränkungen	• entwickelt und zugelassen • Umsetzung europäisch gefordert, teilweise erfolgt	• Streckenzentrale (RBC)	• Eurobalisen • Eurocap
ATO over ETCS	• mit ETCS ausgerüstete Strecke	• Realisierung ab 2018	• ATS	• ATS
Funkbasierter Fahrbetrieb	• keine Einschränkungen	• Pilotversuche zur Expo 2000	• FFB-Zentrale	• FFB-Zentrale • fahrzeugseitig
Straße				
Promote Chauffeur II (Elektronische Deichsel)	• keine Einschränkungen	• Forschungs-projekt	• hinterer Lkw folgt Vorderem auf Basis der Infrarot-Bildverarbeitung	• Infrarot-Bildverarbeitung • Sensordaten (Geschwindigkeit, Beschleunigung)
KONVOI	• keine Einschränkungen	• Forschungs-projekt	• hinterer Lkw folgt Vorderem auf Basis Fahrzeug-Fahrzeug- sowie Fahrzeug-Strecke-Kommu-nikation	• Short distance Controller • Fahrzeug-Fahrzeug- sowie Fahrzeug-Strecke-Kommu-nikation
hochautomatisierte Pkw und Lkw	• Voraussichtlich zunächst Depot und Bus Rapid Transit Systeme	• Testläufe	• hochautomati-sierte Fahrzeuge	• Sensoren und IT-Dienste zur Umfelderkennung

Deutlich wird, dass zur Erhöhung einer Automatisierung des Fahrbetriebs die drahtlose Übertragung der dafür notwendigen Informationen sowohl im Schienen- als auch im Straßenverkehr bereits mehrfach untersucht wurde. Bei einzelnen Anwendungen hat sich der automatisierte Fahrbetrieb bereits in der täglichen Anwendung bewährt. Die Beispiele unterstützen daher die These, dass von einer prinzipiellen technischen Umsetzbarkeit automatischer Systeme unter Anwendung einer funkbasierten Datenkommunikation ausgegangen werden kann, aber bislang Umsetzungsbarrieren existieren, die einen routinemäßigen Einsatz weitgehend verhinderten – Insellösungen ausgenommen.

Die vorhandenen Erfahrungen und Erkenntnisse können nutzbar gemacht werden, indem sie auf die virtuelle Kupplung übertragen und für die Einschätzung ihrer technischen Umsetzbarkeit berücksichtigt werden. Im Einzelnen können zu den oben

formulierten Fragestellungen folgende Aussagen sowie weitere Auswertungen getroffen werden.

Anwendungsgebiet und Einsatzreifegrad

Wenngleich prinzipiell davon ausgegangen wird, dass im Straßenverkehr zunächst nur abgegrenzte Anwendungsfälle umgesetzt werden, zielen die Forschungsaktivitäten vorwiegend auf die Integration des automatisierten Verkehrs im allgemeinen Straßenraum ab. Die technologische Umsetzung des automatisierten Fahrens ist im Straßenverkehr dabei bereits weit vorangeschritten. Jedoch sind für die Markteinführung und -etablierung noch verschiedene rechtliche Fragestellungen verbindlich zu klären (zum Beispiel Haftungsfragen, Anpassungen relevanter Vorschriften). Erste rechtliche Festlegungen liegen mit dem Beschluss des Bundesrates vom Mai 2017 vor[224]. Nähere Informationen hierzu in Abschnitt 7.4.

Die bisherigen Beispielanwendungen für den Schienenverkehr wurden hingegen ausschließlich für abgeschlossene Verkehrssysteme entwickelt oder untersucht (Stadtbahnsystem nach BOStrab, Rangierbahnhof, Werksverkehr). Umgesetzte Anwendungen im Schienenpersonenverkehr für den Vollbahnbereich nach EBO existieren bisher nicht.

Vorgehen zur Erteilung der Fahrberechtigung

Die Fahrberechtigung wird entweder zentral streckenseitig oder dezentral, in den jeweiligen Zügen erteilt oder sie ergibt sich aus der Regelung, sich bei der Fernsteuerung des Fahrzeugs in dessen Sichtweite befinden zu müssen.

Vorgehen zur Überwachung der betrieblichen Situation

Je nachdem, auf welchem Weg das Fahrzeug seine Fahrberechtigung erhält, wird die Zugfahrt entweder manuell (per Sichtkontakt) oder über infrastruktur- und/oder fahrzeugseitige Überwachungs-/ Steuerungsanlagen überwacht.

Weitere Auswertungsergebnisse

Die Beispiele für funkbasierte Verfahren zur Zugfolgesicherung zeigen, dass Ansätze für eine virtuelle Kupplung von Triebfahrzeugen an verschiedenen Stellen bereits vorgedacht sind. Die ausbleibende Umsetzung der Projekte und Lösungen am Markt ist bisher insbesondere auf eine unzureichende Wirtschaftlichkeit sowie auf

[224] Vgl. BMVI (2017).

ungeklärte rechtliche Fragestellungen (zum Beispiel Haftung, Zulassung) zurückzuführen. Zusammengefasst sollten bei der Entwicklung der virtuellen Kupplung folgende Elemente aufgegriffen werden:

- Verwendung eines Funksystems für die drahtlose Übertragung der notwendigen Informationen,
- Überwachung der Zugfahrt durch eine infrastrukturseitige Steuerungseinrichtung (Dispatcher/Leitstelle), ergänzt um eine fahrzeugseitige Überwachung,
- Gewährleistung einer Marktfähigkeit (Wirtschaftlichkeit, rechtliche Rahmenbedingungen) und
- Übertragung und Weiterentwicklung der aktuellen Diskussionen zu den rechtlichen Fragestellungen zur Automatisierung im Straßenverkehr.

Die nachfolgenden Abschnitte 4.3 bis 4.7 detaillieren die im Abschnitt 4.1 (Wirkprinzip und Modulbestandteile) erläuterten Festlegungen und berücksichtigen die in diesem Kapitel identifizierten Merkmale. Sie haben zum Ziel, ein funktionales Anforderungsprofil zu entwickeln sowie notwendige betriebliche Rahmenbedingungen abzuleiten (vgl. Abschnitt 4.9).

4.3 Anforderungen an den Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave

Während der Fahrt als virtueller Zugverband folgt der Slave automatisiert dem Master in einem geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand, welcher einen sicheren Eisenbahntrieb gewährleistet. Für die vorliegende Fragestellung wird es von der Autorin als zielführend bewertet, zur Abschätzung des Sicherheitsabstandes anhand der potenziellen Aufprallstärke zu argumentieren: Diese verhält sich proportional zum Quadrat der Differenzgeschwindigkeit zwischen Master und Slave[225]. Abbildung 4-6 zeigt ihren prinzipiellen Verlauf in Abhängigkeit zum Fahrzeugabstand.

[225] Vgl. Bock (2001), S. 21.

Abbildung 4-6 Prinzipdarstellung Aufprallstärke zwischen Master und Slave in Abhängigkeit ihres Abstandes zueinander
Quelle: Bock (2001), S. 21

Deutlich wird, dass grundsätzlich zwei Ansätze zur Festlegung des Sicherheitsabstandes s existieren: $s > s_{min}$ oder $s < s_p$. Im ersten Fall findet bei einer Notbremsung kein Aufprall des Slaves auf den Master statt. Im zweiten Fall ist der Abstand zwischen den Fahrzeugen so klein, dass sich nur eine geringe Differenzgeschwindigkeit entwickeln kann, die zu einem tolerierbaren Kontakt der Fahrzeuge führt.[226] Die Komfortansprüche der Fahrgäste an ein gleichmäßiges Fahrverhalten sind hierbei zu berücksichtigen. Zwischen s_{min} und s_p steigt die Aufprallstärke auf ein Maximum an und fällt dann wieder ab. Bei der Festlegung des einzuhaltenden Sicherheitsabstands muss also abgewogen werden zwischen einem sehr großen Abstand, der einer hohen Streckenkapazität bedarf und einem sehr geringen Abstand, welcher eine hohe Rechenleistung benötigt. Auf Basis einer Literaturrecherche wird in *Bock (2001)* empfohlen, für den Betrieb eines Platoons, innerhalb des Platoons $s < s_p$ zu wählen[227]. Da der Betrieb eines Platoons mit dem Betrieb des virtuellen Zugverbandes vergleichbar ist und aufgrund der in Abschnitt 2.1 erwähnten hohen infrastrukturellen Auslastung, wird hier $s < s_p$ als sinnvoll eingeschätzt.

[226] Vgl. Bock (2001), S. 21.
[227] Vgl. ebd., S. 21.

Für den Betrieb des virtuellen Zugverbandes können zudem folgende Annahmen getroffen werden[228]:

- Master und Slave weisen das gleiche Beschleunigungsvermögen und die gleiche Bremsverzögerung auf oder berücksichtigen Unterschiede im Rahmen ihrer Regelungsstrategie, sodass sich diese virtuell gleichen ($b_{Master} = b_{Slave}$) und
- Geschwindigkeiten von Master und Slave sind während der Beharrungsfahrt identisch und während der Beschleunigungs- sowie Verzögerungsphase in Folge der Reaktionsträgheit des Systems nur marginal unterschiedlich ($v_{Master} \cong v_{Slave}$).

Der Betrieb des virtuellen Zugverbandes kann unter diesen Annahmen in das so genannte „Fahren im Nullabstand“ übergehen[229]. Der Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave ist dann nur noch vom Sicherheitszuschlag abhängig. Dieser muss den Weg abbilden, welchen das hintere Fahrzeug zurücklegt, während es auf eine Aktion des vorausfahrenden Fahrzeugs reagiert. Diese Reaktionsverzögerung, auch Latenz genannt, vom Versand der Information zu Position und Geschwindigkeit vom Master zum Slave bis zur Umsetzung dessen notwendiger Reaktion variiert entsprechend der jeweiligen betrieblichen Rahmenbedingungen und den Prozessen innerhalb des Moduls „Virtuelle Kupplung“. Der Sicherheitsabstand ergibt sich daher aus den in Abbildung 4-7 dargestellten Parametern, welche nachfolgend erläutert werden.

[228] Vergleichbare Annahmen werden für die Steuerung von sogenannten Rendezvousmanövern zwischen fahrenden Zügen auf der freien Strecke getroffen (vgl. Stebens (2001), S. 15).
[229] Vgl. Stebens (2001), S. 15.

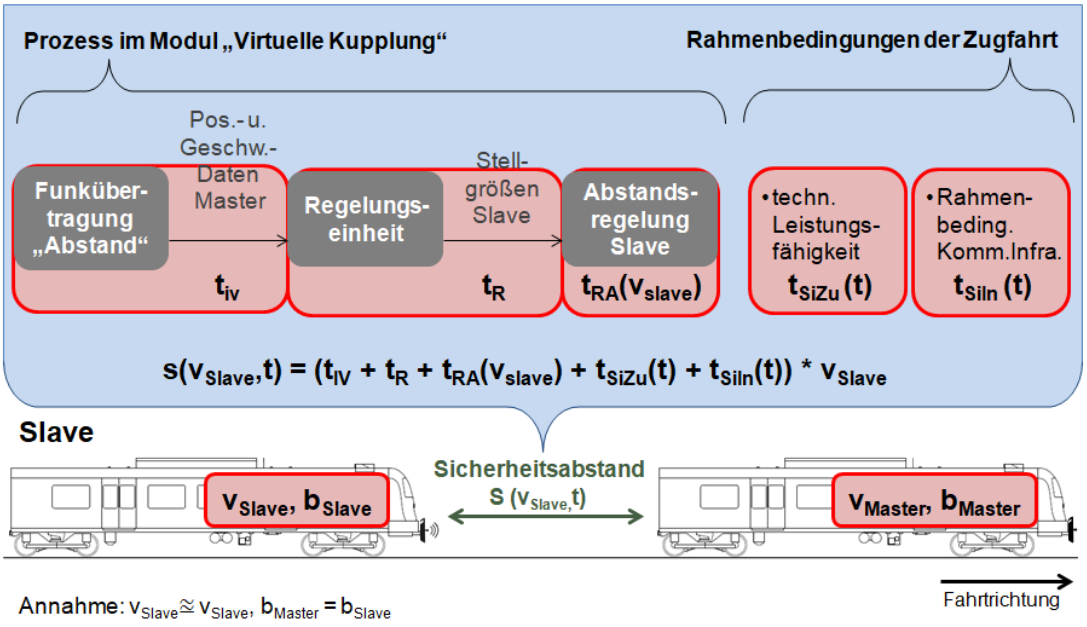


Abbildung 4-7 Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave
Quelle: eigene Darstellung

Informationsverarbeitungszeit Slave t_{IV}

Die Informationsverarbeitungszeit ist die Zeit, die der Slave benötigt, um die Geschwindigkeit und Position des Masters in der Modulkomponente „Übertragungs-einheit Abstand“ zu empfangen und an die Regelungseinheit des Moduls zu übertragen.

Die Zeit, welche für die Übertragung von Geschwindigkeit und Position benötigt wird und damit das Alter der Information widerspiegelt, kann über einen vom Master gesetzten und vom Slave ausgewerteten Zeitstempel ermittelt werden. Die Zeit für die Übertragung im Bussystem des Slaves ist abhängig von dessen Leistungs-fähigkeit.

Regelungszeit Slave t_R

Die Regelungszeit ist die Zeit, welche die Regelungseinheit des Moduls benötigt, um zu berechnen, welche Änderung der Zug- oder Bremskraft notwendig ist, um den Sicherheitsabstand einzuhalten sowie um diese Änderung an die Abstandsregelung des Slaves weiterzuleiten.

Die Regelungszeit ist abhängig von der Leistungsfähigkeit der Regelungseinheit des Moduls und des Bussystems des Slaves.

Reaktionszeit der Abstandsregelung des Slaves $t_{RA}(v_{slave})$

Die Reaktionszeit der Abstandsregelung des Slaves ist die Zeit, die dessen Abstandsregelung benötigt, um die von der Regelungseinheit erhaltene Information über die notwendige Änderung der Zug- oder Bremskraft umzusetzen. Der Slave wird beschleunigt (Zugkraftaufbau) oder gebremst (Bremskraftaufbau). Das Traktions- und das Bremsvermögen des Slaves sowie dessen Geschwindigkeit sind hier wesentliche Einflussfaktoren.

Sicherheitszuschlag Zugverband $t_{SiZu}(t)$

Der Sicherheitszuschlag Zugverband spiegelt die Trägheit des virtuellen Zugverbandes wider und ist zugverbandspezifisch festzulegen. Unterschiedliche Beladungszustände von Master und Slave sind fahrzeugseitig über lastabhängige Bremsen auszugleichen.

Der Sicherheitszuschlag Zugverband ist abhängig von der Motorisierung: Verfügt der Slave zum Beispiel über ein deutlich schwächeres Bremsvermögen, muss der Sicherheitsabstand im Gefälle erhöht werden. Unterschiede des Brems- und Beschleunigungsvermögens zwischen Master und Slave sind abzubilden[230] und auszugleichen, wobei der stärkere Zugteil seine Leistungsfähigkeit an den schwächeren Zugteil anpassen muss. Die Informationen zum Brems- und Beschleunigungsvermögen sind im Rahmen der Zugtaufe auszutauschen und in einen streckenverlaufsabhängigen Sicherheitszuschlag zu überführen. Die Informationen zum Streckenverlauf sollten immer einige Kilometer im Voraus von der Betriebszentrale des EVU zur Verfügung gestellt werden, um etwaige Übertragungsunterbrechungen zu überbrücken (Datenvorhaltung).

Der Sicherheitszuschlag Zugverband ist aufgrund der während der Fahrt variierenden Streckencharakteristika, zeitabhängig, aber im Vorfeld der Fahrt bestimmbar.

Sicherheitszuschlag Infrastruktur $t_{SiIn}(t)$

Der Sicherheitszuschlag Infrastruktur bildet die Rahmenbedingungen der Kommunikationskanäle ab, welche von Master und Slave für die Fahrt des virtuellen Zugverbandes genutzt werden. So ist der Sicherheitszuschlag beispielsweise zu erhöhen, wenn während der Fahrt die Güte der Informationsübertragung (QoS) sinkt,

[230] Vgl. Bock (2001), S. 22.

welche für die sicherheitsrelevanten Daten relevant ist. Vorstellbar sind zum Beispiel Unterschiede der QoS, je nachdem ob sich der Zugverband auf freier Strecke, im Wald, Tunnel oder unter Brücken befindet.

Die notwendigen Informationen können zum Teil im Vorfeld vom Netzbetreiber abgerufen werden, sind jedoch während der Fahrt per Sensor hinsichtlich tagesaktueller Abweichungen zu überprüfen. Da sich die Rahmenbedingungen der Kommunikationsinfrastruktur während der Fahrt ändern können, ist der Sicherheitszuschlag Infrastruktur zeitabhängig.

Vorgehen zur quantitativen Abschätzung des Sicherheitsabstands

Deutlich wurde, dass der Sicherheitsabstand während der Fahrt des virtuellen Zugverbandes je nach Geschwindigkeit des Slaves und in Abhängigkeit der fahrzeugtechnischen, infrastrukturellen und betrieblichen Rahmenbedingungen variiert. Die zu berücksichtigenden Parameter sind teilweise im Vorfeld der Zugfahrt bekannt und teilweise erst während dieser bestimmbar. Für einige Parameter sind separate Berechnungsalgorithmen zu entwickeln.

Zur Erfüllung der oben getroffenen Zielsetzung $s < s_p$, gilt unter Verwendung der soeben vorgestellten Parameter daher,

$$s(v_{Slave},t) = (t_{IV} + t_R + t_{RA}(v_{slave}) + t_{SiZu}(t) + t_{SiIn}(t)) * v_{Slave} < s_p$$

beziehungsweise

$$t_{IV} + t_R + t_{RA}(v_{slave}) + t_{SiZu}(t) + t_{SiIn}(t) < s_p / v_{Slave}$$

Wie oben dargestellt, stellt s_p den Abstand dar, welcher bei einem Aufprall zwischen den Fahrzeugen nur so geringe Differenzgeschwindigkeiten entwickeln lässt, die zu einem tolerierbaren, den Komfortansprüchen der Fahrgäste entsprechenden, Kontakt der Fahrzeuge führt. Im nächsten Schritt, der den Rahmen dieser Arbeit jedoch übersteigt, ist s_p mittels Analyse verschiedener Aufprallszenarien zu bestimmen. Ist s_p bekannt, kann in Abhängigkeit von den gewünschten v_{slave} abgeleitet werden, welche Zeit maximal für die Summe aus t_{IV}, t_R, $t_{RA}(v_{slave})$, $t_{SiZu}(t)$ und $t_{SiIn}(t)$ zur Verfügung steht und daher von den relevanten Parametern einzuhalten ist.

Um dies zu ermöglichen, sind entsprechende Anforderungen für die einzelnen Parameter abzuleiten. Entscheidende Stellhebel sind hierbei

- die Leistungsfähigkeit der Regelungseinheit des Moduls „Virtuelle Kupplung“,
- das Bussystem des Slaves,
- das Traktions- und Bremsvermögen von Master und Slave,
- der Streckenverlauf und
- die Leistungsfähigkeit und Dienstgüte der Kommunikationskanäle, welche Master und Slave während der Fahrt als virtueller Zugverband nutzen.

Es ist weiterhin zu prüfen und sicherzustellen, dass sich keine Einschränkungen auf die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ergeben, welche die Einhaltung des Fahrplans gefährden. Zudem muss das energieeffiziente Fahren auch weiterhin möglich sein.

Im Ergebnis der hierzu notwendigen Forschung entstehen Parameterkombinationen, welche vom virtuellen Zugverband zur Bestimmung des einzuhaltenden Sicherheitsabstandes genutzt werden können.

Regelkreis des Slaves zum Einhalten des Sicherheitsabstands

Das Anpassen der Zug- oder Bremskraft zum Einhalten beziehungsweise zum Erreichen des Sicherheitsabstandes erfolgt ausschließlich automatisiert, als Reaktion der automatisierten Fahr- und Bremssteuerung (Abstandsregelung) des Slaves und anhand des nachfolgend erläuterten und in Abbildung 4-8 dargestellten Regelkreises. Der Master nimmt während der Fahrt keine Anpassungen zur Einhaltung des Sicherheitsabstandes vor, begrenzt jedoch gegebenenfalls entsprechend der Abstimmung im Rahmen der Zugtaufe seine eigene Fahrdynamik.

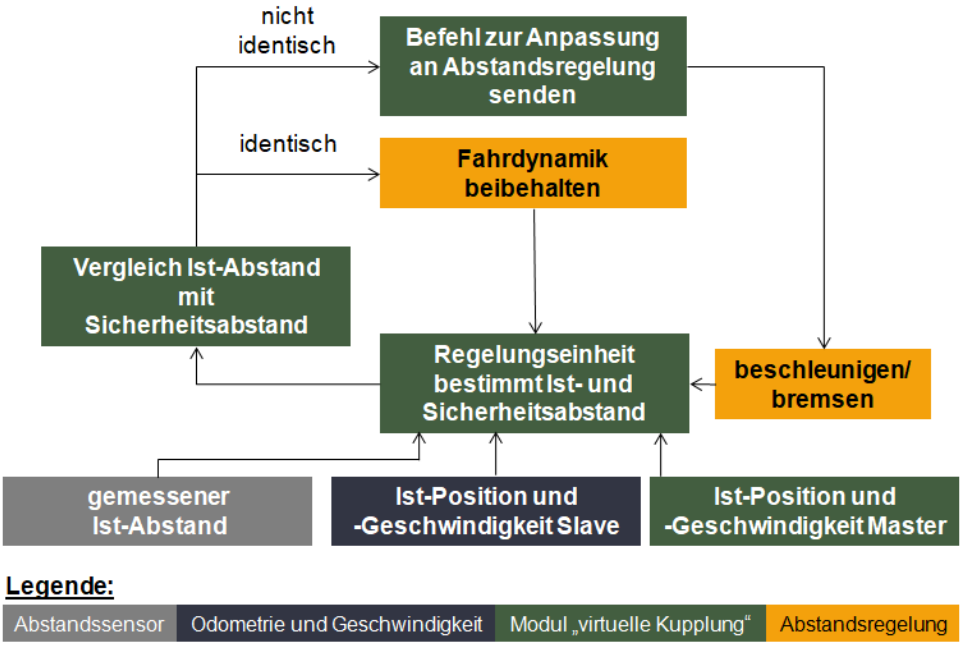


Abbildung 4-8 Regelkreis Sicherheitsabstand
Quelle: eigene Darstellung

Die Regelungseinheit des Moduls bestimmt anhand der ihr bereitgestellten Informationen zur Ist-Position und -Geschwindigkeit von Master und Slave kontinuierlich den aktuellen Ist-Abstand. Dabei wird vorausgesetzt, dass zu jedem Zeitpunkt und in jeder infrastrukturellen Situation der Fahrt als virtueller Zugverband, fahrzeugseitig eine zuverlässige und hochgenaue Eigenlokalisierung gewährleistet ist. Verwiesen werden kann hier zum Beispiel auf die Untersuchungen zur Eignung satellitenbasierter Ortung[231] oder Untersuchungen im Rahmen des DLR-Projektes POSITRON[232].

Zur Kontrolle des berechneten Ist-Abstandes wird dieser Wert mit dem vom Abstandssensor unabhängig bestimmtem Ist-Abstand verglichen. Weichen die Werte über einen geschwindigkeitsabhängigen kritischen Wert hinaus voneinander ab, werden die Messung und Berechnung erneut vorgenommen. Es bestehen damit keine Unsicherheiten bei der Bestimmung des Ist-Abstandes.

Zeitgleich bestimmt die Regelungseinheit den geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand. Ergibt der Vergleich von Ist- und Sicherheitsabstand eine Abweichung unterhalb des geschwindigkeitsabhängigen Grenzwertes, wird die Fahrt unverändert fortgesetzt. Ist die Abweichung höher, wird an die Abstandsregelung des Slaves ein Befehl zur Anpassung der Zug- oder Bremskraft gesendet und automatisiert

[231] Vgl. Manz (2017), S. 372 ff.
[232] Vgl. Gerlach (2008), Folie 6ff.

umgesetzt. Der Slave wird auf den Soll-Abstand beschleunigt beziehungsweise abgebremst. Dieser Ablauf wird zyklisch in engem Abstand wiederholt und gewährleistet damit eine ausreichend hohe Stabilität des Betriebs des virtuellen Zugverbandes.

4.4 Anforderungen an das Kommunikationskonzept

Um eine Abstimmung zwischen Master und Slave zu erreichen, ist insbesondere eine sichere und zuverlässige Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu garantieren. Mittels derer werden ausschließlich die Informationen und Befehle übertragen, welche zur Herstellung, für den Betrieb oder das Auflösen des virtuellen Zugverbandes zwingend benötigt werden. Auf diese Weise wird der Bedarf an benötigter Bandbreite reduziert. Es handelt sich einerseits um Informationen, die im konventionellen Zugverband über die Elektrokontaktkupplung ausgetauscht werden und andererseits um Informationen, die aus der Anforderung des automatisierten Folgens des Slaves oder aus der für den virtuellen Betrieb notwendigen Kommunikation und Zugriffsmöglichkeit resultieren.

Die zu übertragenden Informationen und Befehle sichern die Funktionalität von Master oder Slave (Wagenfunktion), die Funktionalität des virtuellen Zugverbandes oder einzelner Fahrzeugkomponenten und können unterschieden werden nach:

- sicherheitsrelevant **oder**
  nicht sicherheitsrelevant, aber grundsätzlich für die Herstellung und den Betrieb des virtuellen Zugverbandes notwendig,
- statisch, während der Zugfahrt gleichbleibend **oder**
  dynamisch, während der Zugfahrt verschieden,
- Übertragung vom Master zum Slave **oder**
  Übertragung vom Slave zum Master sowie
- Übertragung zyklisch in regelmäßigen Intervallen (Prozessdaten) **oder**
  auf Befehl des Slaves oder Masters (Messagedaten)[233].

Tabelle 4-3 fasst die Informationsströme zwischen Master und Slave zusammen.

[233] Vgl. Wolbert, Weiß (2016), S. 51.

Tabelle 4-3 Datenaustausch im virtuellen Zugverband
Quelle: eigene Darstellung

Information/Befehl	sicherheits-relevant		Übertragungs-richtung*		Ver-halten		Daten-art	
	ja	nein	Master → Slave	Slave → Master	statisch	dynamisch	Messaged.	Prozessd.
Daten für Zugtaufe (Traktions- und Brems-vermögen, Fahrtrichtung, Rollenverteilung Master/Slave im Zugverband, Länge Master, Bremsprobe)	x		x	(x)	x		x	
Bilden und Auflösen des Zugverbandes	x		x	(x)		x	x	
Ist-Geschwindigkeit und Ist-Position	x		x			x		x
seitenselektive Freigabe, Öffnen und Schließen der Türen des Slaves	x		x	(x)		x	x	
automatisiertes Folgen aktiv und umgesetzt	x			x		x		x
sicherheitsrelevante Diagnosedaten/ Fehlermeldungen des Slaves	x		(x)	x		x	x	
Notsprechfunk und Notbremsung durch Fahrgast	x		x	x		x	x	
„Restart" und Notaus	x		x			x	x	
Durchsagen des Triebfahrzeugführers		x	x			x	x	
Diagnosedaten/Fehlermeldungen weiterer für den Betrieb relevanter Fahrzeugsysteme		x		x		x		x

* (x) steht für eine notwendige Rückbestätigung der Information

Sichergestellt werden muss, dass das Kommunikationskonzept der virtuellen Kupplung in der Lage ist, die genannten Informationen und Befehle zwischen Master und Slave auszutauschen. Welche Anforderungen das Konzept hierbei insbesondere erfüllen muss, wird nachfolgend erarbeitet.

Zentral ist es, dass zwischen Master und Slave ein gemeinsamer virtueller Zugbus gebildet wird, welcher die verschiedenen Zugteile verbindet und eine durchlässige, universell kompatible Datenkommunikation ermöglicht. Der Zugbus muss mit dem jeweiligen Fahrzeugbus kommunizieren können, um die vom Zugbus empfangenen Daten und Befehle umzusetzen oder um über diesen Informationen an das andere Fahrzeug zu übermitteln. Zur Bildung eines gemeinsamen Zugbusses sind unter anderem die physischen und logischen Übertragungsschichten sowie die Schnittstellen (vgl. Abschnitt 4.6) herstellerunabhängig zu definieren sowie der

Handshake-Betrieb[234] auszugestalten. Hierbei ist auch zu definieren, wie ein Fahrzeug mit Datentelegrammen umgehen soll, welche es nicht kennt.

Für die Übertragung der Informationen wird eine „Over The Air (OTA)" Kommunikation mit zwei voneinander unabhängigen zugverbandspezifischen Kommunikationskanälen verwendet[235]:

- f_{sD}: zugverbandspezifischer Kommunikationskanal für die Übermittlung der sicherheitsrelevanten Informationen und Befehle (vgl. Tabelle 4-3) sowie
- f_{wD}: zugverbandspezifischer Kommunikationskanal für den Austausch der weiteren für den virtuellen Zugverband relevanten Informationen und Befehle (vgl. Tabelle 4-3).

Die Verwendung von zugverbandspezifischen Kommunikationskanälen verhindert Verwechslungen mit Signalen von in der Nähe befindlichen anderen virtuell gekuppelten Zugverbänden. Beim Management der Kommunikationskanäle ist zu beachten, dass diese den Triebfahrzeugführern im Vorfeld einer virtuellen Zugfahrt bekannt gegeben werden, damit Master und Slave im Rahmen der Zugtaufe miteinander vernetzt werden können. Der Triebfahrzeugführer löst die Aktivierung der Kommunikationskanäle manuell aus und gibt im Rahmen dessen auch die Zug-ID der virtuellen Zugfahrt ein. Bereitgestellt werden die Daten von der EVU-Leitstelle. Das doppelte Belegen von Kommunikationskanälen wird so ausgeschlossen. Vergleichbar mit dem Management einer GSM-R-basierten Kommunikation ist es vorstellbar, dass das EVU beim Betreiber des Netzes SIM-Karten für jedes seiner Triebfahrzeuge bestellt. Mit diesen kann das Triebfahrzeug heute im GSM-R-Netz angemeldet und identifiziert werden sowie das GSM-R-Netz nutzen.[236]

Der Einsatz drahtloser Kommunikationsnetze bedarf im Vorfeld einer genauen Analyse von möglichen Störungen und Einschränkungen[237]. Da die Übertragungsgeschwindigkeiten hier häufig variieren und die Übertragungsqualität gewissen Schwankungen unterliegt, ist es erforderlich, die Dienstgüte der Verbindung

[234] Im Rahmen des Handshakes werden zwischen zwei Instanzen nach der Authentifizierung die Parameter der Datenübertragung abgestimmt und im Ergebnis eine verlustfreie Datenübertragung aufgebaut.
[235] Die Trennung der Kommunikationskanäle nach sicherheits- und nicht sicherheitsrelevanten Daten folgt dem Grundsatz der Trennung von sicheren und nicht sicheren Funktionen, welche den Aufwand für die notwendige Zulassung reduziert (vgl. Retschy (2015), Folie 16).
[236] Vgl. DB Netz (2014b), S. 1.
[237] Vgl. Henke (2013), S. 45.

kontinuierlich zu überprüfen[238]. Die Dienstgüte oder auch „Quality of Service“ (QoS) ist die Gesamtheit der Qualitätsmerkmale und gibt Auskunft darüber, in welchem Ausmaß die Qualitätsanforderungen an die Datenübertragung und des zu verwendenden Funknetzes eingehalten werden[239]. Die Anforderungen ergeben sich aus den in Tabelle 4-3 dargestellten Informationsströmen im Kontext der verschiedenen betrieblichen Szenarien. Unterschieden werden kann zwischen der Übertragungsgüte und der Verkehrsgüte. Während die Verkehrsgüte vorrangig eine Aussage zur Vermittlungstechnik und zur Herstellung von Verbindungen trifft, befasst sich die Übertragungsgüte mit der eigentlichen Übertragung der Information[240]. Eine ausführliche Aufstellung von Kennzahlen zur Bewertung der QoS enthält zum Beispiel *BZKI (2017)*.

Tabelle 4-4 fasst die Qualitätsanforderungen an die Datenübertragung zusammen, welche für die virtuelle Kupplung als besonders wichtig eingeschätzt werden und vom zwischen Master und Slave einzurichtenden Kommunikationsnetzwerk erfüllt werden müssen. Während der Fahrt als virtueller Zugverband ist regelmäßig zu überprüfen, ob die vorab zu definierenden Parameterausprägungen und damit die QoS eingehalten werden.

[238] Vgl. Henke (2013), S. 45.
[239] Vgl. NFON (ohne Angabe).
[240] Vgl. NFON (ohne Angabe).

Tabelle 4-4 Merkmale der Quality of Service
Quelle: eigene Darstellung

Verkehrsgüte	Übertragungsgüte
• bidirektionale Kommunikation • vollständige Funkausleuchtung auf dem deutschen SPNV-Streckennetz (hohe räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der Funknetze) • mit Kuppelprozess vereinbare Verbindungsaufbauzeit und geringe Verbindungsaufbaufehlerrate • Reichweite entsprechend der maximalen Länge eines virtuellen Zugverbandes, unter Berücksichtigung von Kurvenradien • Nachweis Bahntauglichkeit (Anforderungen an Sicherheit und Verfügbarkeit) • Nachweis Security (vgl. Abschnitt 7.3) • Ausbaufähigkeit für derzeit noch nicht absehbare erhöhte Übertragungsanforderungen	• stabile Informationsübertragung/hohe Zuverlässigkeit (geringe Verbindungsabbruchrate) zwischen zwei sich bewegenden Fahrzeugen, auch bei Geschwindigkeiten bis zu 160 km/h und sich ändernden Abständen und auch bei verschiedenen witterungsbedingten Einflüssen im notwendigen Temperaturbereich • geringe Latenz und Jitter: minimale Kommunikationsverzögerungen (Echtzeitfähigkeit) • ausreichend große Bandbreite für notwendiges Übertragungsvolumen und -updateraten für f_{sD} und f_{wD} • Möglichkeit der Priorisierung von Datenpaketen in Abhängigkeit von deren Relevanz für den sicheren Zugbetrieb • sehr hohe Mean Time between Failure (MTBF) und sehr geringe Mean Time to Repair (MTTR); auch beim Wechsel der Funkzelle (Handover Erfolgsrate)

Seit Mitte der 1990er Jahre ist im Schienenverkehr für die funkbasierte Informationsübertragung das Global System for Mobile Communications-Railways (GSM-R) als Bahnstandard gesetzt[241]. Es handelt sich hierbei um einen für den Schienenverkehr erweiterten kommerziellen Mobilfunkstandard[242], welcher jedoch bereits heute vor allem in stark frequentierten Knotenpunkten an seine Leistungsgrenzen stößt[243]. Die Deutsche Bahn ertüchtigt daher ihr GSM-R-Netz, um dessen Qualität noch über Jahre zu gewährleisten[244]. Gleichzeitig wird jedoch angezweifelt, dass GSM-R nach 2030 angeboten werden wird[245] und auch die Mobilfunkanbieter haben sich lediglich dazu verpflichtet, GSM-R bis 2030 anzubieten[246].

Dass GSM-R für die Umsetzung der virtuellen Kupplung geeignet ist, ist daher fraglich. Außer der gerade beschriebenen Unsicherheit in Bezug auf den Betrieb des

[241] Vgl. Michler et al. (2016), S. 248f.
[242] Vgl. Sagmeister (2014), S. 174.
[243] Vgl. Michler et al. (2016), S. 248.
[244] Vgl. Rees (2017), S. 22.
[245] Vgl. Di Liberto (2016), Folie 2.
[246] Vgl. Smith (2017).

GSM-R-Netzes sind insbesondere dessen erreichbare Bandbreite[247] und die geringe Datenübertragungsrate[248] kritisch zu sehen. Bessere Qualitätsmerkmale weisen LTE-Netze auf, deren möglicher Einsatz als GSM-R-Folgesystem derzeit auf europäischer Ebene diskutiert wird[249]. Wenngleich ein akzeptierter LTE-Standard für den Bahntrieb bereits vorliegt, welcher für eine direkte Punkt-zu-Punkt-Kommunikation zwischen Fahrzeugen konzipiert wurde[250], so befinden sich die Diskussionen insgesamt gesehen noch am Anfang[251]. In einem gemeinsamen Forschungsvorhaben vom DLR und der TU Dresden konnte durch Betriebssimulationen bereits gezeigt werden, dass LTE für Automatisierungsszenarien im Schienenverkehr geeignet ist[252].

Noch größeres Potenzial bietet der Mobilfunkstandard 5G, welcher aktuell mit dem Ziel entwickelt wird, Produkte für zeitkritische Echtzeitanwendungen drahtlos zu vernetzen[253]. Erwartet werden extrem niedrige Übertragungsverzögerungen, erhöhte Bandbreite, eine sehr hohe Verfügbarkeit und die Unterstützung vieler gleichzeitiger Nutzer[254]. Bereits 2020 sollen erste 5G-Mobilfunktnetze verfügbar sein, welche Reaktionszeiten von einer Millisekunde und Datenraten von einem GBit/s ermöglichen[255]. Um das Potenzial des 5G-Mobilfunknetzes für Bahnanwendungen nutzbar zu machen, müsste der GSM-R- beziehungsweise LTE-Standard entsprechend weiterentwickelt und von dem dann neuen Standard abgelöst werden – dies verbunden mit entsprechenden Investitions- und Zeitaufwänden. Mit der Spezifikation für die Fahrzeugkommunikation wird jedoch nicht vor Ende dieses 2020 gerechnet[256].

Verwiesen sei an dieser Stelle auch auf die Forschungsaktivitäten am DLR zur Entwicklung von ortsabhängigen Modellen für die Zug-Zug-Kommunikation im Rahmen des Roll2Rail-Projektes, welche Züge virtuell vernetzen sollen[257]. Die Wissenschaftler erwarten, dass eine zuverlässige Datenübertragung bei Reichweiten

[247] Vgl. Lehrbaum (2016), S. 28.
[248] Vgl. Michler et al. (2016), S. 249.
[249] Vgl. Rees (2017), S. 25.
[250] Vgl. Rügheimer (2017b), S. 23.
[251] Vgl. Rees (2017), S. 24 f.
[252] Vgl. Schütte (2017), S. 86.
[253] Vgl. Rügheimer (2017a), S. 19.
[254] Vgl. Lehrbaum (2016), S. 28.
[255] Vgl. Rügheimer (2017a), S. 19f.
[256] Vgl. Rügheimer (2017b), S. 23.
[257] Vgl. Sand (2016), S. 124f.

von bis zu 40 Kilometern, mit Relativgeschwindigkeiten der Züge von bis zu 560 km/h möglich sein wird[258].

Alternativ zu einer Mobilfunklösung ist zum Beispiel der Einsatz von Ad-hoc-Netzen für kleinere Kommunikationszonen (Wireless Access in Vehicular Environments – WAVE)[259] oder einer berührungslosen Ethernet-Lösung zu prüfen. Ethernet konnte sich bereits in vielen industriellen Anwendungen bewähren und erfüllt auch anspruchsvolle Anforderungen an Echtzeitfähigkeit und Fehlersicherheit[260]. Funktionsmuster, welche bis zu ein GBit/s übertragen können, werden derzeit zum Beispiel bei Voith Turbo Scharfenberg entwickelt[261].

Abbildung 4-9 fasst zusammen, welche Anforderungen an das Kommunikationskonzept der virtuellen Kupplung zu berücksichtigen sind.

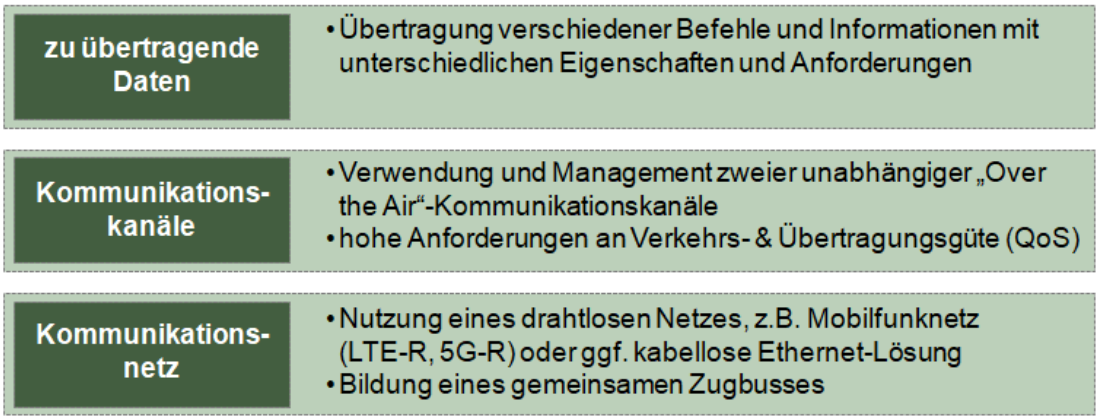


Abbildung 4-9 Anforderungen an das Kommunikationskonzept
Quelle: eigene Darstellung

4.5 Anforderungen aus der betrieblichen Umsetzung

Der virtuelle Zugverband soll im Bahnbetrieb zu keinen betrieblichen Einschränkungen führen und sich in der Betriebsführung analog zum konventionell gekuppelten Zugverband verhalten. Nur so besteht für die virtuelle Kupplung eine maximal große Chance, sich im SPNV erfolgreich zu etablieren. Es ist daher sicherzustellen, dass die virtuell zu kuppelnden Triebfahrzeuge in Bezug auf ihr Traktions- und Bremsvermögen in der Lage sind, den für die gemeinsame Zugfahrt geltenden Fahrplan sowie alle weiteren geforderten Rahmenbedingungen der Strecke und der Aufgabenträgeranforderungen zu erfüllen. Zu berücksichtigen ist, dass eine

[258] Vgl. Sand (2016), S. 125.
[259] Vgl. Reder (2014).
[260] Vgl. Wolbert, Weiß (2016), S. 50.
[261] Vgl. Bollow (2015), S. 147.

Mehrfachtraktion unter Beachtung der Sicherheitsanforderungen grundsätzlich die Einigung auf den kleinsten gemeinsamen Nenner bedarf.

Aus dem Betrieb des virtuellen Zugverbandes und hierbei insbesondere aus dem automatisierten Folgen des Slaves sowie dem Fehlen einer physischen Verbindung zwischen den Zugteilen, resultieren relevante Anforderungen für die zu erarbeitende URS der virtuellen Kupplung. Diese werden nachfolgend entlang der fünf Phasen des betrieblichen Ablaufs eines virtuellen Zugverbandes erläutert (vgl. Abbildung 4-10).

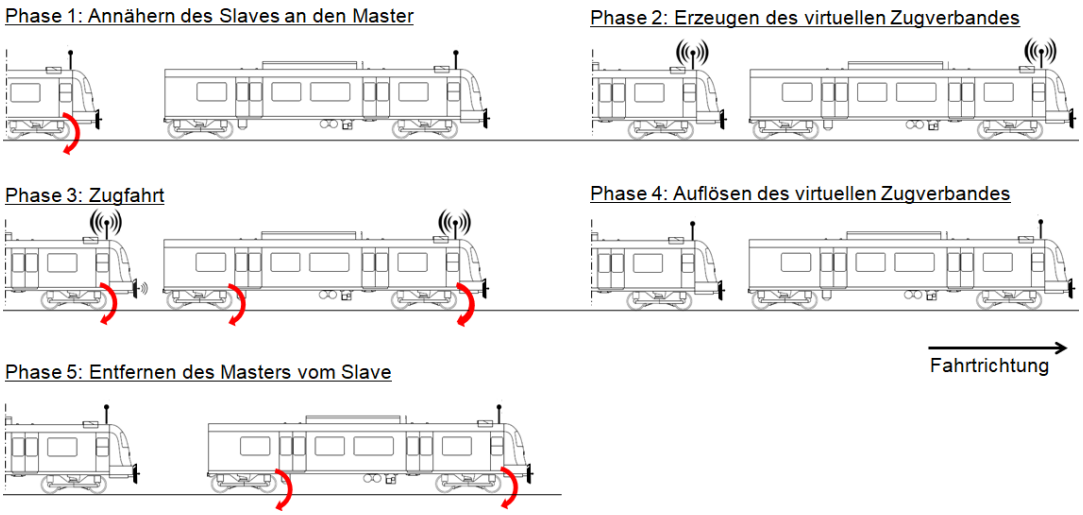


Abbildung 4-10 Betriebsphasen
Quelle: eigene Darstellung

Aufgrund der großen Anzahl und Komplexität möglicher Gefährdungssituationen wird hier ausschließlich auf den konfliktfreien Betriebsablauf eingegangen. Mögliche Gefährdungssituationen und die Reaktion des virtuellen Zugverbandes darauf, werden im Abschnitt 5.2.2 betrachtet.

Phase 1: Annähern des Slaves an den Master

Das Herstellen des virtuellen Zugverbandes kann an jeder Stelle eingeleitet werden, an der die virtuell zu kuppelnden Triebfahrzeuge zum Halten kommen können. Während ein Triebfahrzeug bereits steht, nähert sich das Zweite mit langsamer Geschwindigkeit und kommt bei einem Abstand von etwa einem Meter zum Stehen. Dabei kann sowohl das vordere Fahrzeug auf das Hintere warten (vergleichbar mit konventionellen Flügelsituationen an Haltepunkten) und umgekehrt (vergleichbar mit Kupplungssituationen von wartenden, festgebremsten Fahrzeugen in Endhaltestellen oder auf Abstellgleisen, bei denen die Fahrzeuge vor der Weiterfahrt Kopfmachen

und sich die Fahrtrichtung ändert). Zu diesem Zeitpunkt befindet sich in beiden Fahrzeugeinheiten je ein Triebfahrzeugführer.

Der Triebfahrzeugführer des späteren Slaves kann das Fahrzeug verlassen, sobald er das Fahrzeug auf das virtuelle Kuppeln vorbereitet und dies der Leitzentrale des EVU mitgeteilt hat. Im Einzelnen sind der Fahrmodus „automatisiertes Folgen/ Slave“ zu aktivieren und die Zugnummer der virtuellen Zugfahrt sowie die zugverbandspezifischen Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD} einzugeben. Darüber hinaus sind die vorbereitenden Aufgaben wahrzunehmen, welche auch beim konventionellen Kuppeln zu erfüllen sind.

Nachdem auch der Triebfahrzeugführer des Masters die Zugnummer der virtuellen Zugfahrt und die zugverbandspezifischen Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD} eingegeben und sein Fahrzeug auf den virtuellen Zugverband vorbereitet hat, kann der virtuelle Zugverband erzeugt werden.

Phase 2: Erzeugen des virtuellen Zugverbandes (Zugtaufe)

Die Zugtaufe besteht aus mehreren Schritten und ist erst dann abgeschlossen, wenn alle Schritte erfolgreich durchgeführt wurden. Da es sich um eine sicherheitskritische Kommunikation handelt, erfolgt diese ausschließlich auf dem Kommunikationskanal f_{sD}.

Der Master informiert den Slave zunächst darüber, dass die Zugtaufe eingeleitet wird und teilt mit, wer im Zugverband die Rolle des Masters und wer die Rolle des Slaves ausübt (Zugkonfiguration). Der Slave bestätigt den Erhalt der Information. Master und Slave tauschen daraufhin nacheinander die weiteren zur Herstellung des virtuellen Zugverbandes notwendigen Daten aus (vgl. Tabelle 4-3) und bestätigen einander deren Erhalt. Hierzu zählt auch der Informationsaustausch zum Beschleunigungs- und Bremsvermögen, um diese für die gemeinsame Zugfahrt aufeinander abstimmen zu können. Taktgebend ist die schwächere Fahrzeugeinheit, da nur so gewährleistet werden kann, dass der Slave dem Master folgen und auch mit der gleichen Stärke und damit rechtzeitig bremsen kann.

Kann die Zugtaufe nicht erfolgreich abgeschlossen werden, muss der Fehler behoben und die Zugtaufe erneut und erfolgreich durchgeführt werden oder beide Triebfahrzeuge müssen getrennt (manuell) gesteuert oder über eine mechanische Notkupplung verbunden werden.

Nachdem die Zugtaufe erfolgreich durchgeführt wurde, gelten die beiden Fahrzeugeinheiten als ein virtueller Zugverband.

Phase 3: Zugfahrt

Der Triebfahrzeugführer des Masters beginnt die Zugfahrt nachdem er die Zugintegritätsprüfung durchgeführt, weitere Vorbereitungen für die Abfahrt abgeschlossen und vom Slave über den Kommunikationskanal f_{sD} die Information über dessen geschlossene Türen erhalten hat. Vor Beginn der ersten Zugfahrt des neu virtuell gekuppelten Zugverbandes sind zusätzlich alle Systeme und Routinen zu prüfen und hierbei auch die Bremsprobe durchzuführen.

Mit Beginn der Zugfahrt folgt der Slave dem Master automatisiert im geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstand (vgl. Abschnitt 4.3) entsprechend des in Abbildung 4-8 dargestellten Ablaufschemas. Master und Slave agieren als ein Zugverband: Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, welche vom Triebfahrzeugführer des Masters ausgeführt werden, werden vom Slave registriert und führen zu entsprechenden Reaktionen in dessen Fahrzeugsteuerung.

Kommt es zu einem geplanten Verkehrshalt mit Fahrgastwechsel, nähert sich der Slave dem Master auf einen Abstand von etwa einem Meter. Vom Master erhält der Slave über den Kommunikationskanal f_{sD} den Befehl zur (seitenselektiven) Türfreigabe und zum Öffnen der Türen. Nach Ende des Fahrgastwechsels, wird über den gleichen Kommunikationskanal das Schließen der Türen ausgelöst. Der Slave bestätigt zum Abschluss des Vorgangs, dass alle Türen geschlossen sind. Erst dann kann der Master seine Zugfahrt fortsetzen und der Slave folgt erneut automatisiert. In der Haltesituation ist eine Überwachung des Raumes zwischen den Fahrzeugen hinsichtlich darin befindlicher Personen zu gewährleisten. Ein Losfahren des Slaves trotz Personen im Zwischenraum ist unter allen Umständen auszuschließen.

Ist während der virtuellen Zugfahrt, zum Beispiel bei Halt in einem Kopfbahnhof, ein Richtungswechsel notwendig, müssen Slave und Master ihre Rollen tauschen und hierzu den Zugverband neu konfigurieren.

Während der gesamten Fahrt als virtueller Zugverband muss der Master in der Lage sein, selbsttätig seinen eigenen Zustand, den des Slaves sowie des Zugverbandes insgesamt zu überwachen und alle relevanten Daten zeitgerecht an die Leitstelle zu übertragen. Mögliche Systemfehler und Einschränkungen der Leistungsfähigkeit

müssen rechtzeitig erkannt werden. Bei einem möglichem Leistungsabfall ist automatisiert oder vom Triebfahrzeugführer der Übergang in einen sicheren Zustand einzuleiten.

Die Zugvollständigkeitskontrolle wird fahrzeugseitig vorgenommen. Der Slave sendet hierzu kontinuierlich, in regelmäßigen Abständen eine Zustandsmeldung über den Kommunikationskanal f_{sD}.

Phase 4: Auflösen des virtuellen Zugverbandes

Hat der virtuelle Zugverband den Endhalt der gemeinsamen Fahrt erreicht, übermittelt der Master über den Kommunikationskanal f_{sD} den Befehl zum Auflösen des virtuellen Zugverbandes an den Slave, der den Erhalt der Information bestätigt und das automatisierte Folgen beendet. Die Leitzentrale wird vom Master informiert und die zugverbandspezifischen Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD} stehen dann wieder für neue Zugkonfigurationen zur Verfügung.

Phase 5: Entfernen des Masters vom Slave

Nachdem der virtuelle Zugverband aufgelöst wurde, setzen beide Fahrzeuge ihre Fahrt als alleinfahrende Triebfahrzeuge fort, werden abgestellt oder gehen einen neuen (virtuellen) Zugverband ein.

Zusammenfassung der aus dem Betriebsablauf des virtuellen Zugverbandes resultierende Anforderungen

Abbildung 4-11 fasst die Anforderungen zusammen, welche aus dem Betriebsablauf des virtuellen Zugverbandes resultieren und bei der Erarbeitung der URS der virtuellen Kupplung zu berücksichtigen sind. Zu einem späteren Zeitpunkt sind dann die etablierten betrieblichen Regelwerke, wie zum Beispiel die DB-Richtlinie 408 „Fahrdienstvorschrift“[262] oder das Triebfahrzugführerheft gemäß TSI OPE[263], hinsichtlich des Betriebs der Fahrzeuge im virtuellen Zugverband weiterzuentwickeln.

[262] Vgl. DB Netz (2014c), S. 2.
[263] Vgl. VO (EU) 2015/995, Anhang I, Abschnitt 4.2.1.2.1.

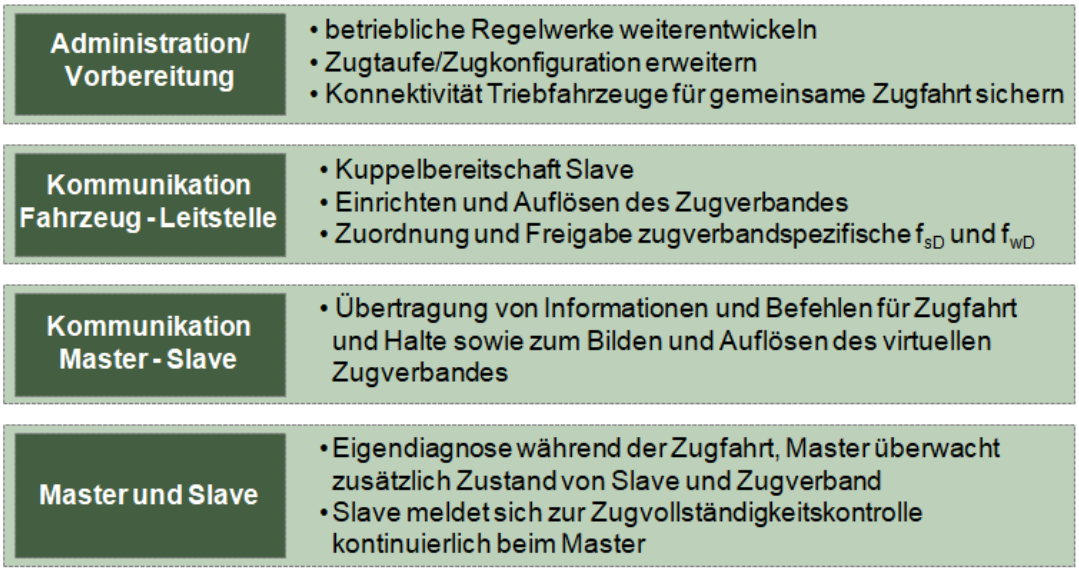


Abbildung 4-11 Anforderungen aus der betrieblichen Umsetzung
Quelle: eigene Darstellung

4.6 Anforderungen an die Schnittstellen und notwendige fahrzeugseitige Anpassungen

Das Modul „Virtuelle Kupplung“ soll die konventionelle Kupplung durch eine automatische Abstandsregelung und eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ersetzen. Um dies zu ermöglichen, sind verschiedene herstellerneutrale Schnittstellen und Standardprotokolle zu definieren. Die benötigten Schnittstellen können in drei Kategorien zusammengefasst werden: Allgemeine Schnittstellen, Schnittstellen für die Abstandsregelung sowie Schnittstellen für die Kommunikation im Zugverband (vgl. Abbildung 4-12).

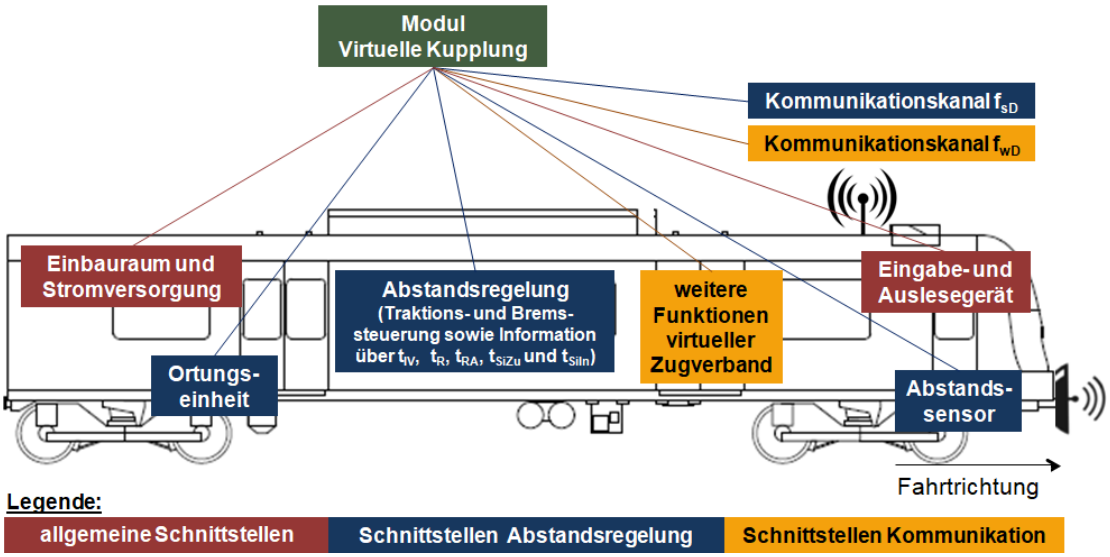


Abbildung 4-12 Benötigte Schnittstellen für die Umsetzung der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Allgemeine Schnittstellen

Für das Modul ist ein ausreichend großer Einbauraum mit Stromversorgung bereitzustellen. Weiterhin ist in jedem Führerstand ein Eingabe- und Auslesegerät zu installieren, welches den Betrieb im virtuellen Zugverband in den Rollen Master oder Slave aktivieren und deaktivieren kann und über das es dem Triebfahrzeugführer des Masters möglich ist, den Slave anzusteuern oder dessen Diagnosedaten abzurufen.

Schnittstellen für die Abstandsregelung

Zum Ermöglichen der automatisierten Abstandsregelung sind Schnittstellen zur Ortungseinheit, zum Kommunikationskanal f_{sD}, zur Abstandsregelung des Fahrzeugs sowie zum Abstandssensor zu spezifizieren.

Über die Ortungseinheit des Slaves wird dessen Position und Geschwindigkeit in einem definierten Vertrauensintervall zur Verfügung gestellt. Die Position und Geschwindigkeit des Masters wird über die Schnittstelle zum Kommunikationskanal f_{sD} empfangen und bereitgestellt. Wie bereits im Abschnitt 4.3 dargestellt, ist sicherzustellen, dass die Position von Master und Slave zu jedem Zeitpunkt der Fahrt unabhängig von den infrastrukturellen Rahmenbedingungen (freie Fläche, Tunnel etc.) fahrzeugzeitig sicher bestimmbar ist.

Weiterhin benötigt das Modul für die Berechnung des geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstandes eine Schnittstelle, über die folgende Informationen bereit-

gestellt werden: Informationsverarbeitungszeit Slave t_{IV}, Regelungszeit Slave t_R, Reaktionszeit der Abstandsregelung des Slaves $t_{RA}(v_{slave})$ sowie Sicherheitszuschlag Zugverband $t_{SiZu}(t)$ und Sicherheitszuschlag Infrastruktur $t_{SiIn}(t)$ (vgl. Abschnitt 4.3). Die letzte für die Abstandsregelung notwendige Schnittstelle stellt die Schnittstelle zum Radarsensor dar. Der Radarsensor bestimmt kontinuierlich den Ist-Abstand zwischen Master und Slave und stellt diesen zum Abgleich mit dem im Modul „Virtuelle Kupplung“ berechneten Ist-Abstand zur Verfügung.

Über die Schnittstelle zur Abstandsregelung des Slaves wird die notwendige Änderung zur Einhaltung des Sicherheitsabstandes ausgelöst, das Fahrzeug wird also beschleunigt oder gebremst.

Schnittstellen für die Kommunikation als Zugverband

Es sind Schnittstellen bereitzustellen, die es ermöglichen, dass Master und Slave so miteinander kommunizieren und interagieren können, dass sie als virtueller Zugverband funktionsfähig sind. Zu den vom Triebfahrzeugführer des Masters anzusteuernden Funktionen zählen zum Beispiel die Türsteuerung, Durchsprache des Triebfahrzeugführers, Diagnosedaten und der Notruf der Fahrgäste sowie der Notstop (vgl. Abschnitt 4.4). Vorstellbar ist zum Beispiel, dass der Master das virtualisierte und dann darstellbare Führerstanddisplay des Slaves aufrufen kann, um dessen Fehlermeldungen zu betrachten (vgl. allgemeine Schnittstellen). Alle anderen Funktionen, die nicht von der Abstandsregelung oder der Zugverbands-kommunikation abgedeckt werden, sind automatisiert im Slave umzusetzen.

Im Rahmen der Spezifikation der Standardprotokolle wird festgelegt, wie die notwendigen Befehle und Informationen zwischen Master und Slave ausgetauscht werden. Hierzu werden unter anderem Steuerungsfunktionen definiert und Diagnosefunktionen abgestimmt.

Werden die virtuell zu kuppelnden Triebfahrzeuge mit dem Modul ausgerüstet, wird über die Schnittstellen die Interaktion des Moduls mit dem Fahrzeug ermöglicht. Die Schnittstellendefinition gewährleistet hierbei, dass unterschiedliche Hersteller das Modul „Virtuelle Kupplung“ in ihre Fahrzeugkonzepte implementieren können, vorausgesetzt, ihre individuellen Lösungen erfüllen alle in einer

Schnittstellenspezifikation definierten Anforderungen[264]. Dies schafft auch die Voraussetzung für eine Nachrüstfähigkeit des Moduls.

Die virtuelle Kupplung und damit auch ihre standardisierten Schnittstellen und Standardprotokolle sind als „futureproof"-Konzept auszulegen, um deren stabile Anwendbarkeit über einen langen Zeitraum zu ermöglichen. Im Rahmen der Schnittstellenspezifikation ist daher außer der Herstellerneutralität auch darauf zu achten, dass streng zwischen sicherheits-/zulassungsrelevant und nicht sicherheits-/zulassungsrelevant unterschieden wird. Auf diese Weise kann eine Rückwirkungsfreiheit, zum Beispiel bei notwendigen Änderungen nicht zulassungsrelevanter Schnittstellen, sichergestellt werden, ohne dass bei jeder Änderung diesbezüglich ein Nachweis neu zu führen ist[265]. Erforderliche Upgrades der virtuellen Kupplung, welche Teilfunktionen zu einem späteren Zeitpunkt ändern oder erweitern, können hierdurch einfacher realisiert werden.

Darüber hinaus ist es für die Umsetzung der virtuellen Kupplung fahrzeugseitig notwendig, Anpassungen in der Steuerungssoftware von Master und Slave vorzunehmen, damit diese nach der virtuellen Zugtaufe miteinander kommunizieren können, der Slave dem Master automatisiert folgt und der Zugriff auf die notwendigen Systeme möglich wird. Welche Änderungen konkret vorzunehmen sind, ist im Einzelfall zu prüfen und nicht Inhalt dieser Arbeit, sondern Gegenstand weiterer Forschung. In diesem Kontext ist auch zu untersuchen, unter welchen Voraussetzungen (Kompatibilität der Fahrzeuge) das Nachrüsten des Moduls möglich ist.

An den Fahrzeugen ist zudem ein Sensor zur Überwachung des Raumes zwischen Master und Slave zu implementieren. Dieser soll, unabhängig von Witterung, Temperatur und Sichtverhältnissen, gewährleisten, dass Master und Slave ihre Fahrt nach einem Halt nur dann fortsetzen, wenn der Raum zwischen ihnen frei ist. Alternativ oder ergänzend ist auch der Einsatz von Zugabfertigungspersonal vorstellbar.

Darüber hinaus ist an den Fahrzeugenden weiterhin ein Zughaken als Rückfallebene vorzusehen (Abschleppkupplung). Über ihn können Master und Slave verbunden werden, wenn die virtuelle Zugfahrt nicht fortgesetzt werden kann. Er ermöglicht

[264] Vgl. Harhurin, Hiebenthal (2011), S. 23.
[265] Vgl. van Olfen (2017), S. 68.

ausschließlich ein Abschleppen des Slaves; verbunden mit entsprechenden betrieblichen Einschränkungen bei der Fahrt aufgrund der reduzierten Höchstgeschwindigkeit.

Abbildung 4-13 fasst die Ergebnisse dieses Abschnittes zusammen.

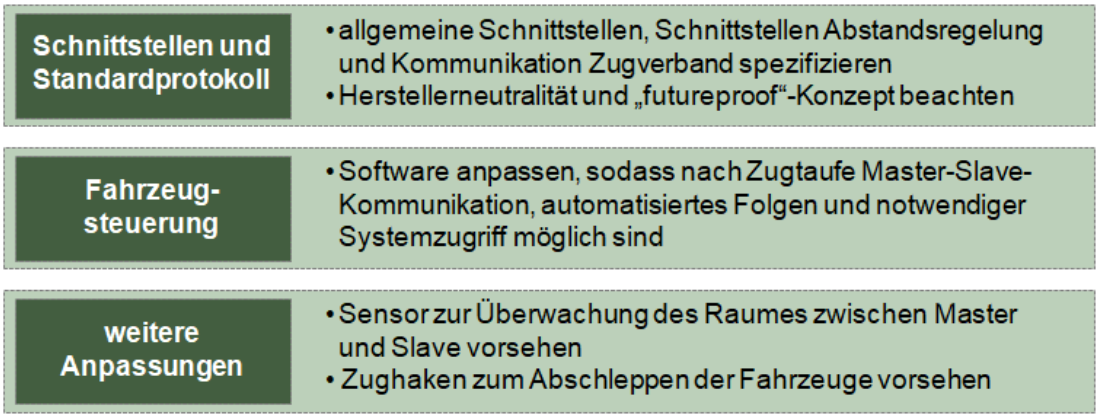


Abbildung 4-13 Schnittstellen und notwendige fahrzeugseitige Anpassungen
Quelle: eigene Darstellung

4.7 Anforderungen aus infrastrukturseitigen Anpassungen

Die für die Konzeptumsetzung notwendigen infrastrukturellen Anpassungen resultieren aus der Gewährleistung der Zugkommunikation und der Zugschlusserkennung und beschränken sich dadurch auf Anpassungen der EVU-Leitstelle, des Kommunikationsnetzes, auf signalgesteuerte Bahnübergangsanlagen sowie auf Allgemeines zum Zugsicherungssystem.

EVU-Leitstelle

Sicherzustellen ist, dass die EVU-Leitstelle den Triebfahrzeugführern vor Beginn der virtuellen Zugfahrt die zugverbandspezifischen Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD} bekannt geben, während der Zugfahrt die für sie relevanten Diagnosedaten des Zugverbandes empfangen und am Ende der virtuellen Zugfahrt die zugverband-spezifischen Kommunikationskanäle wieder freigeben kann.

Kommunikationsnetz

Ein Kernelement der virtuellen Kupplung ist, dass Master und Slave die für die virtuelle Zugfahrt benötigten Informationen und Befehle kabellos austauschen. Wie in Abschnitt 4.4 erläutert, müssen die Kommunikationskanäle hierzu bestimmte Anforderungen erfüllen, um die notwendige Dienstgüte (QoS) zu erfüllen. Das Kommunikationsnetz ist daher soweit auszubauen, dass dies möglich wird.

Signalgesteuerte Bahnübergangsanlagen

Es ist davon auszugehen, dass SPNV-Verkehre auch langfristig Bahnübergänge kreuzen werden[266]. Aufgrund des automatisierten Folgens des Slaves, sind an die Bahnübergangssicherung höhere Sicherheitsanforderungen zu stellen.

Gewährleistet sein muss, dass sich die Schranke erst dann öffnet, wenn der Slave den Bahnübergang passiert hat, auch wenn zwischen Master und Slave je nach Geschwindigkeit mehrere Meter liegen oder wenn der Abstand zwischen Master und Slave so stark angewachsen sein sollte, dass der Master den Block verlässt, bevor der Slave diesen erreicht hat. Sicherzustellen ist daher, dass die Bahnsicherungsanlage in der Lage ist, den Zugschluss des virtuellen Zugverbandes als solchen zu identifizieren, um die Schranke zum richtigen Zeitpunkt zu öffnen. Vergleichbar mit dem Funkbasierten Fahrbetrieb (vgl. Anhang 2) ist es denkbar, dass die Schrankanlage direkt vom Triebfahrzeugführer des Masters angesteuert wird.

Allgemeines zum Zugsicherungssystem

Das heutige Zugsicherungssystem basiert auf dem Prinzip, dass jeder Blockabschnitt von nur maximal einem Zug belegt ist. Zu gewährleisten ist, dass auch zwei virtuell gekuppelte Fahrzeuge als ein Zug anerkannt werden. Die virtuelle Kupplung ist hierzu mit der konventionellen, physischen Kupplung gleichzusetzen.

Darüber hinaus ist es perspektivisch anzustreben, ein Zugsicherungssystem umzusetzen, welches keine festen Blöcke mehr benötigt, sondern die Zugfolgeregelung flexibilisiert („Moving Block“). Auf diese Weise würde es vermieden werden, dass der virtuelle Zugverband mehr als einen Streckenblock beansprucht, wenn der Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave aufgrund hoher Geschwindigkeiten stark angewachsen sein sollte. Eine Reduktion der Leistungsfähigkeit des Streckennetzes und die Gefahr von neuen infrastrukturellen Engpässen kann so vermieden werden.

[266] Vgl. Polz, Beck (2000), S. 684.

Die Ergebnisse dieses Abschnittes sind in Abbildung 4-14 zusammengefasst.

EVU-Leitstelle	• zugverbandspezifische Kommunikationskanäle bereitstellen • zugverbandrelevante Diagnosedaten empfangen und auswerten
Kommunikations-netz	• Ausbau des für die Master-Slave-Kommunikation notwendigen Netzes, inkl. Gewährleistung ausreichend hoher QoS
signalgesteuerte Bahnübergangs-anlage	• erhöhte Anforderungen an Bahnübergangssicherung (Zugschlusserkennung)
Allgemeines zum Zugsicherungs-system	• virtuelle Kupplung mit konventioneller Kupplung in Regelwerken gleichsetzen • System für flexible Zugfolge implementieren („Moving Block“)

Abbildung 4-14 Notwendige infrastrukturseitige Anpassungen
Quelle: eigene Darstellung

4.8 Exkurs: Aufbaukonzept mit mehr als zwei Triebfahrzeugen

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich virtuelle Zugverbände betrachtet, die aus zwei Triebfahrzeugen bestehen. Daher sei an dieser Stelle nur andiskutiert, welche Besonderheiten bei Zugverbänden mit mehr als zwei Einheiten zu berücksichtigen sind (vgl. Abbildung 4-15). Vorstellbar sind sowohl virtuelle Zugverbände in Mehrfachtraktion aus mindestens drei virtuell gekuppelten Triebfahrzeugen, als auch Mischtraktionen, die aus einen konventionell gekuppelten Zugverband bestehen, der mit einem weiteren virtuell kuppelt.

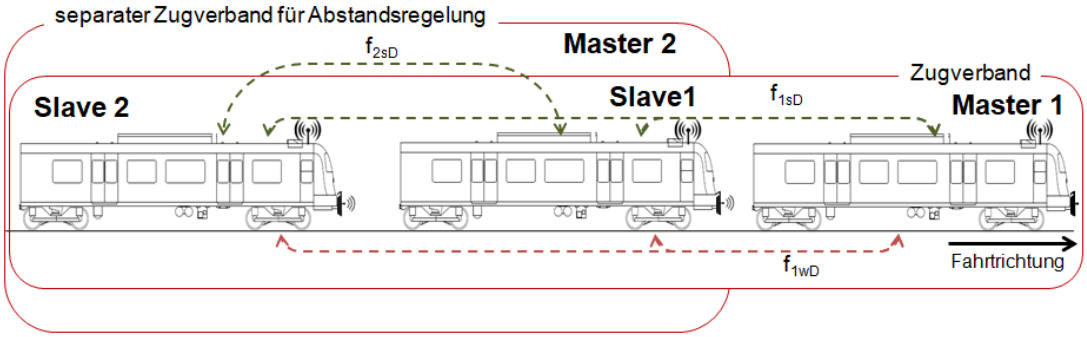


Abbildung 4-15 Virtueller Zugverband mit mehr als zwei Einheiten
Quelle: eigene Darstellung

Der Slave folgt automatisiert dem Master indem er auf dessen fahrdynamische Änderung reagiert. Beim einzuhaltenden geschwindigkeitsabhängigen Sicherheits-

abstand zum vorausfahrenden Master fließen dabei außer der aktuellen Position und Geschwindigkeit des Masters auch Unterschiede im Traktions- und Bremsvermögen von Master und Slave mit ein. Beim Betrieb längerer Zugverbände ist dabei insbesondere zu beachten, dass der virtuelle Zugverband insgesamt stabil fährt und sich mögliche Abstandsfehler nicht verstärken.

Folglich muss zunächst Slave 2 mit Slave 1 für die Abstandsregelung einen eigenen virtuellen Zugverband bilden, wobei Slave 2 vor Fahrtbeginn die für die Abstandsregelung relevanten Daten von Slave 1 und während der Fahrt dessen Positions- und Geschwindigkeitsdaten erhält. Für die Übertragung der sicherheitsrelevanten Informationen ist ein eigener zugverbandspezifischer Kommunikationskanal f_{2sD} zu verwenden. Die zu berücksichtigenden Informationen für die Abstandsregelung werden zunächst zwischen Slave 1 und Slave 2 bestimmt. Erst im Anschluss erfolgt der Abgleich zwischen den Parametern aus dem virtuellen Zugverband Slave 1/Slave 2 und dem Master 1. Auf diese Weise wird ein abgestimmtes Regelungsverhalten erzeugt, das einen maximal stabilen Zugverband ermöglicht.

Die Ansteuerung und Übermittlung der übrigen zugverbandrelevanten Funktionen und Befehle an Slave 2 wird vom Master 1 aus vorgenommen. Master 1 steuert diese Funktionen und Befehle an Slave 1 und Slave 2 zentral über die Übertragungskanäle f_{1sD} und f_{1wD}. Zur Sicherung der Zugvollständigkeit kommunizieren sowohl Slave 1 als auch Slave 2 an den Master. Um Verwechslungen der Fahrzeuge auszuschließen, sind die Fahrzeuge im Rahmen der Zugtaufe mit einer eindeutigen Identität im virtuellen Zugverband zu belegen.

Aufgrund der einzuhaltenden geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstände ist zu untersuchen, inwieweit sich für den Betrieb eines virtuellen Zugverbandes mit mehr als zwei Triebfahrzeugen aus der Länge des Zugverbandes Einschränkungen aus der Infrastruktur ergeben. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

4.9 Anforderungsprofil virtuelle Kupplung und notwendige betriebliche Rahmenbedingungen

Dieser Abschnitt hat zum Ziel, die in den vorangegangenen Abschnitten erarbeiteten Anforderungen zusammenzufassen und in eine URS für die virtuelle Kupplung zu überführen. Diese beschreibt, welche Anforderungen das Modul erfüllen muss, um

den Betrieb eines virtuellen Zugverbandes zu ermöglichen, der die gleiche Funktionalität und Sicherheit aufweist, wie ein konventionell gekuppelter Zugverband. Die einzelnen Modulkomponenten und die benötigten Schnittstellen werden ebenso betrachtet, wie die Anforderungen an Master, Slave und Infrastruktur, die sich aus der Umsetzung der virtuellen Kupplung ergeben.

Die Darstellung der URS erfolgt entlang der zu Anfang des Abschnitts 4 genannten vier Kategorien „Allgemeine Angaben“, „Funktionale Anforderungen“, „Nicht funktionale Anforderungen“ sowie „Spezifische Anforderungen an Feldtests“. Dabei wird auch eingeschätzt, ob es sich um eine Muss-, Soll- oder Kann-Anforderung handelt. Hierin spiegelt sich die Relevanz der Anforderungen für die Umsetzung der virtuellen Kupplung wider. In Anlehnung an die juristischen Begriffe der Muss-, Kann- und Soll-Vorschrift[267], werden diese wie in Abbildung 4-16 dargestellt, definiert.

Abbildung 4-16 Definition Muss-, Soll- und Kann-Anforderung
Quelle: eigene Darstellung auf Basis Meub (ohne Jahresangabe), S. 4

Allgemeine Angaben

Die virtuelle Kupplung soll die konventionelle Kupplung ersetzen. Der virtuelle Zugverband besteht aus einem vorderen Fahrzeug, dem Master, der von einem Triebfahrzeugführer gesteuert wird, und einem hinteren Fahrzeug, dem Slave, der fahrerlos, automatisiert dem Master folgt. Für die Herstellung, den Betrieb und das Auflösen des virtuellen Zugverbandes werden zwischen Master und Slave über eine „Over-the-Air“-Kommunikation kontinuierlich zugverbandspezifische Informationen und Befehle ausgetauscht. Das für die technische Umsetzung zu entwickelnde Modul „Virtuelle Kupplung“ besteht aus fünf Komponenten und umfasst mehrere Schnittstellen. Es existiert keine physische Verbindung zwischen Master und Slave.

[267] Vgl. Meub (ohne Jahresangabe), S. 4.

Funktionale Anforderungen

Funktionale Anforderungen beschreiben spezielle Forderungen oder Fähigkeiten eines Systems, zum Beispiel in Bezug auf dessen Verhalten[268]. Sie werden präzisiert durch detaillierte Eigenschaften bezüglich Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Leistungsvermögen, Qualität, Dokumentation, Eintritts- und Austrittsdaten sowie Echtzeitverhalten[269]. Tabelle 4-5 fasst die funktionalen Anforderungen, gegliedert nach Anforderungen an das Gesamtmodul, an alle Modulkomponenten sowie einzelne Modulkomponenten zusammen.

Tabelle 4-5 Funktionale Anforderungen an die virtuelle Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Funktionale Anforderungen	Muss/Soll/ Kann[270]
Gesamtmodul		
1	Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität („futureproof"-Konzept)[271]	Muss
2	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Sicherheit und Security	Muss
Alle Modulkomponenten		
3	Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität („futureproof"-Konzept)	Muss
4	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Sicherheit und Security	Muss
Übertragungseinheit „Abstand"		
5	Empfang der Positions- und Geschwindigkeitsdaten vom Master sowie Weiterleitung an Regelungseinheit	Muss
6	Empfang und Übermittlung der Informationen und Befehle zum Betrieb des virtuellen Zugverbandes	Muss
7	Übermittlung der Information zum Bilden und Auflösen des virtuellen Zugverbandes	Soll
Übertragungseinheit „Kommunikation"		
8	Übertragung der Kommunikationsdaten zwischen Master und Slave (≙ alle weiteren zur Herstellung des virtuellen Zugverbandes benötigten Daten und Befehle)	Soll
Regelungseinheit		
9	Bestimmung des geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstandes	Muss
10	Bestimmung der notwendigen Änderung von Zug- oder Bremskraft des Slaves anhand der bereitgestellten Informationen zu Position und Geschwindigkeit und anhand des Algorithmus zur Bestimmung des Sicherheitsabstands	Muss.
Diagnoseeinheit		
11	Fortlaufende Überprüfung der ordnungsgemäßen und fehlerfreien Funktionsfähigkeit des Moduls und seiner Komponenten inkl. Bestimmung möglicher Fehlerursachen	Soll
Abstandssensor		
12	unabhängige Bestimmung des Ist-Abstandes zwischen Master und Slave	Soll

[268] Vgl. VDB (2015), S. 51.
[269] Vgl. VDB (2015), S. 51.
[270] Eingeschätzt wird, ob es sich um eine Muss-, Soll- oder Kann-Anforderung handelt.
[271] Die Rückwärtskompatibilität bezieht sich auf zukünftige Generationen der virtuellen Kupplung.

Nicht funktionale Anforderungen

Nicht funktionale Anforderungen umfassen die Rahmenbedingungen, unter denen das System betriebsfähig sein muss[272]. Sie ergeben sich unter anderem aus den Normen, Vorschriften, Einsatzprofilen, spezifischen Anforderungen der Kunden[273], dem Einbauraum und den wirtschaftlichen Bedingungen[274]. Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 fassen die nicht funktionalen Anforderungen zusammen.

Tabelle 4-6 Nicht funktionale Anforderungen an die virtuelle Kupplung - Teil 1
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Nicht funktionale Anforderung	Muss/Soll/ Kann[275]
Gesamtmodul		
13	Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus	Kann
14	Zulassungsfähigkeit	Muss
15	Konformität zum rechtlichen Umfeld	Muss
16	Konformität zum betrieblichen Regelwerk	Muss
Alle Modulschnittstellen		
17	Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität („futureproof“-Konzept)	Muss
18	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Sicherheit und Security	Muss
19	herstellerneutrale Spezifikation (Konnektivität bauartfremder Fahrzeuge)	Soll
Allgemeine Schnittstellen		
20	Einbauraum in den Fahrzeugen	Muss
21	Stromversorgung des Moduls	Muss
22	Ein- und Ausgabegerät im Führerraum	Muss
Schnittstellen für die Abstandsregelung		
23	Ermittlung und Bereitstellung der für die Bestimmung des Sicherheitsabstandes relevanten Informationen t_{IV}, t_R, $t_{RA}(v_{Slave})$, $t_{SiZu}(t)$ und $t_{SiIn}(t)$	Muss
24	sichere, robuste und zuverlässige fahrzeugseitige Eigenortung zu jedem Zeitpunkt	Muss
25	Übertragung der Positions- und Geschwindigkeitsdaten des Slaves	Muss
26	Übertragung der notwendigen Änderungen von Zug- oder Bremskraft an die Abstandssteuerung des Slaves	Muss
27	Übertragung des vom Abstandssensor ermittelten Ist-Abstandes	Soll
Schnittstellen für die Kommunikation als Zugverband		
28	Übertragung und Umsetzung der weiteren für die Herstellung, den Betrieb und das Auflösen des virtuellen Zugverbandes notwendigen Informationen und Befehle	Soll
Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}		
29	Verwendung und Management zweier voneinander unabhängiger „Over the Air“-Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}	Muss
30	hohe Anforderungen an Verkehrs- und Übertragungsgüte (QoS)	Muss

[272] Vgl. Lemmer (2009), S. 29.
[273] Vgl. VDB (2015), S. 29.
[274] Vgl. Lemmer (2009), S. 29.
[275] Eingeschätzt wird, ob es sich um eine Muss-, Soll- oder Kann-Anforderung handelt.

Tabelle 4-7 Nicht funktionale Anforderungen an die virtuelle Kupplung - Teil 2
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Nicht funktionale Anforderung	Muss/Soll/ Kann
Kommunikationsnetz		
31	Nutzung eines drahtlosen Kommunikationsnetzes, z.B. Mobilfunknetz (LTE-R, 5G-R) oder alternativ kabellose Ethernet-Lösung prüfen	Muss
32	Ausbau des Kommunikationsnetzes zur Gewährleistung einer ausreichend hohen QoS	Muss
EVU-Leitstelle		
33	Übermittlung der Information „Kuppelbereitschaft Slave“	Soll
34	Empfang der Information „Einrichten und Auflösen des Zugverbandes“	Soll
35	Zuordnung und Freigabe der zugverbandspezifischen Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}	Soll
36	zugverbandspezifische Diagnosedaten empfangen und auswerten	Kann
Signalgesteuerte Bahnübergangsanlagen		
37	erhöhte Anforderungen an Bahnübergangssicherung	Muss
Zugsicherungssystem		
38	Fahren im Nullabstand	Muss
39	Fahren im flexiblen Blockabstand („Moving Block“)	Kann
Master und Slave (alle potenziell virtuell zu kuppelnden Fahrzeuge)		
40	Eigendiagnose während der Zugfahrt	Soll
41	Slave meldet sich zur Zugvollständigkeitskontrolle zyklisch bei Master	Soll
42	Anpassungen in der Steuerungssoftware, sodass nach der Zugtaufe Master-Slave-Kommunikation, automatisiertes Folgen des Slaves und notwendige Systemzugriffe möglich	Muss
43	Sensor zur Überwachung des Raumes zwischen Master und Slave	Soll
44	Zughaken zum Abschleppen der Fahrzeuge	Soll
Zugbildung		
45	heutige Zugtaufe erweitern	Muss
46	Konnektivität der zu kuppelnden Triebfahrzeuge für gemeinsame Zugfahrt gewährleisten	Muss

Spezifische Anforderungen an Feldtests

Erfordern die Feldtests zu den zuvor getroffenen Anforderungen abweichende oder ergänzende Anforderungen, sind diese hier aufzuführen[276]. Aus Sicht der Autorin besteht hierzu keine Notwendigkeit.

Die Markteinführung einer Innovation wird zentral beeinflusst von ihren Kosten, Risiken und dem Nutzen: je größer der Nutzen oder je geringer die Kosten und Risiken sind, desto einfacher wird eine Markteinführung[277]. Auf Basis der soeben dargestellten URS erfolgt in den nächsten Kapiteln daher eine Einschätzung zu technischen, wirtschaftlichen und prozessualen Risiken, welche mit der Umsetzung der virtuellen Kupplung einhergehen. Darauf aufbauend kann im weiteren Verlauf, jedoch nicht im Rahmen dieser Arbeit, die technische Lösung entwickelt werden (vgl. Abbildung 4-1).

[276] Vgl. Lemmer (2009), S. 29.
[277] Vgl. SCI, KCW (2012), Folie 14.

5 Einschätzung zur technischen Umsetzbarkeit

Ziel des Kapitels ist es, das Konzept der virtuellen Kupplung hinsichtlich seiner technischen Umsetzbarkeit einzuschätzen. Zu diesem Zweck erfolgt eine Einschätzung ihrer technischen Reife (Abschnitt 5.1), eine Risikobeurteilung (Abschnitt 5.2) sowie ergänzend eine Betrachtung fahrzeugkonzeptbedingter Gefährdungen (Abschnitt 5.3). Die zuvor in der URS beschriebenen Anforderungen bilden hierfür die Grundlage. Das Kapitel schließt mit einer Einschätzung zur technischen Umsetzbarkeit und mit einer Zusammenfassung notwendiger Entwicklungs- und Forschungsbedarfe (Abschnitt 5.4).

5.1 Einschätzung zur technischen Reife

Die Einschätzung der technischen Reife ermöglicht es, den Entwicklungsstand der virtuellen Kupplung zu ermitteln und dadurch eine Aussage darüber abzuleiten, was technisch heute bereits möglich ist und an welchen Stellen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Hierzu werden anhand des Reifegradmodells des Verbandes der Bahnindustrie in Deutschland e.V. (VDB) die technische Reife der Komponenten des Moduls „Virtuelle Kupplung“, des Moduls selbst, also der Kombination der Komponenten, sowie die Integration des Moduls in ein Triebfahrzeug betrachtet.

5.1.1 Reifegradmodell des Verbandes der Bahnindustrie

Das Reifegradmodell des VDB wurde in Anlehnung an das Reifegradmodell der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und an die VDI-Konstruktionsrichtlinien 2206 und 2221 entwickelt. Es berücksichtigt, dass im Schienenfahrzeugbereich – so auch bei der virtuellen Kupplung – in der Regel etablierte Subsysteme mit Innovationen verbunden werden und unterscheidet hierzu zwischen dem Einsatzreifegrad (ERG) und dem Integrationsreifegrad (IRG).[278] Die Einschätzungen zum ERG und IRG zusammen ermöglichen eine Aussage zur technologischen Reife des betrachteten Systems insgesamt[279].

[278] Vgl. VDB (2015), S. 18.
[279] Vgl. Schmid et al. (2017), S. 392.

Der ERG bewertet in neun Abstufungen den Erfüllungsgrad der Funktionstüchtigkeit eines abgegrenzten Systems[280]. Er legt den Fokus auf die Erfüllung der Anforderungen, die an das betrachtete System gestellt werden[281].

Der IRG bewertet in fünf Abstufungen den Erfüllungsgrad der Funktionstüchtigkeit im Zusammenwirken mehrerer Systeme[282]. Er spiegelt wider, ob das betrachtete System alle Anforderungen erfüllt, um in das übergeordnete System integriert zu werden und in dieser Umgebung seine Anforderungen zu erfüllen[283]. Der IRG berücksichtigt damit die notwendigen Abstimmungsprozesse der Schnittstellen zwischen den unter- und übergeordneten Systemen[284].

Ein bestimmter Reifegrad gilt nur dann als erreicht, wenn alle Anforderungen bei allen definierten Merkmalen der angestrebten und aller darunter liegenden Reifegradstufen erfüllt sind. Zu berücksichtigen sind dabei sowohl nicht-funktionale als auch funktionale Anforderungen.[285]

Anders als in der VDB-Methodik vorgesehen, werden im Folgenden für die Einstufung eines Systems keine Anforderungen je Erfüllungsstufe festgelegt[286,287], sondern die in Kapitel 4.9 aufgelisteten Anforderungen herangezogen sowie auf die Kurzbeschreibungen in Tabelle 5-1 zurückgegriffen, welche einen Überblick zu Anforderungen in den einzelnen Reifegradstufen gibt. Da das VDB-Modell für die Anwendung in konkreten Schienenfahrzeugprojekten entwickelt wurde, spezifiziert es die ERG 1 und 2 nicht im Detail, weil es sich hierbei um Systeme handeln würde, welche sich im Stadium der Grundlagen- oder Anwendungsforschung befinden und daher in der Regel nicht für die Realisierung konkreter Schienenfahrzeugprojekte in Frage kommen. Ergänzend wird daher für die Definition der ERG 1 und 2 die Einstufung der NASA, gemäß Mankins (1995) verwendet.

[280] Vgl. Schmid et al. (2017), S. 392.
[281] Vgl. VDB (2015), S. 20.
[282] Vgl. Schmid et al. (2017), S. 392.
[283] Vgl. VDB (2015), S. 20.
[284] Vgl. Schmid et al. (2017), S. 392f.
[285] Vgl. VDB (2015), S. 18 und S. 21.
[286] Im VDB-Modell wurden den einzelnen Stufen verschiedene Soll-Größen zugeordnet, unter anderem für die Merkmale physischer Zustand, Funktionssicht, Bauteilsicht und notwendige Nachweise. Diese ergänzenden Hinweise können VDB (2015), S. 22 ff entnommen werden.
[287] Vgl. VDB (2015), S. 21.

Tabelle 5-1 Kurzbeschreibung der Einsatz- und Integrationsreifegradstufen
Quelle: eigene Darstellung auf Basis VDB (2015), S. 19, Mankins (1995), S. 2 und Schmid et al. (2017), S. 392

Phase	Kurzbeschreibung IRG-Stufen	Kurzbeschreibung ERG-Stufen
Definition/Klärung	**IRG I** Hauptfunktionen definiert und zwischen Systemen aufgeteilt, Schnittstellen und Interaktion festgelegt (Modell)	**ERG 1** wissenschaftliche Grundlagenforschung abgeschlossen, grundsätzliche Funktionsprinzipien festgelegt
		ERG 2 Technologiekonzept und/oder -anwendung beschrieben
		ERG 3.1 Anforderungen und Randbedingungen beschrieben, Hauptfunktionen definiert
Konstruktion	**IRG II.I** Generierung vollständiger Informationen für untergeordnetes System (Modell)	**ERG 3.2** Produkt vollständig konzipiert, Zuordnung Funktion-Wirkprinzip-Bauelement (Modell)
	IRG II.II Detailfestlegung Schnittstellen für Elemente der spezifischen Phase, Festschreiben der Datenschnittstellen für Teilsysteme (Modell)	**ERG 3.3** Bauelemente Funktionsstruktur erfüllen Anforderungen an diese Funktions-struktur, Festlegen Eigenschafts-absicherung (Modell)
	IRG II.III alle übergreifenden Funktionen erfüllt, Detailfestlegung aller Schnittstellen (Modell)	**ERG 3.4** Konstruktion aller Bauelemente abgeschlossen und erfolgreich im System integriert (Modell)
Eigenschafts-absicherung	**IRG III** definierter Input von übergeordnetem System erfüllt/löst definierte Funktion an nicht integriertem untergeordneten System aus, untergeordnetes System überprüft Anbindung an übergeordnete und andere Systeme	**ERG 4** Nachweis des Erfüllens sämtlicher Anforderungen durch das nicht in das übergeordnete System integrierte Erstmuster soweit für Typtest und Erstmusterprüfung definiert und prüfbar
Eigenschaftsabsicherung integriert	**IRG IV.I** definierte Interaktion erfüllt/löst definierte Funktion/Rückmeldung des in das übergeordnete System integrierten Erstmusters unter statischen Bedingungen aus	**ERG 5** Nachweis des Erfüllens sämtlicher Anforderungen unter statischen Bedingungen durch in übergeordnete System integriertes Erstmuster
	IRG IV.II wie IRG IV.I, aber im Test- oder Probebetrieb	**ERG >= 6** wie ERG 5, aber im Testbetrieb **ERG >= 7** wie ERG 5, aber im Probebetrieb
	IRG IV.III wie IRG IV.II, aber integriertes Serienprodukt unter Zulassungs- und Abnahmebedingungen	**ERG 8** wie ERG 7, aber integriertes Serienprodukt unter Zulassungs- und Abnahmebedingungen
	IRG V wie IRG IV.III, aber unter Betriebsbedingungen	**ERG 9** wie ERG 8, aber unter Betriebsbedingungen

5.1.2 Anwendung der ERG- und IRG-Methodik

Die Einschätzung der technischen Reife des Moduls „Virtuelle Kupplung“ erfolgt in zwei Schritten (vgl. Abbildung 5-1). Im ersten Schritt wird der ERG des Moduls (ERG_M) eingeschätzt. Im zweiten Schritt wird der IRG des Moduls (IRG_M), also die Integrationsfähigkeit des Moduls in ein Triebfahrzeug bewertet.

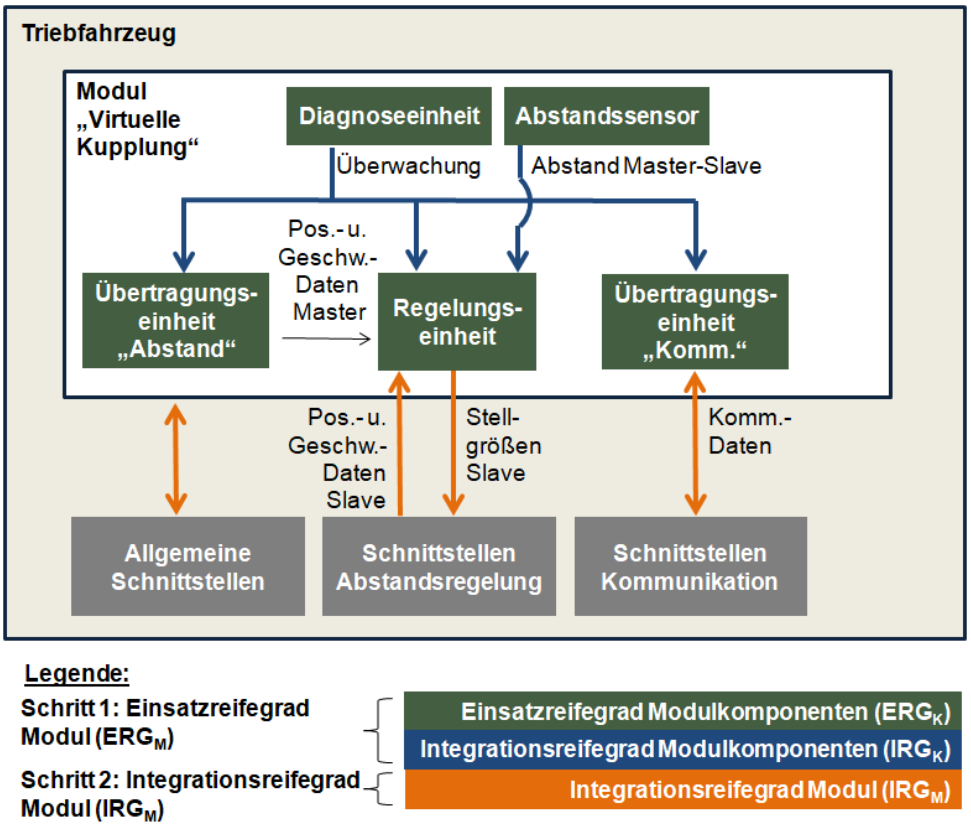


Abbildung 5-1 Vorgehen zur Bestimmung der technischen Reife des Moduls
Quelle: eigene Darstellung

ERG des Moduls (ERG_M)

Für die Einschätzung des ERG_M werden der ERG der Modulkomponenten (ERG_K) und ihr IRG in Bezug auf ihr Zusammenwirken im Modul (IRG_K) eingeschätzt.

Es werden Aussagen dazu getroffen, inwieweit die Modulkomponenten die Anforderungen heute bereits erfüllen, welche im Kapitel 4.9 „Anforderungsprofil virtuelle Kupplung und notwendige betriebliche Rahmenbedingungen“ zusammengetragen wurden. Tabelle 5-2 stellt die Bewertungsergebnisse dar. Deutlich wird, dass heute bereits Lösungen vorliegen, welche die an die Komponenten gestellten Anforderungen erfüllen können. Der ERG_K kann daher bei allen Komponenten mit der höchstmöglichen Stufe 9 bewertet werden.

Tabelle 5-2 Einsatzreifegrad der Modulkomponenten (ERG_K)[288]
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Funktionale Anforderungen (inklusive Muss/Soll/Kann-Einschätzung)		Erfüllungsgrad (eigene Einschätzung)
alle Modulkomponenten			
3	Vorwärts- und Rückwärtskompatibilität[289] („futureproof"-Konzept)	Muss	✓ • Siemens-Fahrzeugsteuerung (SIBAS) soll für viele Lokomotiven-Generationen einsetzbar sein
4	Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Sicherheit und Security	Muss	✓ • entspricht heutigen Normanforderungen (vgl. EN 50126, IT-Sicherheitsgesetz)
Übertragungseinheit „Abstand"			
5	Empfang der Positions- und Geschwindigkeitsdaten vom Master sowie Weiterleitung an Regelungseinheit	Muss	✓ • heute eingesetzt bei automatischen Systemen, zum Beispiel Urbalis Fluence, ETCS
6	Empfang und Übermittlung der Informationen und Befehle zum Betrieb des virtuellen Zugverbandes	Muss	✓ • siehe lfd. Nr. 5
7	Übermittlung der Information zum Bilden und Auflösen des virtuellen Zugverbandes	Soll	✓ • heute in Zugverbänden eingesetzt (vgl. Train Communication Network)
Übertragungseinheit „Kommunikation"			
8	Übertragung der Kommunikationsdaten zwischen Master und Slave (≙ alle weiteren zur Herstellung des virtuellen Zugverbandes benötigten Daten und Befehle)	Soll	✓ • heute in Zugverbänden eingesetzt (vgl. Train Communication Network)
Regelungseinheit			
9	Bestimmung des geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstandes	Muss	✓ • siehe lfd. Nr. 5
10	Bestimmung der notwendigen Änderung von Zug- oder Bremskraft des Slaves anhand der bereitgestellten Informationen zu Position und Geschwindigkeit und anhand des Algorithmus zur Bestimmung des Sicherheitsabstands	Muss.	✓ • siehe lfd. Nr. 5
Diagnoseeinheit			
11	Fortlaufende Überprüfung der ordnungsgemäßen und fehlerfreien Funktionsfähigkeit des Moduls und seiner Komponenten inkl. Bestimmung möglicher Fehlerursachen	Soll	✓ • Zugdiagnose heute üblich
Abstandssensor			
12	unabhängige Bestimmung des Ist-Abstandes zwischen Master und Slave	Soll	✓ • heute eingesetzt bei Annäherungssystemen und automatischem Fahren

[288] Zur besseren Orientierung wird die Nummerierung aus der Tabelle 4-5 beibehalten.
[289] Die Rückwärtskompatibilität bezieht sich auf zukünftige Generationen der virtuellen Kupplung.

Für die Einschätzungen des IRG_K ist die technische Reife der Komponenten in Bezug auf ihre Integration in das übergeordnete Modul und damit die Interaktion der Modulkomponenten im Modul zu bewerten. Wenngleich im Abschnitt 4.2 - Vergleichbare Praxis- und Forschungsbeispiele gezeigt werden konnte, dass bereits Anwendungsbeispiele existieren, die mit der virtuellen Kupplung vergleichbar sind, so kann aktuell jedoch kein Nachweis dafür vorgelegt werden, dass die untergeordneten Systeme (Modulkomponenten) nach Integration in das übergeordnete System (Modul „Virtuelle Kupplung“) die an sie gestellten Anforderungen weiterhin erfüllen könnten. Aktuell sind lediglich die Hauptfunktionen sowie Schnittstellen und Interaktionen beschrieben und im Modell zwischen den Systemen aufgeteilt. Der IRG aller Modulkomponenten muss daher mit der niedrigsten Stufe 1 eingeschätzt werden.

Im Ergebnis, welches Tabelle 5-3 zusammenfasst, ist festzustellen, dass heute bereits die für das Modul notwendigen Komponenten isoliert betrachtet Marktreife haben und sich im Bahnsektor in der täglichen Anwendung bewähren. Die für die Umsetzung der virtuellen Kupplung notwendige Kombination und Interaktion der Komponenten hat jedoch noch eine sehr geringe Reife mit entsprechend großem Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Das Technologiekonzept ist grundsätzlich beschrieben, detaillierte Anforderungen zur Umsetzung des Konzeptes liegen jedoch nicht vor. Nachweise zur technischen Umsetzbarkeit wurden nicht geführt.

Tabelle 5-3 Reifegradeinschätzung der Modulkomponenten
Quelle: eigene Darstellung

Modulkomponente	ERG_K	IRG_K	Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Bezug auf IRG_K
Übertragungseinheit „Abstand“	9	1	Interaktion mit Regelungseinheit
Übertragungseinheit „Kommunikation“	9	1	Interaktion mit Kommunikationseinheit Slave
Regelungseinheit	9	1	Interaktion mit Abstandsregelung Slave, Odometrie Slave, Übertragungseinheit „Abstand“ und Abstandssensor
Abstandssensor	9	1	Interaktion mit Regelungseinheit
Diagnoseeinheit	9	1	Überwachung von Übertragungseinheiten „Abstand“ und „Kommunikation“, Abstandssensor und Regelungseinheit

Der ERG_M kann daher mit der Stufe 2 eingeschätzt werden. Im Produktentwicklungsprozess befindet man sich damit auf der untersten Stufe „Definition/Klärung“[290].

Integrationsreifegrad des Moduls (IRG_M)

Im zweiten Schritt wird die Integrationsfähigkeit des Moduls in ein Triebfahrzeug und damit dessen IRG (IRG_M) eingeschätzt.

Hierbei sind Aussagen dazu zu treffen, inwieweit die Anforderungen erfüllt werden, welche an die Schnittstellen zwischen Modul und Triebfahrzeug gestellt werden sowie welche sich aus den für den Betrieb notwendigen Fahrzeuganpassungen ergeben (vgl. Kapitel 4.9).

Wie auch beim IRG_K kann für die Einschätzung des IRG_M auf keine Erfahrungen oder Nachweise darüber zurückgegriffen werden, ob das Modul „Virtuelle Kupplung“ die an sie gestellten Anforderungen nach Integration in ein Triebfahrzeug erfüllen könnte. Im Konzept sind bisher ausschließlich die Hauptfunktionen definiert und zwischen den Schnittstellen aufgeteilt sowie die Schnittstellen und Interaktionen beschrieben. Detaillierte technische Konzeptionen liegen nicht vor. Der IRG_M muss daher mit 1 eingeschätzt werden. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist in Tabelle 5-4 formuliert.

Tabelle 5-4 Forschungs- und Entwicklungsbedarf für einen höheren IRG_M
Quelle: eigene Darstellung

Schnittstellen	Forschungsbedarf und Entwicklungsbedarf
Alle Schnittstellen	• Konnektivität bauartfremder Fahrzeuge gewährleisten/ herstellerneutrale Spezifikation erarbeiten
Allgemeine Schnittstellen	• Entwicklung eines Eingabe- und Ausgabegerätes zur Umsetzung des Fernzugriffs und der Überwachung des Slaves (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
Schnittstellen Abstandsregelung	• automatisches Folgen des Slaves ermöglichen: Interaktion zwischen Regelungseinheit und Abstandsregelung • Entwicklung einer Möglichkeit, um die Informationen t_{IV}, t_R, $t_{RA}(v_{Slave})$, $t_{SiZu}(t)$ und $t_{SiIn}(t)$ für die Bestimmung des Sicherheitsabstandes sicher ermitteln und bereitstellen zu können
Schnittstellen Kommunikation Zugverband	• für Betrieb des virtuellen Zugverbandes notwendige Kommunikation ermöglichen: Interaktion zwischen Übertragungseinheit „Kommunikation“ und der Kommunikationseinheit des Slave

[290] Vgl. VDB (2015), S. 19.

Ergänzende Betrachtung administrativer und technischer Rahmenbedingungen

Im Rahmen dieses Abschnittes wurde bisher ausschließlich die technische Reife des Moduls „Virtuelle Kupplung“ betrachtet. Für die Umsetzung der virtuellen Kupplung ist es jedoch auch notwendig, auf die administrativen und technischen Rahmenbedingungen einzugehen, welche in Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 enthalten sind. In Tabelle 5-5 bis Tabelle 5-7 wird daher eine Einschätzung zum Erfüllungsgrad dieser Punkte vorgenommen. Zum Teil ergeben sich hieraus Fragestellungen, welche näher im Kapitel 6 oder 7 betrachtet werden.

Tabelle 5-5 Umsetzungsreife administrativer und technischer Rahmenbedingungen[291] - Teil 1
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Nicht funktionale Anforderung (inklusive Muss/Soll/Kann-Einschätzung)		Erfüllungsgrad (eigene Einschätzung)
Gesamtmodul			
13	Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus	Kann	? • Abschätzungsmethodik zur allgemeinen Einschätzung fehlt • individuelle Wirtschaftlichkeit schwer abschätzbar • vgl. Kapitel 6
14	Zulassungsfähigkeit	Muss	X • heute nicht gegeben • vgl. Abschnitt 7.2
15	Konformität zum rechtlichen Umfeld	Muss	X • Handlungs- und Klärungsbedarf in Bezug auf nationales und europäisches Eisenbahnrecht • Haftungsfragen rechtsverbindlich klären • vgl. Abschnitt 7.2
16	Konformität zum betrieblichen Regelwerk	Soll	X • Anforderungen, welche Prozesse des virtuellen Zugverbandes reglementieren[292], fehlen
Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}			
29	Verwendung und Management zweier voneinander unabhängiger „Over the Air“-Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}	Muss	✓ • bewährte Praxis zwischen zwei Fahrzeugen eines Zugverbandes
30	hohe Anforderungen an Verkehrs- und Übertragungsgüte (QoS)	Muss	X • QoS kann heute nicht erfüllt werden (vgl. Abschnitt 4.4)

[291] Zur besseren Orientierung wird die Nummerierung aus der Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 beibehalten.
[292] Zum inhaltlichen Anspruch von betrieblichen Regelwerken vgl. Walther (2012), S. 16.

Tabelle 5-6 Umsetzungsreife administrativer und technischer Rahmenbedingungen[293] - Teil 2
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Nicht funktionale Anforderung (inklusive Muss/Soll/Kann-Einschätzung)		Erfüllungsgrad (eigene Einschätzung)
Kommunikationsnetz			
31	Nutzung eines drahtlosen Kommunikationsnetzes, z.B. Mobilfunknetz (LTE-R, 5G-R) oder alternativ kabellose Ethernet-Lösung prüfen	Muss	X • LTE-R oder 5G-R sind heute noch nicht verfügbar (vgl. Abschnitt 4.4)
32	Ausbau des Kommunikationsnetzes und Gewährleistung einer ausreichend hohen QoS	Muss	X • QoS des heutigen Netzes genügt nicht für Anforderungen des automatisierten Folgens (vgl. Abschnitt 4.4)
EVU-Leitstelle			
33	Übermittlung der Information „Kuppelbereitschaft Slave“	Soll	✓ • Kommunikation Fahrzeug mit EVU-Leitstelle ist bewährte Praxis
34	Empfang der Information „Einrichten und Auflösen des Zugverbandes“	Soll	✓ • Kommunikation Fahrzeug mit EVU-Leitstelle ist bewährte Praxis
35	Zuordnung und Freigabe der zugverbandspezifischen Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}	Soll	✓ • Kommunikation Fahrzeug mit EVU-Leitstelle ist bewährte Praxis
36	zugverbandspezifische Diagnosedaten empfangen und auswerten	Kann	✓ • heute bewährte Praxis
Signalgesteuerte Bahnübergangsanlagen			
37	erhöhte Anforderungen an Bahnübergangssicherung	Muss	✓ • technisch machbar (vgl. Achszählkreisauswertung, Freigabe von Strecken-abschnitten)
Zugsicherungssystem			
38	Fahren im Nullabstand	Muss	X • Anwendung in spurgeführten Systemen sehr problematisch[294]
39	Fahren im flexiblen Blockabstand („Moving Block“)	Kann	✓ • grundsätzlich möglich ab ETCS Level 3 • vom klassischen Blockdenken lösen (vgl. „Protection zone“)

[293] Zur besseren Orientierung wird die Nummerierung aus der Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 beibehalten.
[294] Vgl. Stebens (2001), S. 15

Tabelle 5-7 Umsetzungsreife administrativer und technischer Rahmenbedingungen[295] - Teil 3
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Nicht funktionale Anforderung (inklusive Muss/Soll/Kann-Einschätzung)		Erfüllungsgrad (eigene Einschätzung)
Master und Slave (≙ alle potenziell virtuell zu kuppelnden Fahrzeuge)			
40	Eigendiagnose während der Zugfahrt	Soll	✓ • heute bewährte Praxis
41	Slave meldet sich zur Zugvollständigkeitskontrolle zyklisch bei Master	Soll	✓ • heute bewährte Praxis
42	Anpassungen in der Steuerungssoftware, sodass nach der Zugtaufe Master-Slave-Kommunikation, automatisiertes Folgen des Slaves und notwendige Systemzugriffe möglich sind	Muss	✓ • heute bei konventioneller Kupplung bewährte Umsetzungspraxis muss auf virtuelle Kupplung übertragen werden
43	Sensor zur Überwachung des Raumes zwischen Master und Slave	Soll	✓ • Rückgriff auf Umfeldsensorik für automatisiertes Fahren auf der Straße[296]
44	Zughaken zum Abschleppen der Fahrzeuge	Soll	✓ • heute in verschiedenen Ausführungen vorhanden
Zugbildung			
45	heutige Zugtaufe erweitern	Muss	✓ • Programmierung erfolgt auf Basis der Anforderungen
46	Konnektivität der zu kuppelnden Triebfahrzeuge für gemeinsame Zugfahrt gewährleisten	Muss	✓ • heute bei gekuppelten Fahrzeugen bewährte Praxis (Abstimmungsbedarf)

Deutlich wird, dass insbesondere fahrzeugseitige Anforderungen und Anforderungen an die Interaktion zwischen Fahrzeug und EVU-Leitstelle heute bereits einen hohen Reifegrad aufweisen. Die größten Herausforderungen liegen in der Herstellung und dem Betrieb der kommunikationstechnischen Voraussetzung sowie bei der Wirtschaftlichkeit und der Umsetzung notwendiger regulatorischer Anpassungen.

5.1.3 Zusammenfassung der Reifegradeinschätzung

Die Einschätzung der Einsatz- und Integrationsreifegrade hat gezeigt, dass sich die Modulkomponenten – isoliert betrachtet – bereits in anderen Anwendungen der täglichen Praxis bewährt haben, aber noch nicht nachgewiesen wurde, ob ihre für die virtuelle Kupplung notwendige Kombination und Interaktion technisch machbar ist. Hier besteht entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Der Entwicklungsstand der virtuellen Kupplung muss daher aus Systemsicht als sehr niedrig eingeschätzt werden ($ERG_M \triangleq 2$, $IRG_M \triangleq 1$).

[295] Zur besseren Orientierung wird die Nummerierung aus der Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 beibehalten.
[296] Vgl. Pelz (2016), Folie 23.

Die ergänzende Betrachtung der für die Umsetzung notwendiger technischer und administrativer Rahmenbedingungen unterstreicht diese Einschätzung. Abbildung 5-2 fasst den Forschungs- und Entwicklungsbedarf zusammen.

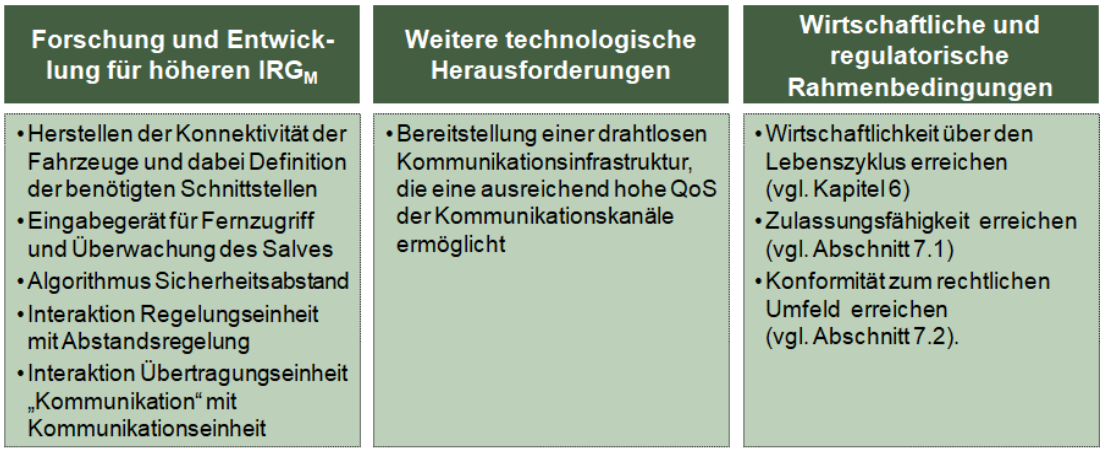


Abbildung 5-2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Umsetzung der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

5.2 Risikobeurteilung

Die virtuelle Kupplung ist ein Bauteil, dessen Ausfall und/oder Fehlfunktion die Sicherheit von Personen gefährdet und daher gemäß der Richtlinie 2006/42/EG als Sicherheitsbauteil einzustufen ist[297]. Hieraus resultiert für den Hersteller die Pflicht, eine Risikobeurteilung durchzuführen, um die geltenden Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen zu ermitteln, welche bei der Konstruktion und dem Bau der virtuellen Kupplung zu berücksichtigen sind. Im Rahmen der Risikobeurteilung sind unter anderem die Gefährdungen zu identifizieren und Risiken einzuschätzen.[298] Als Gefährdung werden potenzielle Quellen von Verletzungen oder Gesundheitsschäden definiert. Zur Einschätzung der Risiken sind Angaben sowohl zur Eintrittswahrscheinlichkeit als auch zum Schadensausmaß zu treffen.[299]

Während des Betriebs des virtuellen Zugverbandes sind zahlreiche Gefährdungssituationen vorstellbar, welche sich vom konventionellen Zugbetrieb unterscheiden und ein Risiko für Fahrgäste, Zugpersonal oder Dritte darstellen können und daher nachfolgend zu betrachten sind. Diese Risiken müssen handhabbar sein, sodass die virtuelle Kupplung mindestens die gleiche Sicherheit aufweist, wie die

[297] Vgl. RL 2006/42/EG, Artikel 2c.
[298] Vgl. RL 2006/42/EG, Anhang I., Allgemeiner Grundsätze, Absatz 1.
[299] Vgl. RL 2006/42/EG, Anhang I., 1.1.1.

konventionelle Kupplung[300]. Erfüllt die virtuelle Kupplung nicht mindestens die gleiche Sicherheit, kann weder ihre Technologieakzeptanz noch ihre Zulassung erreicht werden. Sicher ist ein System gemäß europäischer Verordnungen bei „Abwesenheit von unvertretbaren Risiken“[301]. Die dafür notwendigen Schutzmaßnahmen sind grundsätzlich entweder der aktiven Sicherheit zuzuordnen und reduzieren damit die Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung oder sie betreffen die passive Sicherheit und verringern das Schadensausmaß[302]. Sie können entweder vom Hersteller in die technische Umsetzung oder vom EVU in dessen Sicherheitsmanagementsystem[303] (zum Beispiel Evakuierungskonzept, abrufbare Systembetreuer für Störungsfälle) integriert werden. Mit strukturierten und erprobten Verfahren, wie zum Beispiel systematischen und mehrfachen Tests, formalen Prüfungen und Fehleranalysen oder doppelt vorhandene und sich gegenseitig überwachende und ersetzende Elektronik kann dabei ein sehr hohes Maß an funktionaler Sicherheit erreicht werden[304].

5.2.1 Auswahl und Beschreibung der anzuwendenden Methodik

Für die Identifikation und Bewertung von Gefährdungssituationen steht eine Vielzahl an Methoden zur Auswahl. Sie weisen unterschiedliche Untersuchungsansätze auf, verfolgen jedoch alle das Ziel, die Höhe des Risikos einzuschätzen, welches die Gewährleistung der Sicherheit von Anlagen oder Systemen gefährden könnte. Teils stammen die Methoden aus Normen, teils sind es Methoden, die in den Organisationen selbst entwickelt wurden.

Auf europäischer Ebene wurde 2004 mit der „Richtlinie über die Eisenbahnsicherheit“ ein harmonisierter Regelungsrahmen für die Eisenbahnsicherheit geschaffen[305]. Die Durchführungsverordnung (EU) 402/2013 der Kommission legt für die in der Richtlinie geforderte Evaluierung und Bewertung von Risiken gemeinsame Sicherheitsmethoden (Common Safety Methods – CSM) fest[306], die ein Verfahren zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus, der Erreichung der

[300] Vgl. EBO, § 2, Absatz 2.
[301] Vgl. Halbekath (2013), S. 13.
[302] Vgl. Hecht (2013), S.161.
[303] Vgl. Halbekath (2013), S. 14.
[304] Vgl. Wagner (2017), S. 14.
[305] Vgl. RL 2004/49/EG, Artikel 1.
[306] Vgl. VO (EU) 402/2013, Artikel 1, Absatz 1.

Sicherheitsziele und der Einhaltung der anderen Sicherheitsanforderungen beschreibt[307].

Im deutschen Eisenbahnsektor stellt die im Juni 2011 in Kraft gesetzte[308] Sicherheitsrichtlinie Fahrzeug (SIRF) und deren Weiterentwicklung eine Methodik zur Erfüllung der CSM dar[309]. Wenngleich im Rahmen dieser Arbeit kein Sicherheitsnachweis geführt werden soll, so stellen die im ersten Prozessschritt „System- und Gefährdungsidentifikation“[310] enthaltenden Teilschritte eine geeignete Möglichkeit dar, um die von der virtuellen Kupplung ausgehenden Gefährdungen systematisch zu erfassen und zu bewerten (vgl. Abbildung 5-3, oberer Teil).

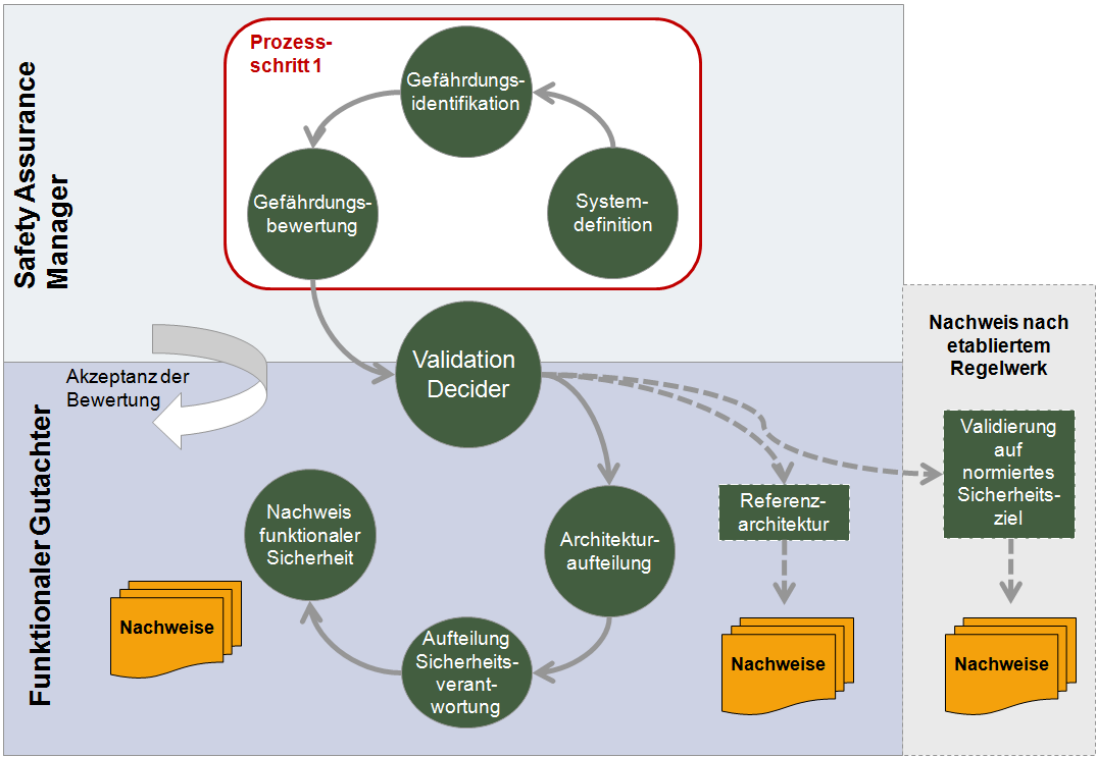


Abbildung 5-3 Safety-Prozess und Prozessschritte zur Nachweisführung
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 5

Nachfolgend wird daher der erste Prozessschritt der SIRF erläutert und im sich anschließenden Abschnitt auf die virtuelle Kupplung angewandt.

[307] Vgl. RL 2004/49/EG, Artikel 6, Absatz 3.
[308] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012a), S. 4.
[309] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 3.
[310] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012b), S. 3.

1. Systemdefinition und Funktionsidentifikation

Im ersten Schritt wird das zu betrachtende System (hier: das Modul „Virtuelle Kupplung“) definiert, indem seine Gesamt- und Teilfunktionen identifiziert werden[311]. Als Orientierung kann die DIN 25002-5 herangezogen werden, welche Fahrzeugfunktionen systematisch gliedert[312].

2. Gefährdungsidentifikation

Im Anschluss werden die dazugehörenden primären Gefährdungen für die Schutzbedürftigen identifiziert und die Sicherheitsanforderungsstufen (SAS) der Funktionen anhand der Gefährdungen bewertet[313]. Die Gefährdung, welche im Worst-Case-Szenario das größtmögliche realistische Schadenspotenzial gegenüber den Schutzbedürftigen aufweist, stellt die primäre Gefährdung dar[314]. Die Gruppe der Schutzbedürftigen umfasst: Fahrgäste, Bedienstete einschließlich des Personals von Auftragnehmern, Benutzer von Bahnübergängen, Unbefugte auf Eisenbahnanlagen sowie sonstige Personen[315].

3. Gefährdungsbewertung

Für die Bewertung der SAS (und damit der primären Gefährdung) ist zweistufig zu verfahren. Im ersten Schritt ist der technische Sicherheitsplan (TESIP-Funktionsliste) anzuwenden[316]. Die TESIP-Funktionsliste legt SAS für Fahrzeugfunktionen unter Berücksichtigung bekannter Betriebsbedingungen und Umgebungseinflüsse allgemein fest[317]. Bei der Anwendung der TESIP-Funktionsliste ist jedoch kritisch zu prüfen, ob anwendungsspezifische Ergänzungen oder Änderungen in der TESIP-Funktionsliste zum Abbilden der Besonderheiten des betrachteten Systems vorzunehmen sind[318].

Im zweiten Schritt erfolgt für alle nicht in der TESIP-Funktionsliste abgebildeten Funktionen die Bestimmung der SAS entsprechend des Einstufungsverfahrens nach Modul 400 der SIRF (vgl. Abbildung 5-4)[319].

[311] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 3.
[312] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 7.
[313] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 3.
[314] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 3.
[315] Vgl. RL 2004/49/EG, Anhang 1 Absatz 1, 2).
[316] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 5.
[317] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 8.
[318] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 5.
[319] Vgl. ebd., S. 6.

Im Ergebnis sind alle Funktionen, welche für die Sicherheit relevant sind (SAS > 0) identifiziert. Für diese Funktionen sind zu einem späteren Zeitpunkt Sicherheitsnachweise nach den Vorgaben der SIRF zu führen.[320]

Einstufungsindikator I = (S * W * E) / V	Sicherheitsanforderungsstufe SAS
I < 21	= SAS 0
21 ≤ I < 36	= SAS 1
36 ≤ I < 72	= SAS 2
72 ≤ I < 122	= SAS 3
122 ≤ I < 281	= SAS 4

S … Schaden
E … Expositionszeit
W … Eintrittswahrscheinlichkeit
V … Vermeidung

Abbildung 5-4 Bestimmung der SAS für nicht in der TESIP enthaltene Funktionen
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 6f

Im Einstufungsverfahren wird anhand der in Abbildung 5-4 dargestellten Gleichung ein Einstufungsindikator (I) bestimmt und die entsprechende SAS zugeordnet. Für die Variablen Schaden (S), Eintrittswahrscheinlichkeit (W), Expositionszeit (E) und Vermeidung (V) werden in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Ausprägungen die in Tabelle 5-8 dargestellten Werte verwendet.[321]

Die Parameterdefinitionen werden nachfolgend vorgestellt.

[320] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2013), S. 6.
[321] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 6.

Tabelle 5-8 Überführung der Parameterausprägungen in Parameterwerte
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 6

Parameter für den Schaden (S)			
Anzahl S_A		Verletzungsgrad S_V	
einer	3	LV	2
mehrere	5	SV	4
viele	8	Tote	9
Parameter für die Eintrittswahrscheinlichkeit (W)			
niedrig		1	
mittel		1,7	
hoch		3	
Parameter für die Expositionszeit (E)		Parameter für die Vermeidung (V)	
kurz	1	nicht möglich	1
lang	1,3	möglich	1,7

Schaden (S):

Bewertet wird die Auswirkung des größtmöglichen realistischen Schadens, der von der primären Gefährdung verursacht werden kann. Der Schaden berechnet sich, wie in Tabelle 5-9 dargestellt, aus dem Produkt der Anzahl der betroffenen Personen (S_A) und dem möglichen Verletzungsgrad dieser Personen (S_V).[322].

[322] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 3.

Tabelle 5-9 Definition Schaden (S)
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 3

Schaden (S) = S_A x S_V	
Anzahl S_A	
einer	1 Person
mehrere	1 < x ≤ 10 Personen
viele	> 10 Personen
Verletzungsgrad S_V	
Leichtverletzte (LV)	Gefährdung führt zu einem Unfall mit leichten Verletzungen (Prellungen, Frakturen) unterhalb von 2 Tagen Krankenhausaufenthalt und ohne irreversible Folgeschäden.
Schwerverletzte (SV)	Gefährdung führt zu einem Unfall mit mindestens 2 Tagen Krankenhausaufenthalt und/oder irreversible Folgeschäden.
Tote	Gefährdung führt zu einem Unfall mit tödlichen Verletzungen (Tod erfolgt innerhalb von 30 Tagen nach dem Unfall) oder zur sofortigen Todesfolge.

Eintrittswahrscheinlichkeit (W):

Die Wahrscheinlichkeit, ob das angenommene Schadensausmaß nach Ausfall der Funktion eintritt, wird anhand der Einstufungen gemäß Tabelle 5-10 bewertet[323].

Tabelle 5-10 Definition Eintrittswahrscheinlichkeit (W)
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 4

Eintrittswahrscheinlichkeit (W)	
niedrig	Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist niedrig, wenn das Schadensausmaß nach Versagen der Funktion nahezu ausgeschlossen ist.
mittel	Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist mittel, wenn das Schadensausmaß nach Versagen der Funktion weder nahezu ausgeschlossen ist, noch nahezu zwangsläufig eintritt.
hoch	Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist hoch, wenn das Schadensausmaß nach Versagen der Funktion nahezu zwangsläufig eintritt.

Expositionszeit (E):

Die Bewertung der Expositionszeit spiegelt die mittlere Zeitdauer wieder, in der die Schutzbedürftigen der möglichen primären Gefährdung ausgesetzt sind und wird entsprechend Tabelle 5-11 vorgenommen[324].

[323] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 4.

Tabelle 5-11 Definition Expositionszeit (E)
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 4

Expositionszeit (E)	
kurz	Die Expositionszeit ist kurz, wenn diese klein im Vergleich zur gesamten Aufenthaltszeit im Fahrzeugbereich ist.
lang	Die Expositionszeit ist lang, wenn der Schutzbedürftige während der überwiegenden Aufenthaltszeit im Fahrzeugbereich der möglichen primären Gefährdung ausgesetzt ist.

Vermeidung (V):

Ob es für die vom möglichen Schaden betroffenen Personen möglich ist, den Schaden nach Auftreten der primären Gefährdung zu vermeiden, wird anhand der Tabelle 5-12 berücksichtigt[325].

Tabelle 5-12 Definition Vermeidung (V)
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 5

Vermeidung (V)	
nicht möglich	Die gefährdete Person hat keine Möglichkeit, den Schaden zu vermeiden.
möglich	Die gefährdete Person hat durch eigenes Handeln Möglichkeiten, den Schaden zu vermindern oder zu vermeiden.

5.2.2 Anwendung des ersten SIRF-Prozessschrittes

Bevor der erste Prozessschritt der SIRF angewendet wird, sind zwei Aspekte zu betonen:

- Die Risikoeinschätzung erfolgt als Deltabetrachtung zwischen dem Betrieb im konventionellen und im virtuellen Zugverband, da davon ausgegangen wird, dass Gefährdungen des konventionellen Zugbetriebes im Rahmen der üblichen Zulassung untersucht werden. Betrachtet werden daher nur fahrzeugkonzeptbedingte Gefährdungen, die nicht im konventionell gekuppelten Betrieb existieren.
- Die hier formulierten Erläuterungen fokussieren ausschließlich Zugverbände, die aus zwei Einheiten bestehen. Gefährdungen, welche speziell bei längeren Zugverbänden existieren, sind gesondert zu betrachten.

Nachfolgend wird die in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Methodik angewandt.

[324] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 4.
[325] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 5.

1. Systemdefinition und Funktionsidentifikation

Das Modul „Virtuelle Kupplung“ kann zum aktuellen Zeitpunkt über die in Tabelle 5-13 dargestellten vier Funktionen definiert werden, welche alle in der TESIP-Funktionsliste enthalten sind. Möglich ist es, dass bei einer detaillierten technischen Spezifikation weitere Funktionen hinzukommen, für die das Verfahren ebenfalls anzuwenden wäre.

Tabelle 5-13 Anwendung der Kennzeichnungssystematik der DIN 25002-5 auf die virtuelle Kupplung
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012 d)

Lfd. Nr.	Haupt-fkt.	Teil-fkt.	Benennung der Kernfunktionen und Erläuterung in Bezug auf die virtuelle Kupplung
1	D	B	Fahrzeuge verbinden – Übertragung von Signalen zwischen den Fahrzeugen, ihre Übertragung ist zu überwachen und zu schützen. → Die virtuelle Kupplung verbindet Master und Slave zu einem virtuellen Zugverband, indem sie auf zwei voneinander unabhängigen Kommunikationskanälen die dafür notwendigen Informationen austauscht.
2	D	C	Fahrzeuge verbinden – Automatischen Kuppelvorgang (Kuppeln und Entkuppeln) gewährleisten Erläuterung: • Das Verbinden von Fahrzeugen muss im spezifizierten Prozess erfolgen. • Das Lösen von Fahrzeugen muss zum richtigen Zeitpunkt erfolgen. → Die virtuelle Kupplung gewährleistet einen automatischen Kuppelvorgang, indem die virtuelle Verbindung zwischen Master und Slave direkt vom Triebfahrzeugführer fernwirkend hergestellt und automatisiert während der gesamten virtuellen Zugfahrt aufrecht erhalten wird.
3	K		Fahrzeug übergeordnet leiten (steuern, diagnostizieren, überwachen) Erläuterung: • Zum Steuern des Fahrzeuges in allen Betriebsphasen müssen Signale erfasst, gespeichert, übertragen, verarbeitet/gewandelt und ausgegeben werden können. • Die jeweiligen Fahrzeugzustände sind zu erkennen und zu diagnostizieren. • Störeinflüsse sind zu kompensieren, Brandschäden durch Brandschutzkonzepte zu mindern. • Systemübergreifende Schutzfunktionen sind einzuleiten, die Einhaltung übergeordneter Grenzwerte zu überwachen. → Die virtuelle Kupplung sieht vor, dass der Slave dem Master automatisiert folgt und auf ihn ein Fernzugriff vom Master aus möglich ist, um die zugverbandrelevanten Funktionen umzusetzen.
4	L	B	Betriebliche Kommunikation und Datenübertragung gewährleisten → Die virtuelle Kupplung gewährleistet die betriebliche Kommunikation und Datenübertragung zwischen Master und Slave über zwei voneinander unabhängige Kommunikationskanäle f_{sD} und f_{wD}.

2. Gefährdungsidentifikation

Im zweiten Schritt wird jeder Funktion die primäre Gefährdung für die Schutzbedürftigen zugeordnet. Die betrieblichen Rahmenbedingungen und Besonderheiten sind zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.5).

Als Basis für die Bestimmung der primären Gefährdungen wird erneut auf die TESIP zurückgegriffen, welche auch eine abgestimmte Auflistung möglicher Gefährdungen und Risiken enthält[326]. Tabelle 5-14 ordnet den vier soeben identifizierten Kernfunktionen ihre jeweiligen primären Gefährdungen zu und beschreibt das dazugehörige Gefährdungsszenario.

Vergleichbare Auswirkungen sind allgemein aus den Systemgefährdungen „1. Kontrolle über Zugbewegung vermindert oder nicht gegeben“ sowie „2. Bremsung des Fahrzeugs unzeitig, vermindert oder nicht gegeben“ der TESIP-Funktionsliste[327] zu erwarten.

[326] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 8.
[327] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012 d).

Tabelle 5-14 Zuordnung der primären Gefährdungen der virtuellen Kupplung zu ihren Kernfunktionen
Quelle: eigene Darstellung

Lfd. Nr.	Haupt-fkt.	Teil-fkt	Kernfunktion (gemäß DIN 25002-5)	Primäre Gefährdung (in Anlehnung an Anlage 1 der TESIP)
1	D	B	Fahrzeuge verbinden – Übertragung von Signalen zwischen den Fahrzeugen, ihre Übertragung ist zu überwachen und zu schützen.	Teilgefährdung 9c „Ungewollte Zugtrennung durch sonstige Ursachen“ Gefährdungsszenario: Während der Fahrt als virtueller Zugverband wird die Übertragung der Signale unbemerkt unterbrochen, sodass die Verbindung zwischen Master und Slave nicht aufrecht gehalten werden kann. Der Slave erhält keine Information darüber, dass der Master gebremst hat. Es kommt zu einer Kollision, da der Slave seine Fahrdynamik nicht rechtzeitig anpassen konnte. Gefährdet sind alle im Zugverband befindlichen Personen.
2	D	C	Fahrzeuge verbinden – Automatischen Kuppelvorgang (Kuppeln und Entkuppeln) gewährleisten	Teilgefährdung 9c „Ungewollte Zugtrennung durch sonstige Ursachen“ Gefährdungsszenario: Während der Fahrt als virtueller Zugverband wird der Entkupplungsprozess unbemerkt ausgelöst. Es kommt zu einer ungewollten Zugtrennung. Zwischen Master und Slave besteht keine Verbindung mehr, sodass der Slave keine Information über das Bremsen des Masters erhält. Es kommt zu einer Kollision, da der Slave seine Fahrdynamik nicht rechtzeitig anpassen konnte. Gefährdet sind alle im Zugverband befindlichen Personen.
3	K		Fahrzeug übergeordnet leiten (steuern, diagnostizieren, überwachen)	Teilgefährdung 1c „Unbemerkt zu hohe Geschwindigkeit“ Gefährdungsszenario: Während der Fahrt als virtueller Zugverband wird vom Master nicht diagnostiziert, dass die Regelungssteuerung des Slaves eine Störung aufweist, in Folge derer der Slave mit zu hoher Geschwindigkeit folgt. Master und Slave kollidieren. Gefährdet sind alle im Zugverband befindlichen Personen.
4	L	B	Betriebliche Kommunikation und Datenübertragung gewährleisten	Teilgefährdung 1c „Unbemerkt zu hohe Geschwindigkeit“ Gefährdungsszenario: Während der Fahrt als virtueller Zugverband wird die Informationsübertragung unterbrochen in Folge derer der Slave zu spät bemerkt, dass der Master seine Geschwindigkeit reduziert hat. Master und Slave kollidieren. Gefährdet sind alle im Zugverband befindlichen Personen.

3. Gefährdungsbewertung

Im dritten Schritt sind die Gefährdungen zu bewerten und die SAS der einzelnen Funktionen zu bestimmen.

Die in der TESIP-Funktionsliste getroffenen Gefährdungseinstufungen basieren auf der Annahme eines konventionellen Zugbetriebs. Wie in den vorherigen Kapiteln dargestellt, unterscheidet sich der Betrieb des virtuellen Zugverbandes davon grundlegend und unterliegt somit einem deutlich anderen Gefährdungspotenzial. In Folge dessen wird nicht auf die Gefährdungsstufen der TESIP-Funktionsliste zurückgegriffen, sondern die SAS nach der oben beschriebenen Methode ermittelt.

Lfd. Nr. 1: „Fahrzeuge verbinden – Übertragung von Signalen zwischen den Fahrzeugen, ihre Übertragung ist zu überwachen und zu schützen“

- Primäre Gefährdung: Ungewollte Zugtrennung durch sonstige Ursachen
- Anzahl der betroffenen Personen: Viele → $S_A = 8$
- Verletzungsgrad: Tote → $S_V = 9$
- Eintrittswahrscheinlichkeit: mittel → $W = 1{,}7$
- Expositionszeit: lang → $E = 1{,}3$
- Vermeidung: nicht möglich → $V = 1$

→ $I = (8 * 9 * 1{,}7 * 1{,}3) / 1 = 159{,}12$ → SAS = 4

Lfd. Nr. 2: „Fahrzeuge verbinden – Automatischen Kuppelvorgang (Kuppeln und Entkuppeln) gewährleisten“

- Primäre Gefährdung: Ungewollte Zugtrennung durch sonstige Ursachen
- Anzahl der betroffenen Personen: Viele → $S_A = 8$
- Verletzungsgrad: Tote → $S_V = 9$
- Eintrittswahrscheinlichkeit: mittel → $W = 1{,}7$
- Expositionszeit: lang → $E = 1{,}3$
- Vermeidung: nicht möglich → $V = 1$

→ $I = (8 * 9 * 1{,}7 * 1{,}3) / 1 = 159{,}12$ → SAS = 4

Lfd. Nr. 3: „Fahrzeug übergeordnet leiten (steuern, diagnostizieren, überwachen)“

- Primäre Gefährdung: Unbemerkt zu hohe Geschwindigkeit
- Anzahl der betroffenen Personen: Viele → $S_A = 8$
- Verletzungsgrad: Tote → $S_V = 9$
- Eintrittswahrscheinlichkeit: mittel → $W = 1{,}7$
- Expositionszeit: lang → $E = 1{,}3$
- Vermeidung: nicht möglich → $V = 1$

→ $I = (8 * 9 * 1{,}7 * 1{,}3) / 1 = 159{,}12$ → SAS = 4

Lfd. Nr. 4: „Betriebliche Kommunikation und Datenübertragung gewährleisten“

- Primäre Gefährdung: Unbemerkt zu hohe Geschwindigkeit
- Anzahl der betroffenen Personen: Viele → $S_A = 8$
- Verletzungsgrad: Tote → $S_V = 9$
- Eintrittswahrscheinlichkeit: mittel → W = 1,7
- Expositionszeit: lang → E = 1,3
- Vermeidung: nicht möglich → V = 1

→ I = (8 * 9 * 1,7 * 1,3) / 1 = 159,12 → SAS = 4

5.2.3 Zusammenfassung der Risikobeurteilung

Die Zuordnung der primären Gefährdungen zu den Fahrzeugfunktionen hat ergeben, dass bei Einsatz der virtuellen Kupplung die „Unbemerkte zu hohe Geschwindigkeit“ und die „Ungewollte Zugtrennung durch sonstige Ursachen“ die größten Gefährdungen für die Schutzbedürftigen darstellen. Die dazu übergeordneten Systemgefährdungen lauten „1. Kontrolle über Zugbewegung vermindert oder nicht gegeben“ und „9. Ungewollte Zugtrennung“.

Die Gefährdungsbewertung hat ergeben, dass die vier betrachteten Funktionen die höchste SAS verlangen. Das Ausmaß des Schadens, die Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefährdung und die Expositionszeit werden im Worst-Case-Szenario als sehr hoch eingeschätzt und eine Vermeidung des Schadensausmaßes ist für die gefährdeten Personen nicht möglich. Deshalb müssen diese Funktionen die höchsten Sicherheitsanforderungen erfüllen und entsprechend hohe Schutzmechanismen sind festzulegen sowie bei der Entwicklung zu berücksichtigen. Beispielhaft können nachfolgende Schutzmechanismen genannt werden:

- Master und Slave überprüfen zyklisch, in engen Abständen, ob die Verbindung als virtueller Zugverband noch besteht (vgl. Abschnitt 4.5),
- Schnellbremsung des Slaves bei gefährdendem Unterschreiten des Sicherheitsabstandes sowie
- redundantes Auslegen der Komponenten und Informationsströme (möglich als Hardware-, Software-, Zeit- oder Informationsredundanz), zum Beispiel durch unterschiedliche, voneinander unabhängige technische Systeme zur Abstandsüberwachung.

Für die Umsetzung der betrachteten Kernfunktionen werden die Modulkomponenten „Übertragungseinheit Abstand“, „Regelungseinheit“ sowie „Schnittstellen Abstandsregelung“ benötigt. Entsprechend sind auch an sie höchste

Sicherheitsanforderungen zu stellen. Der Hersteller muss die Schadensrisiken soweit wie ihm möglich begrenzen, indem er durch Konstruktion, Instruktion und Produktbeobachtung identifizierte erforderliche Maßnahmen zur Gefahrvermeidung ergreift. Das EVU muss darüber hinaus sein Sicherheitsmanagementsystem[328] entsprechend ausrichten (zum Beispiel Evakuierungskonzept, abrufbares Entstörungspersonal). Bei der Entwicklung des Sicherheitskonzeptes sind auch die Reaktionen des Systems bei auftretenden Gefährdungen zu definieren: So ist der Stillstand der Fahrzeuge zwar als sicherer Betriebszustand zu bewerten, aber nicht in jedem Gefährdungsfall ist eine Schnellbremsung des Slaves oder des Masters die optimale Reaktion. Die Definition des „sicheren Zustands“ und die Rückfallkonzepte für den Umgang mit diesen Situationen fallen entsprechend sehr unterschiedlich aus. Zum Beispiel werden heute je nach Grad der Gefährdung Halte in Tunneln aus Evakuierungsgründen möglichst vermieden.

Es wurde bereits an verschiedenen Stellen darauf hingewiesen, dass der Betrieb des virtuellen Zugverbandes anderen Gefährdungen unterliegt als der Betrieb des konventionellen, Zugverbandes. Da hiermit wesentliche Fragestellungen einhergehen, die für eine Einschätzung der technischen Umsetzbarkeit der virtuellen Kupplung relevant sind, werden im sich anschließenden Abschnitt ergänzend fahrzeugkonzeptbedingte Gefährdungen betrachtet.

5.3 Ergänzende Betrachtung fahrzeugkonzeptbedingter Gefährdungen

Die hier zu betrachtenden Gefährdungen resultieren aus den zwei Kernmerkmalen der virtuellen Kupplung (vgl. Abschnitt 4.1):

1) Erhöhung des Automatisierungsgrades im Fahrbetrieb (berührungslos) sowie
2) drahtlose Übertragung der dafür notwendigen Informationen.

Die Gefährdungen entstehen im Fahrzeug, in der Infrastruktur und in der drahtlosen Informationsübertragung. Nachfolgend werden für die zwei Kernmerkmale mögliche Gefährdungen, Schäden und Schutzmechanismen vorgestellt. Zum Teil wird dabei auf Schutzmechanismen verwiesen, welche bereits in vorherigen Kapiteln genannt wurden.

[328] Vgl. Halbekath (2013), S. 14.

5.3.1 Erhöhung des Automatisierungsgrades im Fahrbetrieb

Die hier zu betrachtenden Gefährdungen entstehen, da der Slave dem Master berührungslos automatisiert folgt und erfordern unterschiedliche Schutzmechanismen. Denn wenngleich nach einhelliger Meinung der Experten eine höhere Automatisierung zu einem höheren Sicherheitsstandard führt[329], steigt gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass technische Fehler auftreten. Während des Fahrbetriebs existieren verschiedene Gefährdungssituationen, die zum Teil gerade aufgrund des Fehlens eines Fahrers entstehen oder aus der Notwendigkeit resultieren, das Fahrverhalten von Master und Slave für einen stabilen Zugverband möglichst ähnlich zu halten.

Unerwartet verringertes Beschleunigungs- oder Bremsvermögen

Im Rahmen der Zugtaufe tauschen Master und Slave ihr Beschleunigungs- und Bremsvermögen aus, um sicherzustellen, dass gemeinsam ein sicherer Betrieb gefahren werden kann. Taktgebend ist die schwächste Einheit des virtuellen Zugverbandes (vgl. Abschnitt 4.4 und 4.5). Ein Gefährdungsfall liegt dann vor, wenn der Slave unerwartet und vom Master unbemerkt über ein eingeschränktes Beschleunigungs- oder Bremsvermögen verfügt. Ist es beispielsweise während der Fahrt als virtueller Zugverband notwendig, eine stärkere Betriebsbremsung auszuführen, ist es möglich, dass der Slave mit dem Master kollidiert, da dieser seine Geschwindigkeit nicht schnell genug reduzieren konnte. Darüber hinaus ist es möglich, dass der Zugverband in Folge der verringerten Leistungsfähigkeit nicht mehr stabil gehalten werden kann, da es dem Slave nicht möglich ist, dem Master zu folgen. Der Slave muss dann sicher zum Halten kommen können. Mögliche Ursachen für ein eingeschränktes Leistungsvermögen sind zum Beispiel Störungen der Fahrzeugsteuerung, Schäden am Antriebsstrang oder fehlender Kraftstoff.

→ Sicherzustellen ist, dass sich der Triebfahrzeugführer des Masters, beispielsweise über entsprechende Diagnoseelemente, jederzeit darüber informieren kann, ob die Fahrzeugkomponenten von Master und Slave, welche für die Fahrt als virtueller Zugverband benötigt werden, vollständig funktionstüchtig sind (Fernüberwachung).

[329] Vgl. Breustedt (2017), S. 33.

Kurzzeitige Traktionsunterbrechungen

Das Betriebskonzept des virtuellen Zugverbandes sieht vor, dass beide Triebfahrzeuge unabhängig voneinander angetrieben werden. Traktionsunterbrechungen, zum Beispiel aufgrund von Störungen in der Motorsteuerung oder aufgrund von Bügelspringen auf vereisten Oberleitungen, können kurzzeitig kleinere Unregelmäßigkeiten im Fahrverhalten bewirken. Sind diese möglichen Unregelmäßigkeiten bei der Bestimmung des einzuhaltenden Sicherheitsabstands nicht berücksichtigt, kann es zu falschen Anpassungen des Fahrverhaltens des Slaves kommen. Die Gefahr einer Kollision ist erhöht.

→Bei der Berechnung des einzuhaltenden Sicherheitsabstands zwischen Master und Slave ist ein Sicherheitsparameter vorzusehen, der mögliche Unregelmäßigkeiten des Fahrverhaltens ausgleicht.

Fehlende reversible und irreversible Energieverzehrelemente an der Kupplung

Die reversiblen und irreversiblen Energieverzehrelemente der konventionellen Kupplung dienen dem Ausgleich von Stößen, die zum Beispiel beim Kontakt oder dem Aufprall mit anderen Fahrzeugen entstehen können[330]. Bei der virtuellen Kupplung fehlen diese Elemente und können entsprechend keinen Einfluss auf den Energieverzehr in Crash-Situationen nehmen. Kollidieren Master und Slave, ergibt sich damit gegenüber einem konventionell gekuppelten Zugverband ein erhöhtes mögliches Schadensausmaß.

→Die konstruktive Auslegung und Gestaltung der übrigen Fahrzeugelemente, insbesondere der Front und des Untergestells sind hinsichtlich ihrer Rolle in Crash-Situationen zu überprüfen. Ein möglicher Ansatzpunkt stellt eine Weiterentwicklung des heute bereits verwendeten Aufkletterschutzes und der Puffer dar. Darüber hinaus ist zu prüfen, inwieweit die konventionelle Kupplung unter Aufrechterhaltung des Energieverzehrs zu einer virtuellen Kupplung weiterentwickelt werden kann.

[330] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 22.

Vorzeitige Freigabe der Bahnübergangsanlage

Wird der Bahnübergang freigegeben, bevor der Slave diesen überquert hat, sind Teilnehmer des Straßen- und Fußgängerverkehrs gefährdet. Gegenüber dem konventionellen Zugbetrieb besteht hier ein erhöhtes Risiko, da es aufgrund der Lücke zwischen Master und Slave für die Wartenden schwieriger ist, zu erkennen, ob alle Zugteile den Bahnübergang passiert haben.

→ Je nach Steuerungskonzept gibt es unterschiedliche Varianten zum Schließen und Öffnen der Bahnübergangsanlagen. Die Steuerung ist so zu wählen, dass ein frühzeitiges Öffnen nicht möglich ist (vgl. Abschnitt 4.7).

5.3.2 Drahtlose Informationsübertragung

Die hier zu betrachtenden Gefährdungen resultieren aus der drahtlosen Informationsübertragung und umfassen einerseits Gefährdungen im Kontext der Kommunikationsinfrastruktur und andererseits Gefährdungen in Folge von unberechtigten Fremdeinwirkungen.

Verzögerte Datenübertragung

Die Regelungseinheit des Slaves bestimmt den Ist- und Sicherheitsabstand zwischen Master und Slave und übermittelt notwendige Änderungen des Fahrverhaltens an dessen Abstandssteuerung (vgl. Abschnitt 4.3). Für die Bestimmung der Abstände werden Informationen benötigt, die vom Master zum Slave über einen virtuellen Kommunikationskanal übermittelt werden. Die Informationen unterliegen damit der Gefahr, dass sie zum Beispiel aufgrund von Verbindungsstörungen verzögert zugestellt werden. Eine Folge könnte sein, dass die Regelungseinheit Datensätze verschiedener Zeitpunkte für die Bestimmung des Abstandes verwendet und damit ein falsches Ergebnis erhält. Der Abstand zwischen Master und Slave kann zum Beispiel als zu hoch angenommen werden; die Gefahr einer Kollision steigt. Gleiches ist denkbar, wenn Bremssignale zu spät vom Slave empfangen werden, sodass dieser nicht mehr rechtzeitig reagieren kann.

→Es ist eine Möglichkeit vorzusehen, welche die Synchronität der Daten gewährleistet (zum Beispiel Zeitstempel).

→Die QoS der Kommunikationskanäle ist kontinuierlich zu überwachen, um die Gefahr von verzögerten Datenübertragungen frühzeitig zu erkennen.

Unterbrechung oder Ausfall der virtuellen Verbindung

Kommt es während der Fahrt zu einer Unterbrechung der virtuellen Verbindung von Master und Slave, kann dies zu Verzögerungen bei der Datenübertragung führen, sodass Datenpakete verzögert oder nicht zugestellt werden. Auch ist es vorstellbar, dass der Abstand zwischen Master und Slave nicht korrekt bestimmt werden kann. Bei einer längeren Unterbrechung oder einem Komplettausfall der Kommunikationsverbindung besteht die Möglichkeit, dass der Slave weder vom Master aus gesteuert, noch ihm automatisiert folgen kann. Der Slave muss dann sicher zum Halten kommen können, da sonst die Gefahr einer Kollision steigt.

Ursachen können zum Beispiel eine geringe QoS der Kommunikationskanäle in Folge unzureichender Funkausleuchtung sein, welche häufiger im Wald, Tunnel oder in ländlichen Gebieten vorherrscht. Dies ist insbesondere kritisch für die Übertragung von Geschwindigkeits- und Positionsdaten zu sehen.

→ Der vorgesehene Abstandssensor muss kontinuierlich den Ist-Abstand zwischen Master und Slave bestimmen und redundant arbeiten, um für die Überprüfung der Einhaltung des Sicherheitsabstandes genutzt werden zu können (vgl. Abschnitt 4.3). Möglich ist zum Beispiel eine doppelte Ausführung des technischen Systems.

→ Die QoS der Kommunikationskänale ist kontinuierlich zu überwachen, um die Gefahr von Unterbrechungen des Kommunikationskanals frühzeitig erkennen zu können.

→ Bei einem längeren Ausfall der Kommunikationsverbindung ist im Slave eine automatische Schnellbremsung auszulösen. Die Streckenräumung erfolgt dann durch manuelles Weiterfahren oder Abschleppen über die in den Fahrzeugen vorhandene mechanische Notkupplung (vgl. Abschnitt 4.6).

Unerwarteter und plötzlicher Anstieg der Informationstotzeit

In die Berechnung des einzuhaltenden Sicherheitsabstandes (vgl. Abschnitt 4.3) finden verschiedene Zeitparameter Eingang, die der Slave für seine Reaktion auf Änderungen der Fahrdynamik des Masters benötigt und die damit eine sogenannte Informationstotzeit darstellen.

Es besteht die Gefahr, dass sich mehrere Eingangsgrößen unerwartet stark und plötzlich verändern, sodass die Regelungseinheit notwendige Änderungen des Sicherheitsabstandes zu spät weiterleiten kann und der Fahrzeugabstand zu klein wird. Die Gefahr einer Kollision steigt.

→ Um die Differenz der beiden zu vergleichenden Abstände möglichst gering zu halten, sind die Parameter der Informationstotzeit, soweit wie technisch möglich, zu minimieren.

Unberechtigte Eingriffe in die Steuerung des Slaves

Außer der funktionalen Sicherheit („Safety“) ist der Schutz vor unberechtigten Eingriffen („Security“) von wesentlicher Bedeutung für den sicheren Betrieb der Fahrzeuge und gewinnt im Eisenbahnsektor zunehmend an Relevanz und Aufmerksamkeit[331]. Die virtuelle Kupplung verstärkt diese Bedeutung, da die Störbarkeit von virtuell gekuppelten Fahrzeugen im Vergleich zu physisch verbundenen Fahrzeugen deutlich erhöht ist (vgl. Abschnitt 7.3).

Da der Slave zwar einen Führerstand besitzt, dieser aber nicht besetzt ist und je nach Personaleinsatz, der Slave ohne Zugbegleiter fährt, besteht zudem daraus eine erhöhte Gefahr, dass sich Dritte unberechtigten Zugang zum Führerstand des Slaves verschaffen, die Funktion des automatisierten Folgens beenden und das Fahrzeug manuell steuern.

Das Risiko eines mutwillig gestörten, fremdgesteuerten oder lahmgelegten Betriebs ist gegenüber dem konventionellen Betrieb deutlich gesteigert.

→ Es ist sicherzustellen, dass sich unberechtigte Dritte keinen Zugang zum Führerstand des Slaves verschaffen können.

→ Die Security muss fahrzeugseitig sichergestellt sein. Dies betrifft sowohl die Kommunikationskanäle, über welche die Daten ausgetauscht werden, als auch die Sensoren und Schnittstellen, über welche die Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Dabei sind unter anderem Fragen zur Authentifizierung, Verschlüsselung, Datenintegrität und -hoheit zu klären.

[331] Vgl. Meyer zu Hörste (2017b), S. 38.

→ Die notwendigen regulatorischen Leitplanken müssen gesetzt und hierfür notwendige Gesetze umgesetzt werden. Die bereits vorhandenen Aktivitäten der verschiedenen Normungsorganisationen sind zu berücksichtigen.

5.3.3 Zusammenfassung notwendiger Schutzmechanismen aufgrund fahrzeugkonzeptbedingter Gefährdungen

Aus dem Fahrzeugkonzept der virtuellen Kupplung resultieren sowohl Gefährdungen im Kontext des erhöhten Automatisierungsgrades des Fahrbetriebs als auch im Kontext der drahtlosen Übertragung der dafür notwendigen Informationen.

Im Ergebnis ist das im Abschnitt 4.9 vorgestellte Anforderungsprofil um die in Abbildung 5-5 zusammengefassten Anforderungen und Schutzmechanismen zu ergänzen. Weiterhin wurde gezeigt, dass besonders großer Handlungsbedarf im Bereich des Schutzes vor unberechtigten Zugriffen (Security) besteht, sodass sich hiermit in Abschnitt 7.3 detaillierter befasst wird.

Master und Slave	• Diagnoseelement im Master zur Überwachung des Slaves • Weiterentwicklung Crash-Konzept • Abstandssensor zur redundanten Bestimmung des Ist-Abstandes (vgl. Abschnitt 4.3) • Schnellbremsung bei längerem Verbindungsausfall • mechanische Notkupplung (vgl. Abschnitt 4.6) • unberechtigten Zugang zum Slave-Führerstand verhindern • Security fahrzeugseitig gewährleisten
Regelungseinheit/ Berechnung Sicherheitsabstand	• Sicherheitsparameter berücksichtigen, der mögliche Unregelmäßigkeiten im Fahrverhalten abbildet • Informationstotzeit soweit wie technisch möglich reduzieren
Kommunikations-kanäle	• Synchronität der Daten gewährleisten • QoS kontinuierlich überwachen • Security gewährleisten
Signalgesteuerte Bahnübergangs-anlagen	• frühzeitiges Öffnen der Bahnübergangsschranke ausschließen (vgl. Abschnitt 4.7)
Regulatorische Anforderungen	• regulatorische Leitplanken für Security setzen

Abbildung 5-5 Anforderungen aufgrund der fahrzeugkonzeptbedingten Gefährdungen
Quelle: eigene Darstellung

5.4 Zwischenfazit zur technischen Umsetzbarkeit

Ein technisches Risiko besteht insbesondere immer dann, wenn nichtbewährte Technik zur Anwendung kommen soll. Um dieses Risiko einschätzen zu können, wurde daher im Rahmen dieses Kapitels untersucht, inwieweit das Konzept der virtuellen Kupplung technisch umsetzbar ist und welche potenziellen Gefährdungen aus ihrem Einsatz resultieren.

Die im ersten Schritt anhand des VDB-Reifegradmodells durchgeführte Einschätzung zum technischen Reifegrad (vgl. Abschnitt 5.1) ergab, dass die erforderlichen Funktionalitäten der einzelnen Modulkomponenten heute bereits verfügbar sind. Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht jedoch bei der für die virtuelle Kupplung erforderlichen Interaktion der Modulkomponenten. Der Entwicklungsstand der virtuellen Kupplung muss daher als sehr niedrig eingeschätzt werden ($ERG_M \triangleq 2$, $IRG_M \triangleq 1$). Details können dem Abschnitt 5.1.3 entnommen werden und sind in Abbildung 5-2 zusammengefasst. Darüber hinaus konnten für die erfolgreiche Etablierung des Einsatzes der virtuellen Kupplung erste notwendige Rahmenbedingungen abgeleitet werden, welche in den nachfolgenden Kapiteln zu diskutieren sind: Wirtschaftlichkeit über den Lebenszyklus (vgl. Kapitel 6) sowie Konformität zum rechtlichen Umfeld und Zulassungsfähigkeit (vgl. Abschnitt 7.2).

Im zweiten Schritt dieses Kapitels wurde eine Risikobeurteilung anhand des ersten Prozessschrittes der SIRF durchgeführt (vgl. Abschnitt 5.2). Sie ergab, dass die größten Gefährdungen aus den Modulkomponenten „Übertragungseinheit Abstand“ und „Regelungseinheit“ sowie aus den „Schnittstellen Abstandsregelung“ hervorgehen können und diese daher höchste Schutzmechanismen und definierte Rückfallkonzepte aufweisen müssen.

Das Betriebskonzept der virtuellen Kupplung unterscheidet sich aufgrund des automatisierten, führerlosen Folgens des Slaves erheblich vom konventionellen Zugbetrieb. Daher wurden die Gefährdungen aus der Erhöhung des Automatisierungsgrades des Fahrbetriebs und aus der dafür verwendeten drahtlosen Datenübertragung separat betrachtet (vgl. Abschnitt 5.3). Im Ergebnis, das in Abbildung 5-5 zusammengefasst ist, konnten weitere Anforderungen und notwendige Rahmenbedingungen abgeleitet werden. Besondere Bedeutung kommt dem Thema Security zu (vgl. Abschnitt 7.3).

Abbildung 5-6 fasst die Ergebnisse dieses Kapitels zusammen.

Technischer Reifegrad	Gefährdungsanalyse	Fahrzeugkonzeptbed. Gefährdungen
Methode: VDB-IRG/ERG-Modell	**Methode:** SiRF, erster Prozessschritt	**Methode:** ergänzende Betrachtung
Ergebnis: • Funktionalitäten der Modulkomponenten heute bereits verfügbar • F&E-Bedarf bei notwendiger Interaktion der Komponenten sowie bei weiteren technologischen Fragestellungen • Handlungsbedarf zur Herstellung notwendiger Rahmenbedingungen (Wirtschaftlichkeit, Zulassung, rechtliches Umfeld)	**Ergebnis:** • höchste Sicherheits-anforderungsstufe und starke Schutzmechanismen für die Kernfunktionen der virtuellen Kupplung • entsprechend hohe Sicherheitsanforderungen an die Modulkomponenten „Übertragungseinheit Abstand“ und „Regelungseinheit“ sowie an die Schnittstellen zur Abstandsregelung	**Ergebnis:** • Erhöhung Automatisierungs-grad im Fahrbetrieb → weitere Anforderungen u.a. an Sicherheitsabstand, Fernüberwachung Slave, und Crashkonzept • drahtlose Informations-übertragung → weitere Anforderungen u.a. an QoS des Kommunika-tionskanals, Sicherheits-abstand und Security

Abbildung 5-6 Zwischenfazit zur technischen Umsetzbarkeit
Quelle: eigene Darstellung

In diesem Kapitel wurde deutlich, dass die virtuelle Kupplung nur dann erfolgreich am Markt etabliert werden kann, wenn sie die dafür notwendigen Rahmenbedingungen erfüllt. Nach Meinung von Experten können zudem Innovationen insbesondere dann schwer in den Markt gebracht werden, wenn die Finanzierungs- und Zulassungsrisiken zu hoch, der Fokus allein auf die Investitionskosten gelegt wird und wenn nur unzureichende Anreizsysteme existieren[332].

In den zwei sich anschließenden Kapiteln werden daher Erfolgsfaktoren im Kontext der Wirtschaftlichkeit und im Kontext prozessualer und rechtlicher Rahmenbedingungen näher untersucht.

[332] Vgl. SCI, KCW (2012), Folie 39.

6 Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit

Investitionen in Schienenfahrzeuge und ihre Komponenten bestimmen aufgrund der langen Lebensdauer der Schienenfahrzeuge über einen langen Zeitraum über Sicherheit, Leistung, Qualität und Kosten des Verkehrsangebotes. Es besteht daher ein besonders hoher Druck, nicht nur die technisch und betrieblich, sondern auch die wirtschaftlich besten Investitionsentscheidungen zu treffen. In der Regel können sich neue Systeme nur dann am Markt etablieren, wenn sie bei gleichem oder höherem Funktionsumfang mindestens die gleiche Sicherheit und eine verbesserte Wirtschaftlichkeit aufweisen. Gesamtwirtschaftliche Untersuchungen, welche möglichst alle relevanten Effekte berücksichtigen sollen, können daher als sinnvolle Unterstützung bei der Entscheidungsfindung genutzt werden.

In diesem Kontext ist es das Ziel dieses Kapitels, eine erste Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer virtuellen Kupplung geben zu können. Hierzu werden die anzuwendende Methodik ausgewählt und theoretisch beschrieben (Abschnitt 6.1), für die vorliegende Fragestellung spezifiziert (Abschnitt 6.2) und schließlich exemplarisch angewandt (Abschnitt 6.3). Im Zwischenfazit werden eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit der virtuellen Kupplung getroffen und wirtschaftlichen Risiken im Kontext ihrer Einführung abgeleitet (Abschnitt 6.4).

6.1 Auswahl und Beschreibung der anzuwendenden Methodik

Im Rahmen der Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der virtuellen Kupplung soll die Frage beantwortet werden, ob es für den Investor aus wirtschaftlicher Sicht über die gesamte Nutzungsdauer der virtuellen Kupplung betrachtet sinnvoll ist, anstelle einer konventionellen Kupplung eine virtuelle Kupplung zu verwenden. Weiterhin soll die nachfolgende Betrachtung die Transparenz für die, mit dem Einsatz der virtuellen Kupplung verbundenen Kosten und den Nutzen erhöhen.

Im Transportwesen werden für gesamtwirtschaftlich ausgerichtete Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen vor allem drei Verfahren verwendet:

- Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)
- Nutzwert-Analyse (NWA) sowie
- Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA).

Es handelt sich in allen Fällen, um methodisch unterschiedliche Formen von Nutzen-Kosten-Rechnungen, die alle auf die Betrachtung der gesamtwirtschaftlichen Wirkung einer Investition ausgerichtet sind.[333] Je nach Verfahren werden die prognostizierten Kosten und Nutzen monetär oder qualitativ gegenübergestellt[334]. Für Kosten und Nutzen, welche zum Zeitpunkt der Bewertung noch nicht sicher bestimmt werden können, werden Erwartungswerte ermittelt und verwendet. Diese gehen jedoch mit der gleichen Gewichtung in die Bewertung ein, wie Kosten und Nutzen, die sicher bestimmt werden können. Zudem werden die Verfahren vornehmlich dazu angewandt, um eine Prioritätenreihung vorzunehmen[335]. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch die Wirtschaftlichkeit nur einer Alternative, nämlich die des Einsatzes der virtuellen Kupplung, eingeschätzt werden soll und es aus Sicht der Autorin wichtig ist, dass Unsicherheiten in der Datenbasis[336] abgebildet werden, die aus der niedrigen technologischen Reife der virtuellen Kupplung und der Szenarienvielfalt ihres Einsatzes resultieren, erscheinen die drei genannten Methoden als nicht hinreichend geeignet. Eine interessante Alternative, welche die genannten Anforderungen hingegen erfüllt, ist die Nutzenorientierte Wirtschaftlichkeits-schätzung (NOWS), welche daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit als Methodik zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit angewendet wird.

Das NOWS-Verfahren wurde in den 1980er Jahren zur beteiligungs- und nutzenorientierten Bewertung von technischen Investitionen entwickelt. Diese Wirtschaftlichkeitsanalyse mit Risikoabstufung stellt eine Weiterentwicklung der Nutzenanalyse dar und basiert im Kern auf differenzierten, monetären Kosten- und Nutzenschätzungen.[337] Im NOWS-Verfahren erfolgt keine separate Betrachtung einzelner Zeitpunkte innerhalb des Betrachtungszeitraums. Es wird also nicht die

[333] Vgl. Aberle (2009), S. 471f.
[334] Vg. Blome (2017), S. 17.
[335] Vgl. Aberle (2009), S. 471.
[336] Gemeint sind verschiedene Wahrscheinlichkeiten in Bezug auf das Eintreten und die Ausprägung der Einflussfaktoren.
[337] Vgl. Roth, Doluschitz (2007), S. 5.

Frage beantwortet, ab welchem Zeitpunkt sich die Investition lohnt, sondern ob sie über den Betrachtungszeitraum hinweg wirtschaftlich ist. Aus diesem Grund ist es an dieser Stelle nicht relevant, zu welchem Zeitpunkt die Kosten oder Nutzen entstehen, sondern nur, wie hoch diese Werte insgesamt über den Betrachtungszeitraum hinweg sind. Auch ist es nicht Ziel des Verfahrens, eine „Komma-Prognose" zu geben, sondern eine grundsätzliche Abschätzung zur Wirtschaftlichkeit einer Investition treffen zu können.

Das Verfahren umfasst vier Schritte, welche nachfolgend auf der Basis von *Institut für Unternehmenskybernetik (2013)* beschrieben werden[338].

1. Schritt: Identifizieren und Einordnen sämtlicher investitionsrelevanter Aspekte in die Kosten-Nutzen-Matrix

Nachdem das Untersuchungsszenario aufgestellt wurde, sind sämtliche Kosten und Nutzen zusammenzustellen, welche während der Betrachtungsdauer auftreten können und für die Investitionsentscheidung relevant sind. Diese werden als Einflussfaktoren bezeichnet und sind in die Kosten-Nutzen-Matrix einzuordnen, indem sie den Kategorien „direkt", „indirekt" sowie „schwer erfassbar" zugeordnet werden. Die Abgrenzung der drei Kategorien kann der Tabelle 6-1 entnommen werden. Für eine ganzheitliche Bewertung ist es wesentlich, dass sowohl heute bereits bekannte und leicht bewertbare, als auch weiche und erst langfristig wirkende Kosten- und Nutzenpotenziale berücksichtigt werden.

Tabelle 6-1 Definition der Kategorien in der Kosten-Nutzen-Matrix
Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Institut für Unternehmenskybernetik (2013), S. 109

	Direkt	Indirekt	Schwer erfassbar
Kosten	• bekannte Kosten • leicht bewertbar	• zu erwartende, zukünftige Kosten	• schwer bewertbare Folgekosten
Nutzen	• direkte Einsparung von Kosten oder direkte neue Einnahmen	• zukünftige Einsparungen	• strategische Nutzen

[338] Vgl. Institut für Unternehmenskybernetik (2013), S. 108ff.

2. Schritt: Bewerten der Eintrittswahrscheinlichkeiten und Monetarisierung

Im zweiten Schritt sind die Einflussfaktoren hinsichtlich ihrer jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bewerten, die sich aus der Prognosesicherheit und dem vermuteten Eintrittszeitpunkt einer Prognose ableiten. Unterschieden wird nach hoher, mittlerer und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Unterleitung ermöglicht eine Aussage zur Verlässlichkeit des Eintritts der erwarteten Kosten und Nutzen und wird bei der Bewertung in unterschiedlichen Gewichtungen überführt.[339]

Im Anschluss werden die Einflussfaktoren in Geldeinheiten überführt (monetarisiert). Es ist darauf zu achten, dass bei der Monetarisierung der Geldwert angesetzt wird, welcher im aufgestellten Szenario die gesamte Betrachtungsdauer widerspiegelt. Im Ergebnis entstehen eine 3x3-Nutzen-Matrix und eine 3x3-Kosten-Matrix, welche jeweils in den einzelnen Zellen mehrere Einträge aufweisen können (vgl. Beispiel in Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2 Beispiel einer Kosten- und einer Nutzen-Matrix
Quelle: eigene Darstellung

Nutzen-matrix	Eintrittswahrscheinlichkeit		
Nutzenart	hoch	mittel	gering
Direkter Nutzen	N_1 = 90 Euro N_2 = 30 Euro	N_5 = 60 Euro	
Indirekter Nutzen	N_3 = 30 Euro N_4 = 20 Euro		N_8 = 10 Euro
Schwer erfassbarer Nutzen		N_6 = 40 Euro N_7 = 30 Euro	

Kosten-matrix	Eintrittswahrscheinlichkeit		
Kostenart	hoch	mittel	gering
Direkte Kosten	K_1 = 40 Euro		
Indirekte Kosten	K_2 = 10 Euro	K_5 = 50 Euro	K_7 = 20 Euro
Schwer erfassbare Kosten	K_3 = 50 Euro K_4 = 20 Euro	K_6 = 40 Euro	

N_i … Nutzen K_i … Kosten

3. Schritt: Herleiten der Kosten- und Nutzen-Kurve

Im NOWS-Verfahren ist jede der neun Zellen der Nutzen- und Kostenmatrix einer Risikostufe zwischen eins und neun zugeordnet (vgl. Tabelle 6-3). Beispielsweise wird dem direkten Nutzen mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit die geringste Risikostufe (Risikostufe 1) zugewiesen, dem schwer erfassbaren Nutzen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit hingegen die höchste Risikostufe (Risikostufe 9).

[339] Vgl. Happe (2005), S. 39.

Tabelle 6-3 Risikostufen eins bis neun des NOWS-Verfahrens
Quelle: eigene Darstellung

Nutzen-matrix	Eintrittswahrscheinlichkeit		
Nutzenart	hoch	mittel	gering
Direkter Nutzen	R 1	R 3	R 6
Indirekter Nutzen	R 2	R 5	R 8
Schwer erfassbarer Nutzen	R 4	R 7	R 9

Kosten-matrix	Eintrittswahrscheinlichkeit		
Kostenart	hoch	mittel	gering
Direkte Kosten	R 1	R 3	R 6
Indirekte Kosten	R 2	R 5	R 8
Schwer erfassbare Kosten	R 4	R 7	R 9

R = Risikostufe

Zum Herleiten der Kosten- und Nutzen-Kurve sind zunächst in jeder einzelnen Zelle der beiden Matrizen die Summen der vorhandenen Zelleneinträge und damit der Nutzen beziehungsweise die Kosten je Risikostufe zu bilden. Im zweiten Schritt sind diese Zellensummen entlang der Risikostufen zu kumulieren (vgl. Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4 kumulierte Kosten und Nutzen (am Beispiel von Tabelle 6-2)
Quelle: eigene Darstellung

Risikostufe R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kumulierter Nutzen in Euro	120	170	230	230	230	230	300	310	310
Kumulierte Kosten in Euro	40	50	50	120	170	170	210	230	230

Die kumulierten Kosten und Nutzen werden als Liniendiagramm visualisiert (vgl. Abbildung 6-1). Auf der x-Achse werden die Risikostufen (R) und auf der y-Achse die kumulierten Nutzen und Kosten abgetragen. Zu beachten ist, dass die Risikostufen entgegengesetzt zu notieren sind: die Nutzen-Risikostufen steigen von links nach rechts an, während die Kosten-Risikostufen von rechts nach links ansteigen.

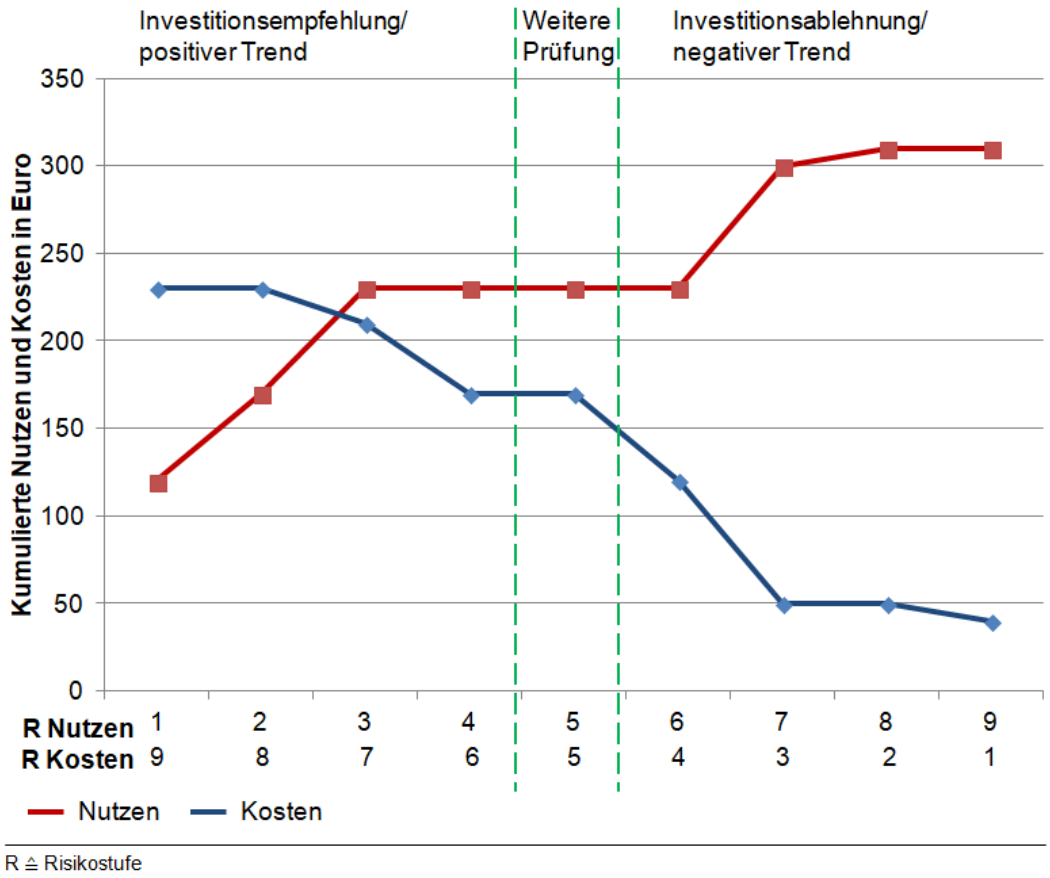


Abbildung 6-1 Kosten-Nutzen-Kurve auf Basis der in Tabelle 6-4 angenommenen Werte[340]
Quelle: eigene Darstellung

4. Schritt: Auswerten des Untersuchungsergebnisses

Zur Auswertung des Untersuchungsergebnisses wird der Schnittpunkt der Kosten- mit der Nutzenkurve betrachtet. Im Beispiel von Abbildung 6-1 liegt dieser bezogen Skala „Risikoabstufung Nutzen“ bei etwa 2,8.

Für den Fall, dass es keinen Schnittpunkt gibt, da die Kostenkurve in allen neun Stufen unterhalb der Nutzenkurve liegt, wird die Investition in jedem Fall als wirtschaftlich eingestuft. Liegt die Kostenkurve stets darüber, ist die Investition als unwirtschaftlich zu bewerten. Gibt es einen Schnittpunkt, hängt die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit von der Risikofreudigkeit des Entscheiders ab: Liegt der Schnittpunkt oberhalb von 1,0 und unter 4,5 in Bezug auf die Skala „Risikoabstufung Nutzen“ kann eine Investitionsempfehlung beziehungsweise ein positiver Trend ausgesprochen werden. Die Investition wird auch dann als wirtschaftlich eingestuft, wenn von einem pessimistischen Entscheider ausgegangen wird, welcher nur die

[340] Auf der x-Achse werden die Risikostufen (R) der Nutzen- und Kosten-Kurve entgegengesetzt abgetragen.

direkten, hochwahrscheinlichen Nutzen und alle Kosten berücksichtigt. Liegt der Schnittpunkt zwischen 4,5 und 5,5 in Bezug auf die Skala „Risikoabstufung Nutzen“ wird empfohlen, die Ausprägung der Einflussparameter hinsichtlich Vollständigkeit, Eintrittswahrscheinlichkeit und Monetarisierung zu überprüfen. Oberhalb von 5,5 liegt ein negativer Trend vor und es wird von der Investition tendenziell abgeraten. Nur optimistische Entscheider, welche alle Nutzen, aber nur die direkten und hochwahrscheinlichen Kosten berücksichtigen, würden diese als wirtschaftlich betrachten.[341]

Nachdem die einzelnen Schritte des NOWS-Verfahrens theoretisch erläutert wurden, wird das Verfahren nachfolgend für die vorliegende Fragestellung spezifiziert und schließlich im übernächsten Abschnitt beispielhaft angewandt.

6.2 Spezifizierung des NOWS-Verfahrens für die virtuelle Kupplung

Die Entscheidung, eine virtuelle Kupplung in die Fahrzeuge zu integrieren, muss vom Fahrzeugeigentümer, also in der Regel vom EVU oder dem Aufgabenträger, getroffen werden. Da sich die zu berücksichtigenden Kosten- und Nutzenparameter teilweise unterscheiden, werden nachfolgend die Perspektiven der EVU und Aufgabenträger zusammen betrachtet, also all jene Kosten und Nutzen berücksichtigt, welche für das EVU oder den Aufgabenträger investitionsrelevant sein könnten. In Abhängigkeit davon, wer die Investitionsentscheidung schließlich trifft, können einzelne Parameter entfallen. Diese sind in Tabelle 6-5 entsprechend gekennzeichnet. Auch der Betrachtungszeitraum variiert je nach Perspektive: Erfolgt die Einschätzung aus der Perspektive eines EVU, entspricht der Betrachtungszeitraum der Laufzeit des betrachteten Verkehrsvertrages. Wird hingegen die Perspektive der Aufgabenträger eingenommen, entspricht dieser der Lebensdauer der virtuellen Kupplung und ist unabhängig von einem Verkehrsvertrag.

Für eine ganzheitliche Betrachtung der wirtschaftlichen Potenziale und Risiken des Einsatzes der virtuellen Kupplung ist es wesentlich, dass außer den Kosten zu deren Einführung auch Effekte auf die Produkt- und Prozessqualität, die Kundenzufriedenheit, den Umsatz und den Gewinn abgebildet werden. Zur Spezifizierung des NOWS-Verfahrens sind daher im ersten Schritt alle investitionsrelevanten Kosten

[341] Vgl. Happe (2005), S. 39.

und Nutzen zusammenzutragen und in die Kosten-Nutzen-Matrix einzuordnen, auf welche der Einsatz der virtuellen Kupplung während ihrer Nutzungsdauer Einfluss hat oder haben könnte, für EVU oder Aufgabenträger investitionsrelevant sind und sich von der konventionellen Kupplung unterscheiden (vgl. Tabelle 6-5).

Tabelle 6-5 Kosten-Nutzen-Matrix „Einsatz virtuelle Kupplung“
Quelle: eigene Darstellung

	Direkt	Indirekt	Schwer erfassbar
Kosten	bekannte Kosten, leicht bewertbar a) Beschaffungskosten des Moduls b) Mehrkosten Neufahrzeuge c) Umrüstungskosten Bestandsfahrzeug d) Schulungskosten* e) Umrüstungskosten EVU-Leitstelle*	zu erwartende, zukünftige Kosten f) erhöhte Instandhaltungs-kosten	schwer bewertbare Folgekosten g) erhöhte Versiche-rungsprämie
Nutzen	direkte Einsparung von Kosten oder direkte neue Einnahmen h) Verringerung der Fahrzeug-beschaffungskosten i) Entfallene Kosten der konventionellen Kupplung	zukünftige Einsparungen oder Einnahmen j) Verringerung der Personal- und Energiekosten (Betriebskosten) k) Fahrgelderlöse aus Fahrzeugdisposition l) Erlöse aus Fahrzeugverleih	strategischer Nutzen m) Fahrgelderlöse aus Imagegewinn n) Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung o) erhöhte Gewinne beim Fahrzeug-verkauf p) Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen*

* entfällt, wenn Aufgabenträger Fahrzeughalter ist

Nachfolgend werden die einzelnen Parameter detailliert erläutert. Ziel ist es, die qualitativen Größen in quantitativ bestimmbare Größen zu überführen und in der Berechnung den gesamten Betrachtungszeitraum widerspiegeln zu können. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass bei der szenariospezifischen Anwendung Auf- und Abzinsungen zu berücksichtigen sind, um zu unterschiedlichen Zeitpunkten realisierte Zahlungsströme nach den Regeln der Zinseszinsrechnung vergleichbar zu machen[342].

Im Ergebnis dieses Abschnittes entsteht eine Auflistung aller Variablen, welche für die Durchführung des NOWS-Verfahrens benötigt werden und szenariospezifisch zu

[342] Vgl. Vischer, Bohun (1971), S. 1310.

monetarisieren sind. Die dadurch erreichte Transparenz und Nachvollziehbarkeit ermöglicht es dem Anwender, die getroffenen Annahmen zu einem späteren Zeitpunkt zu verifizieren und zu untersetzen sowie die Daten anwendungsspezifisch anzupassen.

6.2.1 Spezifizierung der Kostenparameter

Die Darstellung der Kostenparameter ist gegliedert in „Direkte Kosten“, „Indirekte Kosten“ und „Schwer erfassbare Kosten“.

Direkte Kosten

Die direkten Kosten umfassen bekannte Kosten, welche verhältnismäßig leicht zu ermitteln sind[343].

a) Beschaffungskosten des Moduls

Die Beschaffungskosten des Moduls zur technischen Umsetzung der virtuellen Kupplung sind einmalige Kosten und fallen für alle Fahrzeuge an, in welche die virtuelle Kupplung implementiert werden soll. Zu berücksichtigen sind die heutige Flottengröße, dessen angenommenes Wachstum im Betrachtungszeitraum sowie die Migrationsstrategie des Fahrzeughalters zur Implementierung der virtuellen Kupplung.

Da das Modul noch nicht existiert, sind für die erste Abschätzung die Kosten seiner Komponenten (Übertragungseinheiten „Abstand“ und „Kommunikation“, Regelungseinheit, Abstandssensor sowie Diagnoseeinheit) heranzuziehen. Diese Summe ist um einen Zuschlag zu ergänzen, der den im Abschnitt 5.1 beschriebenen notwendigen Forschungs- und Entwicklungsaufwand sowie den für das Modul notwendigen spezifischen Herstellungskosten entspricht (vgl. Tabelle 6-6).

[343] Vgl. Tabelle 6-1.

Tabelle 6-6 Kostenbestandteile beim Hersteller der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Konzept und Definition	Entwurf und Entwicklung	Herstellung
• Produktkonzept und Entwurfsanalyse	• Prototypenherstellung • Industrialisierung (z.B. Softwareentwicklung, Lieferantenauswahl) • Zulassungsfähigkeit (z.B. Kosten Nachweispläne) • Definition der benötigten Schnittstellen	• einmalige Kosten für notwendige Industrietechnik und Know-how-Aufbau • wiederkehrende Kosten für die Herstellung

Für die Modulkosten ergibt sich damit folgende Abschätzung:

Kosten Diagnoseeinheit
+ Kosten Übertragungseinheit „Abstand“
+ Kosten Regelungseinheit
+ Kosten Übertragungseinheit „Kommunikation“
+ Kosten Abstandssensor
+ Kosten für Forschung, Entwicklung und Herstellung beim Hersteller der virtuellen Kupplung
= Modulkosten

Zu berücksichtigen ist, dass sich die Modulkosten je nach Strategie der Hersteller nach einer bestimmten Anzahl verkaufter Module in Abhängigkeit entfallener Kosten für die Konzeption und Entwicklung des Moduls reduzieren können. Dieser Sachverhalt wird hier nicht abgebildet.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Modulkosten * (auszurüstende Neufahrzeuge + auszurüstende Bestandsfahrzeuge)

b) Mehrkosten für Neufahrzeuge

Außer den reinen Beschaffungskosten des Moduls entstehen für die Hersteller von Schienenfahrzeugen bei der Implementierung des Moduls weitere Kosten, die vom Käufer der Fahrzeuge zu tragen sind.

Grund sind die mit dem Einbau der virtuellen Kupplung verbundenen Anpassungen in den etablierten Fahrzeugkonzepten (zum Beispiel Steuerungssoftware, Crash-Konzept). Für die Abschätzung sind erneut die in Tabelle 6-6 genannten Aspekte, jedoch aus Sicht der Fahrzeughersteller, zu berücksichtigen. Vergleichbar mit den Modulkosten ist auch hier zu beachten, dass die Mehrkosten sich je nach Strategie der Schienenfahrzeughersteller nach einer bestimmten Anzahl verkaufter Fahrzeuge, reduzieren. Dies wird hier jedoch nicht abgebildet.

Für die Monetarisierung der Mehrkosten für Neufahrzeuge werden folgende Annahmen getroffen:

Kosten Forschung und Entwicklung zur Anpassung der Fahrzeugkonzepte
+ Kosten Umsetzung der Anpassung der Fahrzeugkonzepte
= Mehrkosten je Neufahrzeuge

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Mehrkosten je Neufahrzeug * Anzahl Neufahrzeuge

c) Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge

Es ist davon auszugehen, dass die Fahrzeughalter ihren vorhandenen Fahrzeugpark, aufgrund der langen Lebensdauer der Schienenfahrzeuge nicht komplett durch Neufahrzeuge mit virtueller Kupplung ersetzen, sondern auch Bestandsfahrzeuge nachgerüstet werden.

Hieraus resultieren Umrüstungskosten aus dem Einbau und der Inbetriebnahme des Moduls in die Bestandsfahrzeuge. Es entstehen Kosten für den Einbau des Moduls und die Anpassung der Fahrzeuge sowie für die Validierung, Tests und Zulassung der veränderten Fahrzeuge, welche je nach Einzelfall stark variieren können.

Analog zu den beiden vorherigen Parametern sind auch hier positive Skaleneffekte zu erwarten. Es ist davon auszugehen, dass die Umrüstungskosten in Abhängigkeit umgerüsteter Fahrzeuge sinken werden. Dies wird hier jedoch nicht berücksichtigt.

Für die Monetarisierung der Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge werden folgende Annahmen getroffen:

Kosten Forschung und Entwicklung zur Anpassung der Bestandsfahrzeuge
+ Kosten Umsetzung der Anpassung (inkl. Kosten für Validierung, Tests und Zulassung des veränderten Fahrzeugs)
= Umrüstungskosten je Bestandsfahrzeug

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Umrüstungskosten Bestandsfahrzeug * Anzahl umzurüstender Bestandsfahrzeuge

d) Schulungskosten

Außer den rein technisch bedingten Änderungskosten entstehen Kosten aufgrund der notwendigen Schulungen von Triebfahrzeugführern, Disponenten und Technikern zum sachgerechten Umgang mit der virtuellen Kupplung und dem damit einhergehenden neuen Betriebskonzept.

Zudem ergibt sich aus der erhöhten Flexibilität im Fahrzeugeinsatz die Notwendigkeit zur erhöhten Flexibilität im Personaleinsatz. Da die Triebfahrzeugführer nicht

per se über das Know-how zum technischen Umgang mit sämtlichen Fahrzeugen der Bestandsflotte des Fahrzeughalters verfügen, sind entsprechende Weiterbildungen notwendig[344]. Mit Hilfe von sogenannten Deltaausbildungen ist sicherzustellen, dass die Triebfahrzeugführer in die Lage versetzt werden, sämtliche Zusammensetzungsvarianten von virtuellen Zugverbänden zu bedienen. Darüber hinaus sind gegebenenfalls von den Triebfahrzeugführern ergänzende Streckenkundenachweise abzulegen. Auch hieraus resultieren Kosten.

Die Schulungskosten sind nur dann zu berücksichtigen, wenn das EVU auch der Fahrzeughalter ist. Ist der Aufgabenträger der Fahrzeughalter, wird das EVU diese Kosten in sein Angebot der Verkehrsausschreibung einfließen lassen, was sich in einem höheren Bestellerentgelt widerspiegeln kann.

Für die Monetarisierung der Schulungskosten wird angenommen, dass die Schulungskosten pro Teilnehmer für alle Beschäftigungsgruppen gleich hoch sind und die Summe der Deltaausbildungen aller Triebfahrzeugführer gebildet werden kann.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Schulungskosten pro Teilnehmer * Anzahl zu schulendes Personal + Kosten für Deltaausbildung Triebfahrzeugführer

e) Umrüstungskosten für EVU-Leitstelle

Wie in Abschnitt 4.7 dargestellt, sind für die Umsetzung der virtuellen Kupplung Anpassungen der EVU-Leitstelle vorzunehmen, zum Beispiel in Form von Softwareanpassungen. Die hierdurch entstehenden Kosten sind nur dann zu berücksichtigen, wenn das EVU der Fahrzeughalter ist. Ist der Aufgabenträger der Fahrzeughalter gilt auch hier, dass sich die erhöhten Kosten für die EVU-Leitstelle im Bestellerentgelt widerspiegeln können.

Für die Monetarisierung der Umrüstungskosten wird angenommen, dass für das EVU Kosten zur Anpassung seiner Leitstelle anfallen.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum = Anpassungskosten EVU-Leitstelle

[344] Vgl. TfV, § 3, Absatz 1.2 i.V.m. Anlage 2, A.2. g).

Indirekte Kosten

Die indirekten Kosten umfassen zu erwartende, zukünftige Kosten[345].

f) Erhöhte Instandhaltungskosten

Instandhaltungsarbeiten können in die Bereiche Wartung, leichte und schwere Instandhaltung beziehungsweise Revision unterteilt werden[346]. In Summe gewährleisten sie, dass die an ein System gestellten Anforderungen über einen langen Zeitraum erfüllt werden können und sorgen damit für dessen hohe Betriebssicherheit, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

Da die virtuelle Kupplung einen für den Vollbahnbereich neuen technologischen Ansatz darstellt, ist davon auszugehen, dass ihre Untersuchungszyklen deutlich enger ausfallen als bei einer etablierten Technologie wie der konventionellen Kupplung. Entsprechend höher fallen die Instandhaltungskosten aus. Im Rahmen der Instandhaltung sind auch Systemupdates durchzuführen, welche die Installation einer neuen Software oder Hardware-Upgrades umfassen, um zum Beispiel Fehler zu beheben oder das Sicherheitsniveau aufrechtzuerhalten.

Zu berücksichtigen sind weiterhin Instandhaltungskosten, die daraus resultieren, dass die virtuelle Kupplung als lernendes System entwickelt werden soll, das eine stabile Anwendbarkeit über einen langen Zeitraum sicherstellt: Werden neue Fahrzeuge beschafft oder im Zuge neuer Anforderungen weitere Funktionen von der virtuellen Kupplung gefordert, sind auch hierfür Systemupdates durchzuführen, die zu Kosten führen. Aufgrund der im Modul zu verwendenden Elektronik und Software ist im Instandhaltungsplan das Obsoleszenzmanagement dringend zu berücksichtigen.

Es werden folgende Annahmen für die Monetarisierung der Instandhaltungskosten getroffen: Abzubilden sind das Delta aufgrund der im Vergleich zur konventionellen Kupplung erhöhten Instandhaltungskosten sowie die während des Betrachtungszeitraums notwendigen Systemupdates.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
erhöhte Instandhaltungskosten * Anzahl Instandhaltungen im Betrachtungszeitraum + Kosten für ein Systemupdate * Anzahl notwendiger System-Updates im Betrachtungszeitraum

[345] Vgl. Tabelle 6-1.
[346] Vgl. Richter (2016), S. 30.

Schwer erfassbare Kosten

Diese Kategorie umfasst schwer bewertbare Folgekosten[347].

g) Erhöhte Versicherungsprämie

Wenngleich mit der Zulassung die funktionale Sicherheit des Fahrzeuges nachzuweisen ist, besteht beim Betrieb von Fahrzeugen mit innovativen Technologien im Vergleich zu etablierten Technologien ein höheres Fehlerrisiko. In Zuge dessen ist es vorstellbar, dass die Prämie der Betriebshaftpflichtversicherung für die Fahrzeuge (zunächst) ansteigt. Kann sich die virtuelle Kupplung im Betrieb bewähren, ist davon auszugehen, dass die Prämie wieder sinkt. Für die Monetarisierung der erhöhten Versicherungsprämie wird jedoch vereinfachend angenommen, dass diese über den Betrachtungszeitraum hinweg konstant (erhöht) bleibt.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Erhöhte Versicherungskosten pro Jahr * Betrachtungszeitraum

6.2.2 Spezifizierung der Nutzenparameter

Es erfolgt eine Erläuterung der Nutzenparameter, getrennt nach „Direkter Nutzen", „Indirekter Nutzen und „Schwer erfassbarer Nutzen".

Direkter Nutzen

Nachfolgend werden die Nutzenparameter betrachtet, welche direkte Einsparungen von Kosten oder direkte neue Einnahmen betreffen[348].

h) Verringerung der Fahrzeugbeschaffungskosten

Ein zentrales Ziel des Einsatzes der virtuellen Kupplung ist, die Fahrzeuge einer Fahrzeugflotte – auch nach Flottenerweiterungen – untereinander beliebig betrieblich kuppeln und damit austauschen zu können. Im Zuge dessen kann die Größe der betrieblichen Reserveflotte reduziert werden. Weiterhin ergeben sich Potenziale zur Reduktion der Fahrzeugflotte aus der Möglichkeit, die Produktivität der Fahrzeugflotte zu optimieren (vgl. Nutzenparameter j) Verringerung der Personal- und Energiekosten (Betriebskosten)).

[347] Vgl. Tabelle 6-1.
[348] Vgl. Tabelle 6-1.

Perspektivisch ist es vorstellbar, dass die betriebliche Reserveflotte weiter reduziert werden kann, wenn aufgrund der Durchtauschbarkeit der Fahrzeuge EVU-übergreifend optimiert wird und hierzu vertraglich untersetzt, gemeinsame Reservepools gebildet werden. Voraussetzung hierfür sind vergleichbare infrastrukturelle Bedingungen und Aufgabenträgeranforderungen, wie zum Beispiel Bahnsteighöhen, Traktions- und Bremsvermögen, Fahrgastinformationssysteme und Diagnosesoftware (vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2).

Für die Monetarisierung der Verringerung der Beschaffungskosten der Fahrzeuge wird angenommen, dass der Fahrzeughalter auf eine bestimmte Anzahl seiner konventionell geplanten Fahrzeugflotte verzichten kann, ohne dass es zu Qualitäts- oder Verfügbarkeitseinbußen kommt. Vorgaben der Aufgabenträger zur Vorhaltung von Reservefahrzeugen sind entsprechend zu berücksichtigen.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Anzahl eingesparter Fahrzeuge * durchschnittlicher Neufahrzeugpreis

i) Entfallene Kosten der konventionellen Kupplung

Die virtuelle Kupplung soll die konventionelle Kupplung ersetzen. Bei neubeschafften Fahrzeugen entfallen entsprechend die Kosten zur Implementierung einer konventionellen Kupplung. Das Abschleppen wird über die in den Triebfahrzeugen vorhandene Notkupplung gewährleistet.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Preis konventionelle Kupplung * Anzahl auszurüstender Neufahrzeuge

Indirekter Nutzen

Der indirekte Nutzen umfasst die zukünftigen Einsparungen oder Einnahmen[349].

j) Verringerung der Personal- und Energiekosten (Betriebskosten)

Der Betrieb der Fahrzeugflotte kann umso wirtschaftlicher erfolgen, je weniger Fahrzeuge pro Zug- beziehungsweise pro Fahrgastkilometer benötigt werden[350]. Die virtuelle Kupplung flexibilisiert die Fahrzeugdisposition und erhöht damit die Möglichkeit eines nachfrageorientierten Fahrzeugeinsatzes entlang der Tagesganglinie und bei baustellenbedingten Änderungen des Fahrplans. Im Ergebnis dessen können Betriebskosten und der Umfang der betrieblichen Reserveflotte (vgl.

[349] Vgl. Tabelle 6-1.
[350] Vgl. BAG-SPNV (2010), S. 17.

Nutzenparameter „h) Verringerung der Fahrzeugbeschaffungskosten“) reduziert werden[351].

Die hier zu betrachtenden Betriebskosten setzen sich aus den Personal- und Energiekosten zusammen. 2010 lagen die Personalkosten zwischen unter 0,50 und 1,50 Euro je Zugkilometer[352]. Heute geht man davon aus, dass jeweils etwa 10 Prozent der Gesamtkosten auf die Personal- und Energiekosten entfallen (vgl. Abschnitt 2.1, Abbildung 2-3).

Werden im Zuge der Erhöhung der Produktivität weniger Fahrzeuge zur Erbringung der Verkehrsleistung benötigt, führt dies zu einer Reduktion des Personaleinsatzes und zu einem geringeren Energieverbrauch.

Für die Monetarisierung der Verringerung der Betriebskosten wird angenommen, dass das Fahrzeugeinsatzkonzept so stark optimiert werden kann, dass ein bestimmter Umfang an Fahrzeugkilometern eingespart wird.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
eingesparte Fahrzeugkilometer * (Personalkosten pro Fahrzeugkilometer +
Energiekosten pro Fahrzeugkilometer)

k) Fahrgelderlöse aus Fahrzeugdisposition

Der Einsatz der virtuellen Kupplung ermöglicht eine flexiblere Disposition der Fahrzeuge. Bei kurzzeitigen oder länger anhaltenden Schwankungen des Fahrgastaufkommens, zum Beispiel während des Tages, aufgrund von Großveranstaltungen oder saisonaler Schwankungen, kann der Fahrzeugeinsatz optimiert werden oder es können Fahrzeuge der Reserveflotte genutzt werden, um mehr Fahrgäste zu befördern. Vorstellbar ist auch, dass aufgrund optimierter Fahrzeugumläufe frühere Überführungsfahrten für den Fahrgastbetrieb genutzt werden können. Damit dieser Nutzen gehoben werden kann, müssen die Festlegungen zum Fahrzeugeinsatz im Verkehrsvertrag einen entsprechenden Freiraum vorsehen.

Für die Monetarisierung der Fahrgelderlöse aus verbesserter Fahrzeugdisposition wird angenommen, dass quantifiziert werden kann, wie stark die Verkehrsleistung

[351] Die Automatisierung der U-Bahnlinien U2 und U3 in Nürnberg ermöglichte die Optimierung des Fahrzeugeinsatzes entlang der Fahrgastnachfrage, führte zu einer erheblichen Einsparung der Betriebsleistung in Höhe von etwa 800.000 Fahrzeugkilometern pro Jahr und hatte positive Effekte auf die Wirtschaftlichkeit des U-Bahn-Systems (vgl. Striebich (2016) Folie 11ff.).

[352] Vgl. BAG-SPNV (2010), S. 19.

aufgrund der virtuellen Kupplung über den Betrachtungszeitraum steigt. Zu berücksichtigen ist hier ausschließlich der Anteil, welcher auf die flexible Disposition der Triebfahrzeuge zurückzuführen ist. Zur Vereinfachung wird weiterhin angenommen, dass die Tarifergiebigkeit[353] über den Betrachtungszeitraum hinweg konstant bleibt.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
zusätzliche Verkehrsleistung aufgrund flexiblerer Fahrzeugdisposition *
(Tarifergiebigkeit - Betriebskosten pro Personenkilometer)

l) Erlöse aus Fahrzeugverleih

Verfügt der Fahrzeughalter über eine flexibel einsetzbare Reserveflotte, hat er die Möglichkeit, Fahrzeuge, die er selbst nicht benötigt, zeitweise an EVU zu verleihen, welche die virtuelle Kupplung ebenfalls einsetzen. Mögliche Gründe eines zeitweisen Bedarfs können zum Beispiel Fahrzeugengpässe bei der Inbetriebnahme neuer Netze aufgrund von Lieferverzögerungen bei Neubeschaffungen oder Fahrzeugengpässe aufgrund von Fahrzeugausfällen oder ein zusätzlicher Fahrzeugbedarf bei Großveranstaltungen mit erwartungsgemäß hohem Fahrgastaufkommen sein.

Damit dieser Nutzen gehoben werden kann, müssen die Fahrzeuge die netzspezifischen Rahmenbedingungen erfüllen. Weiterhin müssen die Festlegungen zum Fahrzeugeinsatz im Verkehrsvertrag einen entsprechenden Freiraum vorsehen. Fahrzeuge dürfen nicht, wie heute überwiegend üblich, vertraglich an ein Netz gebunden sein.

Die Monetarisierung der Erlöse aus dem Fahrzeugverleih folgt der Annahme, dass der Fahrzeughalter im Betrachtungszeitraum seine Triebfahrzeuge an einer bestimmten Anzahl von Tagen (Triebfahrzeugtage) an ein EVU verleiht und dafür ein bestimmtes Entgelt erhält. Besonderheiten ergeben sich für die Fälle, bei denen der Aufgabenträger der Fahrzeughalter ist. Hier ist für die Möglichkeit des Fahrzeugverleihs und den Umgang mit den Erlösen die jeweilige Vertragsstruktur zwischen dem EVU und dem Aufgabenträger zu berücksichtigen.

[353] Die Tarifergiebigkeit ergibt sich aus der Multiplikation der von den Fahrgästen gewählten Fahrscheinarten mit der Anzahl der jeweiligen Nutzer dieser Fahrscheinarten (vgl. Tanner (2012), S. 3). Werden verstärkt teurere Fahrscheinarten verkauft, steigt die Tarifergiebigkeit. Im SPNV lag die Tarifergiebigkeit 2010 im Durchschnitt zwischen 6,5 und 7 Eurocent pro Personenkilometer (vgl. BAG-SPNV (2010), S. 26).

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
verliehene Triebfahrzeugtage * durchschnittliches Entgelt für Fahrzeugverleih

Schwer erfassbarer Nutzen

Abschließend werden die Parameter erläutert, welche einen strategischen Nutzen darstellen und nur schwer zu bewerten sind[354].

m) Fahrgelderlöse aus Imagegewinn

Die virtuelle Kupplung wirkt sich positiv auf mehrere imageprägende Merkmale aus: Zum einen vereinfacht die virtuelle Kupplung die Durchführung von Flügelkonzepten in Folge derer die Fahrgäste seltener umsteigen müssen, um an ihr Fahrziel zu gelangen. Hierbei handelt es sich um ein wichtiges Entscheidungskriterium ihrer Verkehrsträgerwahl[355]. Weiterhin stabilisiert die virtuelle Kupplung den Fahrplan und es kann flexibler auf Nachfragesteigerungen, Saisonverkehre und baustellenbedingte Fahrplanänderungen reagiert werden. Das Image des EVU wird verbessert, sein Angebot von mehr Fahrgästen genutzt.

Für die Monetarisierung der Fahrgelderlöse aus Imagegewinn werden die zusätzlichen Einnahmen, die dank des Imagegewinns erzielt werden können, abgeschätzt. Hierzu wird angenommen, dass prognostizierbar ist, wie hoch die Steigerung der Verkehrsleistung in Folge des Imagegewinns sein wird. Weiterhin wird angenommen, dass die Tarifergiebigkeit über den Betrachtungszeitraum konstant bleibt.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
zusätzliche Verkehrsleistung aufgrund von Imagegewinn * (Tarifergiebigkeit - Betriebskosten pro Personenkilometer)

n) Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung

In Abhängigkeit des Beschaffungspreises, dem Abschreibungszeitraum und den Finanzierungskosten lagen die Kapitalkosten bei Neufahrzeugen 2010 bei über 2,50 Euro je Zugkilometer[356]. Die virtuelle Kupplung ermöglicht einen flexiblen Einsatz der Triebfahrzeuge und erhöht damit gegenüber der konventionellen Kupplung deutlich die Chance auf Wiedereinsatz nach Ablauf des ersten Verkehrsvertrages. Wie auch beim Kriterium l) Erlöse aus Fahrzeugverleih ist die

[354] Vgl. Tabelle 6-1.
[355] Vgl. Abschnitt 2.2, Absatz „Erhöhung der Attraktivität des Verkehrsangebotes“.
[356] Vgl. BAG-SPNV (2010), S. 17.

Kompatibilität der Fahrzeuge zu den netzspezifischen Rahmenbedingungen des neuen Einsatzszenarios eine zwingende Voraussetzung.

Aus Sicht der Finanzierungsgeber stabilisieren sich die Fahrzeugrestwerte, ihr Risiko sinkt. In Folge dessen können für die Fahrzeugfinanzierung bessere Finanzierungskonditionen angeboten werden.

Für die Monetarisierung der Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung wird angenommen, dass dank der erhöhten Wiedereinsatzfähigkeit der Fahrzeuge die Finanzierungskosten auf Basis des Neufahrzeugpreises anteilig sinken.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Anzahl auszurüstender Neufahrzeuge * am Neufahrzeugpreis anteilig eingesparte Finanzierungskosten je Fahrzeug

o) Erhöhte Gewinne beim Fahrzeugverkauf

Die erhöhte Chance auf Wiedereinsatz hat nicht nur beim Fahrzeugkauf einen positiven Effekt, sondern auch nach Ablauf des Verkehrsvertrags für dessen Erfüllung das Fahrzeug beschafft wurde, da dann eine größere Anzahl potenzieller Interessenten für die Weiterverwendung des Fahrzeuges zu erwarten ist. Davon ausgehend kann sich ein wirtschaftlich attraktiver Sekundärmarkt für Gebrauchtfahrzeuge etablieren.

Wie schon bei mehreren Parametern zuvor, ist es auch hier zwingend notwendig, dass das zu verkaufende Fahrzeug die infrastrukturellen und aufgabenträgerspezifischen Anforderungen des für den Einsatz vorgesehenen Netzes erfüllt.

Für die Monetarisierung der erhöhten Gewinne aus Fahrzeugverkauf wird angenommen, dass abgeschätzt werden kann, wie stark sich der Verkaufspreis dank der virtuellen Kupplung erhöht. Weiterhin wird angenommen, dass während des Betrachtungszeitraums eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen verkauft wird, deren zusätzlicher Verkaufspreis in allen Fällen gleich hoch ist.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
Anzahl zu verkaufender Fahrzeuge * zusätzlicher Gewinn je verkauftem Fahrzeug

p) Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen

Aufgabenträger setzen in Verkehrsverträgen vermehrt Bonus- und Malus-Systeme ein, um für die gewünschte Qualität der SPNV-Angebote Anreize zu setzen[357]. Im Rahmen dessen ist es möglich, Verspätungen und Ausfälle von Beförderungsleistungen mit einem Malus zu versehen.

Weiterhin sind Entschädigungen an Fahrgäste zu leisten, wenn der Fahrgast von seinem Recht Gebrauch macht, für verspätungsbedingt erforderliche Mehraufwendungen zum Erreichen seines Zielortes Ersatz zu verlangen. Der Höchstbetrag liegt bei 80 Euro und ist an verschiedene Voraussetzungen gebunden[358].

Dank der virtuellen Kupplung wird der Fahrplan stabilisiert und es sinkt die Wahrscheinlichkeit von längeren fahrzeugbedingten Störszenarien im Fahrzeugbetrieb, da mehr Ersatzfahrzeuge zur Verfügung stehen. Die Anzahl der verspäteten und ausgefallenen Zugkilometer sinkt und EVU haben in Folge dessen weniger Pünktlichkeits-Malus sowie Entschädigungen an Fahrgäste zu leisten.

Für die Monetarisierung ist eine Abschätzung darüber zu treffen, wie stark der Malus anteilig sinkt und im welchem Umfang weniger Entschädigungen an Fahrgäste zu leisten sind.

→ Geldwert über Betrachtungszeitraum =
anteilig gesunkener Malus + Anzahl reduzierter Fahrgastentschädigungen *
durchschnittliche Entschädigung an Fahrgast

6.2.3 Zusammenfassung der Variablen zur Berechnung der Einflussparameter

Fasst man alle Variablen zusammen, welche in den oben vorgenommenen Erläuterungen zur Berechnung der 16 im ersten Schritt des NOWS-Verfahrens identifizierten Kosten- und Nutzenparameter dargestellt wurden, ergibt sich, dass insgesamt 41 Variablen zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit szenariospezifisch festzulegen sind. Diese Variablen weisen entweder ein geringes, mittleres oder hohes Datenrisiko auf und unterliegen der Verantwortung des Fahrzeughalters, der Bahnindustrie oder dritten Parteien. Zur besseren Übersicht wurden die identifizierten Variablen nach diesen Kategorien geclustert und in der Tabelle 6-7 und der Tabelle 6-8 zusammengefasst.

[357] Vgl. Deutscher Bundestag (2006), S. 15.
[358] Vgl. EVO, § 17, Absatz 2 und 3.

Tabelle 6-7 Variablen mit geringem Datenrisiko
Quelle: eigene Darstellung

lfd. Nr.	Variablen zur Berechnung der identifizierten Kosten- und Nutzenparameter	Einheit
A) leicht bewertbare Variablen mit geringem Datenrisiko		
A.1) Status quo: EVU-/Aufgabenträgerabhängige Variablen		
1	Betriebskosten pro Personenkilometer	Euro / Pkm
2	Personalkosten pro Fahrzeugkilometer	Euro / Fzg-km
3	Energiekosten pro Fahrzeugkilometer	Euro / Fzg-km
4	Tarifergiebigkeit	Euro / Pkm
5	durchschnittliches Entgelt Fahrzeugverleih	Euro / Tag
A.2) Status quo: industrieabhängige Variablen		
6	durchschnittlicher Neufahrzeugpreis	Euro
7	Preis konventionelle Kupplung	Euro
8	Kosten Diagnoseeinheit	Euro
9	Kosten Übertragungseinheit „Abstand“	Euro
10	Kosten Regelungseinheit	Euro
11	Kosten Übertragungseinheit „Kommunikation“	Euro
12	Kosten Abstandssensor	Euro
A.3) Status quo: weitere Variablen		
13	durchschnittliche Entschädigung an Fahrgast	Euro

Tabelle 6-8 Variablen mit mittlerem oder hohem Datenrisiko
Quelle: eigene Darstellung

lfd. Nr.	Variablen zur Berechnung der identifizierten Kosten- und Nutzenparameter	Einheit
B) zukünftige Variablen mit mittlerem Datenrisiko		
B.1) Szenario "Einführung virtuelle Kupplung": EVU-abhängige Variablen		
14	Betrachtungsdauer	Jahre
15	mit virtueller Kupplung auszurüstende Fahrzeuge	Anzahl
16	auszurüstende Neufahrzeuge	Anzahl
17	auszurüstende Bestandsfahrzeuge	Anzahl
18	zu schulendes Personal	Anzahl
19	Schulungskosten pro Teilnehmer	Euro
20	Kosten Deltaausbildung Triebfahrzeugführer	Euro
21	Anpassungskosten EVU-Leitstelle	Euro
22	erhöhte Instandhaltungskosten	Euro
23	Instandhaltungen während Betrachtungszeitraum	Anzahl
24	eingesparte Triebfahrzeuge	Anzahl
25	eingesparte Fahrzeugkilometer	Fzg-km
B.2) Szenario "Einführung virtuelle Kupplung": industrieabhängige Variablen		
26	Kosten für Forschung, Entwicklung und Herstellung der virtuellen Kupplung (Komponentenhersteller)	Euro
27	Kosten für Forschung und Entwicklung zur Anpassung der Fahrzeugkonzepte bei den Systemhäusern	Euro
28	Kosten zur Umsetzung der Anpassung der Fahrzeugkonzepte bei den Systemhäusern	Euro
29	Kosten für Forschung und Entwicklung zur Anpassung der Bestandsfahrzeuge	Euro
30	Kosten für Umsetzung der Anpassung bei Bestandsfahrzeugen (inkl. Kosten für Validierung, Tests und Zulassung des veränderten Fahrzeugs)	Euro
31	Systemupdates während Betrachtungszeitraum	Anzahl
32	Kosten für ein Systemupdate	Euro
C) schwer bewertbare Variablen mit hohem Datenrisiko		
C.1) Szenario "Einführung virtuelle Kupplung": EVU-abhängige Variablen		
33	zu verkaufende Fahrzeuge im Betrachtungszeitraum	Anzahl
34	reduzierte Fahrgastentschädigungen im Betrachtungszeitraum	Anzahl
35	anteilig gesunkener Malus im Betrachtungszeitraum	Euro
C.2) Szenario "Einführung virtuelle Kupplung": Variablen zu weiteren Rahmenbedingungen		
36	erhöhte Versicherungskosten pro Jahr	Euro / Jahr
37	zusätzliche Verkehrsleistung aufgrund flexiblerer Fahrzeugdisposition	Pkm
38	zusätzliche Verkehrsleistung aufgrund von Imagegewinn	Pkm
39	verliehene Triebfahrzeugtage	Anzahl
40	am Neufahrzeugpreis anteilig eingesparte Finanzierungskosten je Fahrzeug	Euro/Fahrzeug
41	zusätzlicher Gewinn je verkauftem Fahrzeug	Euro

Nachdem das NOWS-Verfahren für die vorliegende Fragestellung spezifiziert und parametrisiert vorliegt, wird es im nächsten Abschnitt exemplarisch angewendet.

6.3 Exemplarische Anwendung des NOWS-Verfahrens

Die Investitionsentscheidung über die Einführung einer virtuellen Kupplung ist vom Fahrzeugeigentümer und damit in der Regel vom EVU oder dem Aufgabenträger für deren konkreten Anwendungsfall zu treffen. Weiterhin existiert eine hohe Komplexität und Vielfalt an möglichen Anwendungsszenarien und es fehlen hier konkrete Kosten- und Nutzendaten. Aus diesen Gründen ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, eine pauschale und gleichzeitig hinreichend valide Aussage zur Wirtschaftlichkeit der Investitionsentscheidung „Einführung virtuelle Kupplung“ zu treffen. Stattdessen wird die Anwendung des NOWS-Verfahrens exemplarisch aus Sicht eines EVU durchgeführt. Maßstab bildet die Einschätzung der Autorin zu der zu erwartenden Positionierung eines typischen EVU. Zu einem späteren Zeitpunkt ist das NOWS-Verfahren im konkreten Anwendungsfall spezifisch aus Sicht eines potenziellen Investors oder aus der verkehrspolitischen Sicht des Bundes anzuwenden.

Ziel dieses Abschnittes ist es daher, die Parameter herauszuarbeiten, welche eine besondere Sensitivität aufweisen und die damit für die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit von besonderer Bedeutung sind. In der sich anschließenden Auswertung können Kausalitäten für den möglichen Erfolg oder Misserfolg des Einsatzes der virtuellen Kupplung identifiziert, gegebenenfalls notwendige Anreize erkannt und erste Elemente einer Markteinführungsstrategie abgeleitet werden.

Hierzu werden im ersten Schritt die Eintrittswahrscheinlichkeiten der identifizierten Nutzen- und Kostenpotenziale (Einflussfaktoren, vgl. Abschnitt 6.2) eingeschätzt. Gemäß des NOWS-Verfahrens wird für die Eintrittswahrscheinlichkeit unterschieden nach gering, mittel und hoch. In Tabelle 6-9 sind die exemplarischen Einschätzungen für das Beispielszenario genannt, welche im Anhang 3 detailliert erläutert werden.

Tabelle 6-9 Eintrittswahrscheinlichkeiten im Beispielszenario
Quelle: eigene Darstellung, Details siehe Anhang 3

lfd. Nr.	Identifizierte Kosten- und Nutzenparameter	Eintritts-wahrscheinlichkeit
Kosten		
Direkte Kosten		
a)	Beschaffungskosten des Moduls	hoch
b)	Mehrkosten für Neufahrzeuge	hoch
c)	Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge	hoch
d)	Schulungskosten	hoch
e)	Ümrüstungskosten für EVU-Leitstelle	hoch
Indirekte Kosten		
f)	erhöhte Instandhaltungskosten	hoch
Schwer erfassbare Kosten		
g)	erhöhte Versicherungsprämie	mittel
Nutzen		
Direkter Nutzen		
h)	Verringerung der Fahrzeugbeschaffungskosten	hoch
i)	entfallene Kosten der konventionellen Kupplung	hoch
Indirekter Nutzen		
j)	Verringerung der Personal- und Energiekosten (Betriebskosten)	mittel
k)	Fahrgelderlöse aus Fahrzeugdisposition	hoch
l)	Erlöse aus Fahrzeugverleih	gering
Schwer erfassbarer Nutzen		
m)	Fahrgelderlöse aus Imagegewinn	hoch
n)	Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung	mittel
o)	erhöhte Gewinne beim Fahrzeugverkauf	mittel
p)	Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen	mittel

Auf Basis dieser Festlegungen können die Kosten- und Nutzenparameter in eine Kosten- und eine Nutzen-Matrix überführt werden (vgl. Tabelle 6-10 und Tabelle 6-11). Die jeweils auf orangefarbenem Grund eingefügten Zahlen eins bis neun entsprechen den neun Risikostufen der neun Zellen jeder Matrix.

Tabelle 6-10 Kosten-Matrix mit Eintrittswahrscheinlichkeit im Beispielszenario
Quelle: eigene Darstellung

Kosten	Eintrittswahrscheinlichkeit		
	hoch	mittel	gering
Direkte Kosten	a) Beschaffungs-kosten des Moduls 1 b) Mehrkosten für Neufahrzeuge c) Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge d) Schulungskosten e) Umrüstungskosten für EVU-Leitstelle	3	6
Indirekte Kosten	f) erhöhte Instandhal-tungskosten 2	5	8
Schwer erfassbare Kosten	4	g) erhöhte Versiche-rungsprämie 7	9

Tabelle 6-11 Nutzen-Matrix mit Eintrittswahrscheinlichkeit im Beispielszenario
Quelle: eigene Darstellung

Nutzen	Eintrittswahrscheinlichkeit		
	hoch	mittel	gering
Direkter Nutzen	h) Verringerung der Fahrzeug-beschaffungskosten 1 i) entfallene Kosten der konventionellen Kupplung	3	6
Indirekter Nutzen	k) Fahrgelderlöse aus Fahrzeug-disposition 2	j) Verringerung der Personal- und Energiekosten 5	l) Erlöse aus Fahrzeugverleih 8
Schwer erfassbarer Nutzen	m) Fahrgelderlöse aus Imagegewinn 4	n) Einsparungen bei der Fahr-zeugfinanzierung 7 o) Erhöhte Gewinne beim Fahrzeugverkauf p) Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen	9

Im nächsten Schritt müssten nun die einzelnen Parameter entsprechend der in Abschnitt 6.2 erläuterten Berechnungen monetarisiert werden. Wie bereits oben dargestellt, ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, die hierfür benötigten und in Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8 genannten 41 Variablen exakt festzulegen.

Um dennoch eine erste Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit und zu erfolgskritischen Parametern treffen zu können, werden nachfolgend unter Berücksichtigung des prinzipiellen Verlaufs der Kosten- und Nutzenkurve[359] qualitative und vergleichende Abschätzungen zu den zu monetarisierenden Parametern getroffenen, ohne dabei explizit auf jede einzelne Variable einzugehen. Mit Hilfe dieser Abschätzungen wird der Verlauf der Kosten- und Nutzenkurve abgeleitet und im Anschluss ausgewertet, wobei auch mögliche Stellschrauben für eine positive Investitionsentscheidung aufgezeigt werden.

Einschätzung zum Verlauf der Kosten-Nutzen-Kurve

Ziel der Visualisierung der Kosten-Nutzen-Kurve ist es, eine Investitionsempfehlung oder -ablehnung aus Sicht des Entscheiders aussprechen zu können. Dies kann bei der Herleitung der Kosten-Nutzen-Kurve genutzt werden, indem zwei Szenarien der Kostenkurve eingezeichnet werden: Kostenszenario „Empfehlung“ und Kosten-

[359] Aufgrund der auf der x-Achse entgegengesetzt eingetragenen Risikostufen und der ausschließlich möglichen Anstiege bei Erreichen der nächsten Risikostufen, steigt die Nutzenkurve von links nach rechts und die Kostenkurve von rechts nach links stufenweise an.

szenario „Ablehnung“. Im Kostenszenario „Empfehlung“ schneidet die Kostenkurve die Nutzenkurve bei 4,5 bezogen auf die „Risikoabstufung Nutzen“, im Szenario „Ablehnung“ liegt der Schnittpunkt bei 5,5. Da die Kosten der Risikostufe 1 im Rahmen dieser Arbeit nicht abgeschätzt werden können, sind auf diese Weise dennoch erste Einschätzungen zur Wirtschaftlichkeit und zu notwendigen Anreizen zur Umsetzung der virtuellen Kupplung möglich.

Basierend auf den nachfolgend beschriebenen zu erwartenden Parameterausprägungen und dem Anspruch, dass der Schnittpunkt der beiden Kurven im Szenario 1 zu einer Investitionsempfehlung und im Szenario 2 zu einer Investitionsablehnung führt, ergibt sich der in Abbildung 6-2 dargestellte Verlauf, dessen Herleitung nachfolgend erläutert wird.

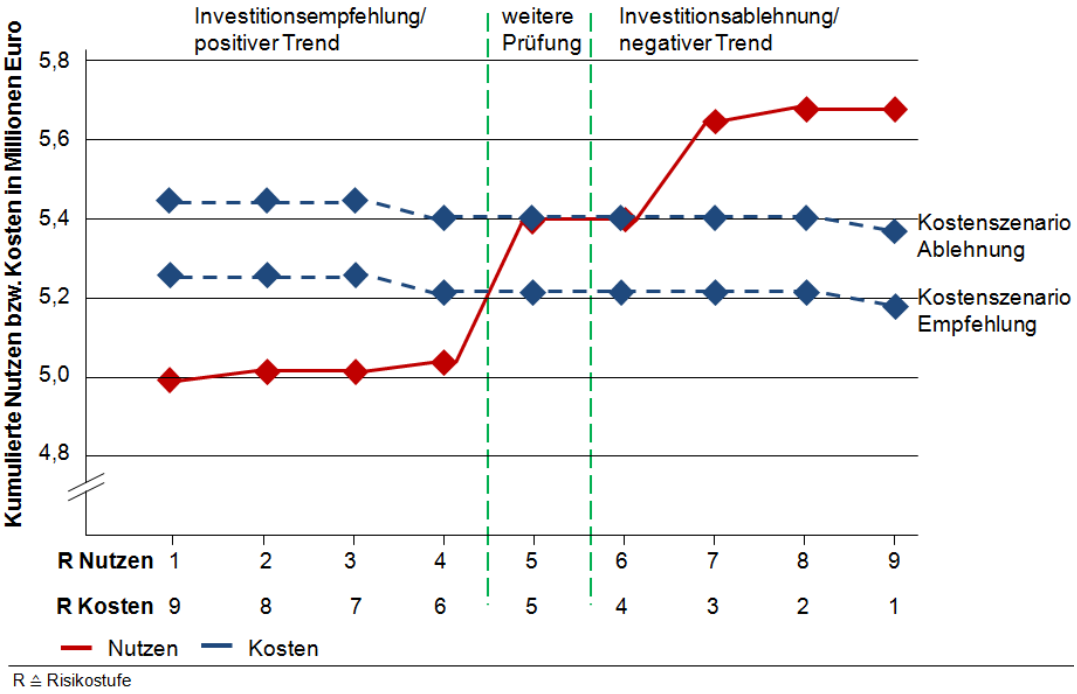


Abbildung 6-2 Kosten-Nutzen-Kurve der virtuellen Kupplung anhand getroffener Abschätzungen
Quelle: eigene Darstellung

Einschätzungen zum Verlauf der Kostenkurve

Im Ergebnis der oben angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten steigt die Kostenkurve nur in den Risikostufen 1, 2 und 7, da nur diese zu monetarisierende Kostenparameter enthalten (vgl. Tabelle 6-10).

Der mit Abstand größte Anstieg ist in der Risikostufe 1 zu erwarten. Er ist abhängig von den Kosten-Parametern a) Beschaffungskosten des Moduls, b) Mehrkosten für

Neufahrzeuge, c) Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge, d) Schulungskosten und e) Umrüstungskosten für EVU-Leitstelle. Der Vergleich der Parameter unter Zuhilfenahme der sie bildenden Variablen lässt den Schluss zu, dass die Modulkosten und hierbei insbesondere die Kosten für Forschung, Entwicklung und Herstellung der virtuellen Kupplung zusammen mit den Mehrkosten für Neufahrzeuge und den Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge den entscheidenden Einfluss haben. Die Schulungskosten für das Personal und die Umrüstungskosten der EVU-Leitstelle fallen demgegenüber bezogen auf den Einfluss gering aus.

Die in den Risikostufen 2 und 7 zu berücksichtigenden Kostenparameter f) erhöhte Instandhaltungskosten und g) erhöhte Versicherungsprämie fallen gegenüber den in Risikostufe 1 zu berücksichtigenden Kostenparametern sehr gering aus, sodass nur ein marginaler Anstieg der Kostenkurve zu erwarten ist.

Zusammenfassend lassen sich für den Verlauf der Kostenkurve folgende Aussagen treffen:

- Anstiege: nur in Risikostufen 1, 2 und 7
- größter Anstieg: Risikostufe 1
- marginale Anstiege: Risikostufe 2 und 7

Einschätzungen zum Verlauf der Nutzenkurve

Im Ergebnis der angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeiten steigt die Nutzenkurve nur in den Risikostufen 1, 2, 4, 5, 7 und 8, da nur diese zu monetarisierende Nutzenparameter enthalten (vgl. Tabelle 6-11).

In der Risikostufe 1 ist bereits ein sehr hoher Nutzenwert von mehreren Millionen Euro Einsparung zu erwarten, da bereits die Reduktion der Reserveflotte (Parameter h) um ein elektrisches Triebfahrzeug zu einer Einsparung von 5 Mio. Euro in der Investition führt[360]. Die entfallenden Kosten für eine konventionelle Kupplung (Parameter i) sind gegenüber Parameter h) vernachlässigbar klein.

Die Nutzenkurve steigt in Risikostufe 2 um den Gewinn aus Fahrgelderlösen aus der verbesserten Fahrzeugdisposition (Parameter k). Das nachfolgende Rechenbeispiel zeigt, dass die Steigerung von Stufe 1 auf Stufe 2 sehr gering ausfallen wird. Um beispielsweise einen Effekt zu erreichen, welcher nur einem Prozent des Effektes eines eingesparten Triebfahrzeugs entspricht, müssten bei einer Tarifergiebigkeit von

[360] Vgl. Leenen et al. (2012), S. 48.

etwa 0,065 bis 0,07 Euro je Personenkilometer[361] etwa 0,7 Mio. zusätzliche Personenkilometer im Betrachtungszeitraum für zusätzliche Fahrgasteinnahmen sorgen. Bei einem Betrachtungszeitraum über einen üblicher Weise 15 Jahre laufenden Verkehrsvertrag würde das eine jährliche zusätzliche Verkehrsleistung von mindestens 46.000 Personenkilometer bedeuten – ausschließlich zurückzuführen auf zusätzliche Verkehre durch eine bessere, durch den Einsatz der virtuellen Kupplung ermöglichte, betriebliche Disposition (Saisonverkehre, Großveranstaltungen, etc.).

Der nächste Anstieg der Nutzenkurve findet sich in der Risikostufe 4. Ausschlaggebend sind hier die zusätzlichen Fahrgelderlöse aus Imagegewinn (Parameter m). Das zuvor gezeigte Rechenbeispiel kann hier analog herangezogen werden, weshalb auch beim Übergang von Risikostufe 3 auf Risikostufe 4 von einer marginalen Steigerung ausgegangen werden kann.

In der Risikostufe 5 wird die Verringerung der Personal- und Energiekosten berücksichtigt (Parameter j), welche sich aus der verbesserten Fahrzeugdisposition ergeben. Im Schnitt betragen die Personal- und Energiekosten 3,8 Eurocent je Personenkilometer[362] und machen etwa 20 Prozent der Kosten des Betriebs einer Eisenbahnflotte im Regionalverkehr aus[363]. Im Vergleich zu den zuvor genannten Parametern ist hier eine größere Wirkung zu erwarten. Jedoch zeigt auch hier ein einfaches Rechenbeispiel, dass diese bei unter 10 Prozent des Effektes der Einsparung eines Triebfahrzeugs, also unter 0,5 Mio. Euro, liegen dürfte: Bei der Annahme der oben genannten durchschnittlichen Betriebskosten würde es einer Einsparung von etwa 13 Mio. Personenkilometern im Betrachtungszeitraum beziehungsweise 0,86 Mio. Personenkilometer pro Jahr bedürfen. Bei einer durchschnittlichen jährlich erbrachten Verkehrsleistung eines SPNV-Fahrzeugs von etwa 2,9 Mio. Personenkilometer pro Jahr[364] bedeutet dies eine Einsparung von fast 30 Prozent. Dieser Wert kann zudem geschmälert werden durch zusätzliche Betriebskosten im Zuge zusätzlicher Verkehre zum Abschöpfen weiterer Einnahmenpotenziale.

[361] Vgl. BAG-SPNV (2010), S. 26.
[362] Vgl. BAG-SPNV(2016a), S. 79.
[363] Die Kostenpositionen für den Betrieb einer Eisenbahnflotte setzen sich zusammen aus: 39 Prozent Infrastruktur, 9 Prozent Energie, 11 Prozent Fahrpersonal, 20 Prozent Kapitalkosten, 8 Prozent Instandhaltung, 2 Prozent betriebliche Behandlung sowie 11 Prozent sonstige Kosten für Verwaltungs- und Managementaufgaben (vgl. Heinrich (2017), S. 2).
[364] Laut VDV-Statistik wurde 2016 im SPNV von 16.157 Fahrzeugen eine Beförderungsleistung von 47.314 Mio. Personenkilometer erbracht (vgl. VDV (2017), S. 44ff).

In der sich anschließenden Risikostufe 7 ist eine Steigerung der Nutzenkurve zu erwarten, aufgrund von Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung (Parameter n), erhöhten Gewinnen beim Fahrzeugverkauf (Parameter o) und der Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen (Parameter p). Auch bei diesen drei Parametern ist davon auszugehen, dass der durch sie zusätzlich generierte Nutzen deutlich unter dem Nutzen durch die Einsparung eines Triebfahrzeugs liegt, auf Basis nachfolgender Annahmen erscheinen etwa fünf Prozent der Einsparung eines Triebfahrzeugs wahrscheinlich: Die Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung (Parameter n) können bereits definitorisch nur einen Bruchteil der Fahrzeugkosten betragen. Eine höhere Relevanz haben erhöhte Gewinne beim Fahrzeugverkauf (Parameter o): Wird das Triebfahrzeug nach Ablauf des Verkehrsvertrages verkauft, hat es mit 15 Jahren etwa die Hälfte seines Lebenszyklus erreicht. Unter der Annahme einer linearen Abschreibung beträgt sein Wert dann entsprechend noch 50 Prozent des ursprünglichen Wertes, also etwa 2,5 Mio. Euro. Steigt die Attraktivität des Triebfahrzeugs für den Gebrauchtfahrzeugmarkt dank der virtuellen Kupplung um beispielsweise zehn Prozent, kann ein etwa zehn Prozent höherer Preis für das Triebfahrzeug erzielt werden. Abzüglich der Mehrinvestitionen ergibt sich daraus ein zusätzlicher Gewinn aus dem Einsatz der virtuellen Kupplung. Es kann daher die Annahme getroffen werden, dass der Parameter nicht über fünf Prozent des Wertes eines neuen Triebfahrzeuges liegen wird. Der dritte Parameter, Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgastentschädigung (Parameter p), fällt im Vergleich zum Triebfahrzeugpreis gleichermaßen geringfügig aus. So müssten über den Betrachtungszeitraum hinweg etwa 6.250 Fahrgäste den Höchstbetrag für Fahrgastentschädigungen in Höhe von 80 Euro[365] nicht erhalten, damit ein Nutzen erreicht wäre, der zehn Prozent des Nutzens eines nicht erworbenen Triebfahrzeuges entspricht. Für eine Abschätzung des Nutzens aus der Reduktion von Pünktlichkeits-Mali sei beispielhaft auf das integrierte Qualitätsmesssystem der Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg verwiesen. Deren Bonus-Malus-System hat ein Gesamtvolumen von drei Prozent des Zuschusses an das EVU[366], was bei einem durchschnittlichen Bestellerentgelt in Höhe von 13,9 Eurocent pro Personenkilometer[367], 0,417 Eurocent pro Personenkilometer entspricht. Das

[365] Vgl. EVO, § 17, Absatz 2 und 3.
[366] Vgl. Schmitt (2012), Folie 5.
[367] Vgl. Schwilling et al. (2014), S. 108.

Pünktlichkeitsverhalten geht in dem genannten Qualitätsmesssystem jedoch nur zu 7,5 Prozent in die Wertung ein[368]. Übertragen auf die maximal zu erreichenden Bonus/Malus-Werte können demnach bis zu 0,029 Eurocent pro Personenkilometer oder, bezogen auf die jährliche Verkehrsleistung eines Triebfahrzeugs bis zu 84.600 Euro pro Jahr eingespart werden. Da mit der betrieblichen Multikuppelbarkeit nur ein Teil der Unpünktlichkeitsursachen ausgeglichen werden kann, fällt der auf sie zurückzuführende Teil entsprechend geringer aus. Deutlich wird, dass auch der monetarisierte Nutzen aus reduzierten Pönale- und Entschädigungszahlungen im Vergleich zu einem eingesparten Triebfahrzeug marginal ausfallen wird.

Der letzte Anstieg der Nutzenkurve ist in der Risikostufe 8 aufgrund des Potenzials von Erlösen aus einem Fahrzeugverleih (Parameter l) zu erwarten. Aufgrund der in Abschnitt 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen eingeschränkten netzübergreifenden Passfähigkeit der Fahrzeuge und aufgrund der großen Bindung an das eigene Netz, ist davon auszugehen, dass nicht benötigte Fahrzeuge nur in Einzelfällen vermietet werden können. Der hier monetarisierbare Nutzen über den Betrachtungszeitraum hinweg fällt entsprechend gering aus.

Zusammenfassend lassen sich für den Verlauf der Nutzenkurve folgende Aussagen treffen:

- Anstiege: nur in Risikostufen 1, 2, 4, 5, 7 und 8,
- größter Anstieg: Risikostufe 1 (mindestens 5 Millionen Euro),
- zweitgrößter Anstieg: Risikostufe 5 (aber unter 10 Prozent des Wertes von Stufe 1),
- drittgrößter Anstieg: Risikostufe 7 (etwa 5 Prozent des Wertes von Stufe 1),
- marginale Anstiege: Risikostufen 2, 4 und 8.

Auswertung des Verlaufs der Kosten-Nutzen-Kurve

In Betrachtung der Abbildung 6-2 wird deutlich, dass die Entscheidung, ob eine Investitionsempfehlung oder -ablehnung ausgesprochen werden kann, sehr eng beieinander liegt. Allgemein kann im ersten Schritt geschlussfolgert werden, dass sich die Investition in den Einsatz einer virtuelle Kupplung dann lohnt, wenn die entscheidenden Kostenblöcke (Beschaffungskosten des Moduls, Mehrkosten für Neufahrzeuge und Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge) geringer ausfallen als die Kosten für ein Triebfahrzeug, welches durch den Einsatz der virtuellen Kupplung

[368] Vgl. Schmitt (2012), Folie 5.

eingespart werden kann. Die Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit der Investition fällt insbesondere dann umso positiver aus, je mehr Nutzen in den Risikostufen 1 bis 4 generiert werden kann oder je geringer die erwarteten Kosten ausfallen. Auch hier wird deutlich, dass der größte Hebel in der Reduktion der Fahrzeugreserveflotte zu sehen ist. Gleichzeitig sei angemerkt, dass die Wirtschaftlichkeit signifikant steigt, je mehr Fahrzeuge über eine virtuelle Kupplung verfügen, da so einerseits das Nutzenpotenzial einer gesteigerten Flexibilität (Fahrgelderlöse aus Fahrzeugdisposition und Imagegewinn, erhöhte Gewinne beim Fahrzeugverkauf und Erlöse aus Fahrzeugverleih) verstärkt gehoben sowie andererseits die Kosten für Forschung und Entwicklung der virtuellen Kupplung auf eine größere Anzahl von Anwendungsfällen umgelegt werden können. In Folge dessen sinken die projektbezogenen Kosten und die Wirtschaftlichkeit der zu tätigenden Investition insgesamt wird verbessert.

Da aus dem Einsatz der virtuellen Kupplung zur Etablierung der Multikuppelbarkeit für den Fahrgast, das EVU und den Aufgabenträger ein grundsätzlicher Nutzen zu erwarten ist (vgl. Abschnitt 2.2) und die technische Umsetzbarkeit als grundsätzlich möglich eingestuft werden kann (vgl. Abschnitt 5.4), ist zudem aus verkehrspolitischer Sicht in Erwägung zu ziehen, dass die öffentliche Hand die Markteinführung und -etablierung der virtuellen Kupplung unterstützt. Dabei ist anzustreben, dass der durch den Einsatz der virtuellen Kupplung erreichte Nutzen denen zu Gute kommt, welche auch die durch die virtuelle Kupplung verursachten Mehrkosten tragen müssen. Aus diesem Grund erscheinen Fördermittel zur Unterstützung der Forschung und Entwicklung der virtuellen Kupplung, welche die Kosten für die Beschaffung des Moduls reduzieren können, ebenso sinnvoll, wie das Schaffen von Anreizen für ihre Markteinführung. Aufgrund der Aufgabenträgerstruktur und der Betreibervielfalt im SPNV (vgl. Abschnitt 2.1) könnte so ein deutlich höherer Nutzen generiert, die Kosten gesenkt und damit die Wirtschaftlichkeit der virtuellen Kupplung verbessert werden.

6.4 Zwischenfazit zur Wirtschaftlichkeitseinschätzung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde das NOWS-Verfahren als geeignetes Verfahren zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der virtuellen Kupplung ausgewählt, da es ermöglicht, Unsicherheiten bei den Entscheidungsparametern abzubilden. Im ersten Schritt des Verfahrens wurden die 16 direkten, indirekten und schwer erfassbaren Kosten- und Nutzenparameter identifiziert, welche während des Betrachtungszeitraums auftreten können und für die Investitionsentscheidung relevant sind. Für die Monetarisierung der Einflussfaktoren wurden insgesamt 41 Variablen abgeleitet, welche zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit szenariospezifisch festzulegen sind.

Um eine erste Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit treffen zu können und die Parameter herzauszuarbeiten, welche als besonders relevant zu betrachten sind, wurden exemplarisch Einschätzungen zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten und Abschätzungen zu den Einflussparametern getroffen sowie daraus der Verlauf einer Kosten-Nutzen-Kurve abgeleitet und ausgewertet.

Deutlich wurde, dass vier entscheidende Stellhebel und damit Risikofaktoren für die Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der virtuellen Kupplung existieren:

- die Verringerung der Fahrzeugbeschaffungskosten durch Verkleinerung der Reserveflotte,
- die Beschaffungskosten des Moduls,
- die Mehrkosten für Neufahrzeuge und
- die Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge.

Im Ergebnis kann einem EVU die Investition in den Einsatz der virtuellen Kupplung im SPNV in jedem Fall dann empfohlen werden, wenn durch deren Einsatz mindestens ein Triebfahrzeug weniger beschafft werden muss und die mit dem Einsatz der virtuellen Kupplung verbundenen zusätzlichen Kosten bei der Fahrzeugbeschaffung geringer ausfallen als die Kosten eines Triebfahrzeugs.

Da der Nutzen der virtuellen Kupplung signifikant steigt und die Kosten deutlich sinken, je mehr Fahrzeuge über eine virtuelle Kupplung verfügen, ist es auszustreben, eine möglichst große Flotte im SPNV mit der virtuellen Kupplung auszurüsten. Hierbei kann die Öffentliche Hand, zum Beispiel mit Forschungsgeldern und Anreizen für eine Markteinführung unterstützen und damit

direkt positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der virtuellen Kupplung nehmen. Abbildung 6-3 fasst die Ergebnisse des Kapitels zusammen.

Abbildung 6-3 Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes einer virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Nachdem in dem vorangegangen Kapitel die grundsätzliche technische Umsetzbarkeit der virtuellen Kupplung dargestellt und eine Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit getroffen und erste notwendige Anreize abgeleitet wurden, wird nachfolgend untersucht, welche weiteren Herausforderungen mit einer erfolgreichen Markteinführung und -etablierung verbunden sind, um hieraus notwendige Erfolgsfaktoren ableiten zu können.

7 Einschätzung zur Markteinführung und -etablierung

Ziel des Kapitels ist es, in Ergänzung zu den Kapiteln 5 und 6, eine Einschätzung zur Markteinführung und -etablierung der virtuellen Kupplung zu geben. Hierzu wird eingangs mittels notwendiger Schritte für die Markteinführung und dafür notwendiger Zeitbedarfe ein Migrationspfad aufgezeigt (Abschnitt 7.1). Im Anschluss werden Fragestellungen des Eisenbahnrechtes und der Haftung (Abschnitt 7.2) sowie zur „Security“ – Angriffssicherheit diskutiert (Abschnitt 7.3). Berücksichtigt werden zudem die aktuellen Digitalisierungs- und Automatisierungsaktivitäten im Schienen- und Straßenverkehr (Abschnitt 7.4). Diese Untersuchungsergebnisse werden schließlich im Abschnitt 7.5 zu Handlungsbedarfen der einzelnen Marktakteure zusammengefasst.

7.1 Migrationspfad

Bevor die virtuelle Kupplung ihren Nutzen im SPNV voll entfalten kann, bedarf es außer der rein technischen Entwicklung auch verschiedener Schritte im Kontext der Markteinführung und -etablierung mit entsprechenden Zeitbedarfen von der Konzeptidee bis zur gewünschten Marktdurchdringung.

7.1.1 Beschreibung notwendiger Schritte für die Marktetablierung

Als Ausgangspunkt zur Erläuterung kann die in der EN 50126 enthaltene „V“-Darstellung des Systemlebenszyklus herangezogen werden, welcher mit der Anfangsplanung eines neuen Systems beginnt und mit dessen Stilllegung endet (vgl. Abbildung 7-1).

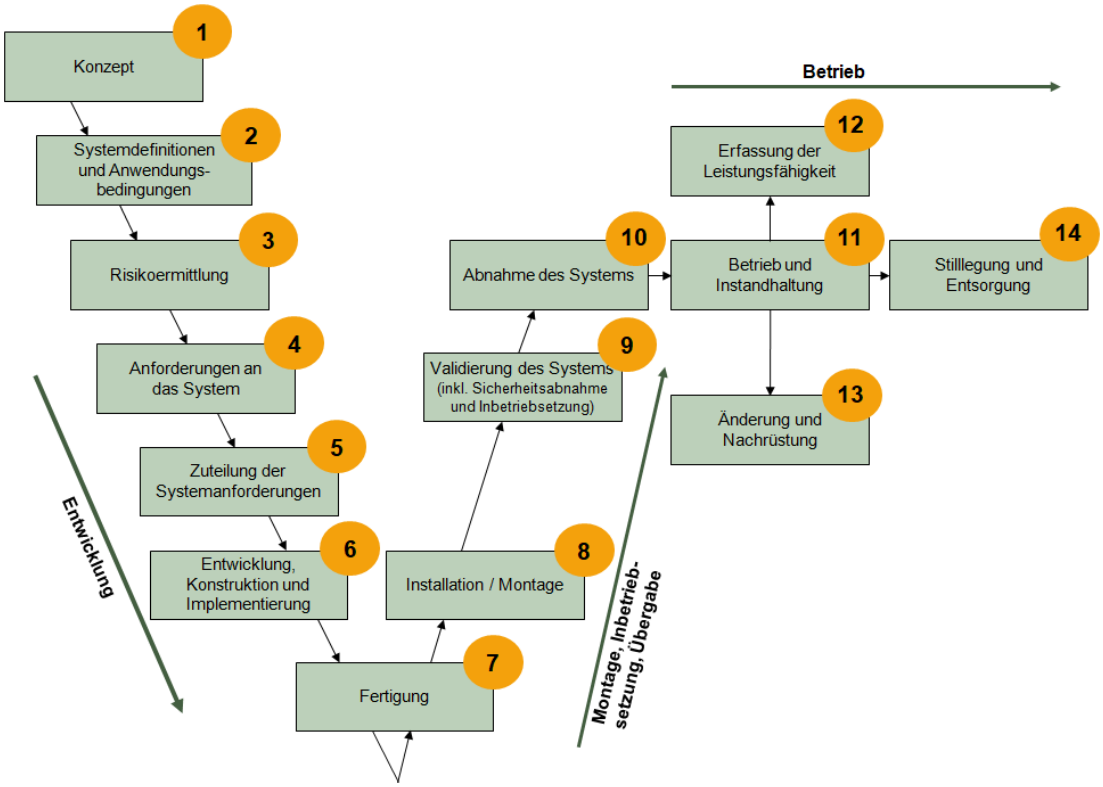


Abbildung 7-1 „V"-Darstellung des Systemlebenszyklus gemäß der EN 50126
Quelle: eigene Darstellung auf Basis EN 50126, S. 26

Nachfolgend werden die wesentlichen Inhalte der Lebenszyklusphasen im Kontext der virtuellen Kupplung kurz vorgestellt, Verantwortlichkeiten genannt und im Anschluss Zeitbedarfe abgeschätzt. Detaillierte Erläuterungen zu den einzelnen Phasen gemäß Normdefinition können der EN 50126 entnommen werden[369]. Im Ergebnis entsteht so eine erste Einschätzung zum voraussichtlich frühestmöglichen Zeitpunkt der Nutzenentfaltung der virtuellen Kupplung und der dafür unterstützenden Anreize und Maßnahmen.

Regulatorische und infrastrukturelle Voraussetzungen schaffen

Die virtuelle Kupplung kann ihren Nutzen insbesondere dann voll entfalten und sich am Markt erfolgreich etablieren, wenn jedes, mit der virtuellen Kupplung ausgerüstete Triebfahrzeug mit jedem anderen Triebfahrzeug, welches ebenfalls über einer virtuelle Kupplung verfügt, betrieblich gekuppelt werden kann. Um dies zu erreichen, ist einerseits das Modul „virtuelle Kupplung" zu entwickeln und andererseits sind die in Abschnitt 4.6 beschriebenen Schnittstellen zu standardisieren.

[369] Vgl. EN 50126, S. 23 ff.

Darüber hinaus ist es von entscheidender Bedeutung, verschiedene Sicherheitsfragen und rechtliche Fragestellungen im engen Dialog mit den Gutachtern, den Zulassungsbehörden und den weiteren zuständigen Aufsichts- und Sicherheitsbehörden möglichst frühzeitig zu klären. Beispielhaft können hier das Abbilden des lernenden Systems der virtuellen Kupplung im Zulassungsprozess sowie die Zulassung auf freizügigen Fahrbetrieb genannt werden. Hintergrund der notwendigen Abstimmungen ist, dass die Änderung der Zusammensetzung einer Mehrfachtraktion gemäß der Transeuropäischen-Eisenbahn-Interoperabilitäts-verordnung (TEIV) eine umfangreiche Änderung darstellt[370]. Diese bedarf deswegen einer neuen Inbetriebnahmegenehmigung des Zugverbandes[371] inklusive aller notwendigen zugverbandspezifischen Tests und stellt damit für den flexiblen Fahrzeugeinsatz eine erhebliche administrative, prozessuale wie auch finanzielle Umsetzungshürde dar. Da zum Zeitpunkt der Antragsstellung noch nicht abschließend festgelegt werden kann, welche Zugkonfigurationen das Fahrzeug fahren wird, muss es daher das Ziel sein, eine Zulassung der Fahrzeuge für den freizügigen Fahrbetrieb anzustreben. Nachzuweisen wäre dabei, dass die Fahrzeug-einheit so ausgelegt ist, dass sie mit einer anderen Einheit oder mehreren anderen Einheiten in einem Zugverband gekuppelt werden kann, der in der Konstruktionsphase noch nicht feststand[372]. Ein möglicher Lösungsansatz zur Umsetzung einer Zulassung auf freizügigen Fahrbetrieb stellt die Definition einer standardisierten Schnittstelle und einer Softwaresimulation dar, dank derer Deltazulassungen möglich sind.

Für eine sichere und zuverlässige Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation sind zudem Voraussetzungen in der Kommunikationsinfrastruktur zu schaffen (vgl. Abschnitt 4.4).

[370] Vgl. TEIV, Anlage 3, D.6.
[371] Vgl. TEIV, § 9, Absatz 1.
[372] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 2.2.1.

Auslöser

Grundsätzlich können Innovationen über einen Technology Push oder einen Market-Pull in den Markt gelangen oder durch exogene Faktoren in der Umwelt von Unternehmen und Kunden, zum Beispiel über gesetzliche Anforderungen ausgelöst werden[373]. Übertragen auf die virtuelle Kupplung sind damit drei auslösende Szenarien vorstellbar:

1. Szenario: eigenmotivierte Einführung, da die Wirtschaftlichkeit der virtuellen Kupplung unter Berücksichtigung des erwarteten monetarisierten Nutzens im betrachteten Anwendungsfall positiv ausfällt oder
2. Szenario: Einführung als Forderung der Aufgabenträger im Rahmen ihrer Verkehrsausschreibung oder der EVU im Rahmen ihrer Fahrzeugausschreibung und/oder
3. Szenario: Einführung als zwingende Anforderung an die Fahrzeuge im Ergebnis einer Regelwerksänderung durch den Gesetzgeber

Im Vergleich untereinander erscheint das dritte Szenario als vergleichsweise weniger wahrscheinlich, da sich das aktuelle System der konventionellen Kupplung im Betrieb bewährt und kein Sicherheitsdefizit aufweist. Jedoch würde bei Eintritt des dritten Szenarios der Prozess der Marktetablierung beschleunigt werden, wobei der Bestandsschutz von sieben Jahren gemäß TEIV zu berücksichtigen ist[374].

Im ersten und zweiten Szenario ist davon auszugehen, dass sich die virtuelle Kupplung nicht gleichermaßen stark im SPNV etablieren wird, da die Netzanforderungen und -rahmenbindungen verschieden sind und damit der Nutzen beim Einsatz der virtuellen Kupplung für die Aufgabenträger und EVU unterschiedlich groß ausfällt.

Um zu entscheiden, ob die virtuelle Kupplung in der Verkehrsausschreibung gefordert werden soll, ist vom Aufgabenträger im Vorfeld der Ausschreibung eine Markterkundung und -analyse durchzuführen. Darüber hinaus ist es vorstellbar, die virtuelle Kupplung getrennt von einem konkreten Auftragsprojekt zu entwickeln und zu finanzieren, sodass damit für die entwickelnden Firmen und gegebenenfalls kooperierenden Forschungseinrichtungen kein zeitliches oder wirtschaftliches Projektumsetzungsrisiko verbunden ist.

[373] Vgl. Austermann (2017), S. 87.
[374] Vgl. TEIV, §6 Absatz 3.4.

Für den Systemlebenszyklus der virtuellen Kupplung bedeutet dies, dass ihre Entwicklung entweder deshalb angestoßen wird, weil für die Bahnindustrie ausreichend hohe Anreize für eine eigenmotivierte Entwicklung beispielsweise durch Forschungsförderprogramme bestehen oder weil die virtuelle Kupplung von den Schienenfahrzeugherstellern angeboten werden muss, da sie vom Gesetzgeber oder in den Lastenheften der Fahrzeugausschreibungen der Aufgabenträger oder EVU gefordert wird.

Phase eins bis zehn (Hersteller virtuelle Kupplung)

Die Entwicklung, Validierung und Abnahme der virtuellen Kupplung umfasst die Phasen eins bis zehn der „V"-Darstellung und liegt in der Verantwortung des Herstellers der virtuellen Kupplung beziehungsweise des Fahrzeugs.

Der Prozess der Entwicklung und Testung ist unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit so lange fortzusetzen, bis die virtuelle Kupplung die an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Ein zentrales Entwicklungsziel ist dabei der Nachweis mindestens der gleichen Sicherheit wie die der konventionellen Kupplung. Wie im Abschnitt 5 erläutert, ist die Software der virtuellen Kupplung von zentraler Bedeutung für deren Funktionalität, sodass hier ein besonders großer Entwicklungs-, Simulations- und Prüfaufwand zu erwarten ist.

Bevor die Serienproduktion gestartet werden kann, ist es empfehlenswert, im Rahmen von Referenzimplementierungen die gewünschte Funktionalität nachzuweisen („Proof of conept"), um mit der Vorserie die Produktzulassung zu erreichen und Umbaukonzepte zu entwickeln. Erfahrungen können beispielsweise im Vorfeld mit Prototypen gesammelt werden, welche in Entwicklungsträger eingebaut werden und im Hintergrund der konventionellen Kupplung parallel betrieben werden.

Wichtige Eingangsgrößen für die Phase eins liefern die Abschnitte 4.9 (Anforderungsprofil virtuelle Kupplung und notwendige betriebliche Rahmenbedingungen), 5.4 (Zwischenfazit zur technischen Umsetzbarkeit) und 6.4 (Zwischenfazit zur Wirtschaftlichkeitseinschätzung) der vorliegenden Arbeit. Die Abschnitte 4.9 und 5.4 können zudem als Ausgangspunkt für die Phasen zwei und drei herangezogen werden.

Phase eins bis zehn (Schienenfahrzeughersteller)

Nach heutigem Recht durchläuft der Schienenfahrzeughersteller zeitversetzt die Phasen eins bis zehn in Bezug auf die Integration der virtuellen Kupplung in das auszurüstende Regionaltriebfahrzeug. Für ihn endet die Phase zehn mit der Zulassung der Schienenfahrzeuge in Deutschland durch die zuständige Sicherheitsbehörde sowie mit der Abnahme der Fahrzeuge durch den Auftraggeber (in der Regel Aufgabenträger oder EVU).

Ist es vorgesehen, dass die Fahrzeuge auf dem Transeuropäischen Eisenbahnnetz (TEN) verkehren, ist die Zulassung als Inbetriebnahmegenehmigung (IBG) nach der Transeuropäischen-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung (TEIV) durchzuführen[375]. Sollen die Schienenfahrzeuge nur außerhalb des TEN auf öffentlichen Eisenbahninfrastrukturen in Deutschland eingesetzt werden, wird die Zulassung als Abnahme nach EBO durchgeführt. Für den Betrieb auf nichtöffentlichen Eisenbahninfrastrukturen erfolgt die Zulassung als Betriebserlaubnis nach der Bau- und Betriebsordnung für Anschlussbahnen (BOA). Je nachdem welcher Zulassungsakt angestrebt wird, sind unterschiedliche Regelwerke anzuwenden und Anforderungen zu erfüllen. Dass alle Voraussetzungen zur Durchführung des Zulassungsprozesses per Verwaltungsakt vorliegen, ist vom Antragsteller nachzuweisen.[376] Betrachtet man die geografische Verteilung des konventionellen TEN, wird deutlich, dass ein Großteil der SPNV-Netze in Deutschland mit diesen gemeinsame Schnittmengen haben[377]. Wichtig ist es daher, bei der Entwicklung der virtuellen Kupplung nicht nur die nationalen Zulassungsaspekte zu berücksichtigen, sondern auch auf europäische Regelwerke zu achten und die europäische Interoperabilität zu gewährleisten. Die Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit stellt auch bei der Entwicklung auf Seiten des Schienenfahrzeugherstellers einen zentralen Punkt dar.

Zusätzlich zur Abnahme durch die zuständige Sicherheitsbehörde bedarf es der Feststellung der Kompatibilität mit den technischen, betrieblichen und sicherheitsrelevanten Anforderungen des Netzes oder Teilnetzes auf denen die

[375] Vgl. TEIV, §1.
[376] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe c).
[377] Vgl. Europäisches Parlament und Rat (2004), Anhang 1, Abschnitt 3.3.

Fahrzeuge verkehren sollen[378]. Diese Frage ist bilateral zwischen Fahrzeug- und Infrastrukturbetreiber zu klären[379].

Phase elf bis dreizehn (EVU und Schienenfahrzeughersteller)

Während der Phasen elf bis dreizehn der „V"-Darstellung sind die Leistungsfähigkeit der virtuellen Kupplung kontinuierlich vom EVU zu überwachen und eventuell notwendige (Sicherheits-)Anpassungen und Verbesserungen, zum Beispiel in Form von Systemsoftware-Updates, vorzunehmen. Dabei ist im Rahmen des Obsoleszenzmanagements zu gewährleisten, dass für die Instandhaltung notwendige Ersatzteile stets zur Verfügung stehen. Eine besondere Herausforderung für die virtuelle Kupplung ergibt sich hier in Bezug auf die Elektronik, da diese eine wesentlich kürzere Lebensdauer als das Schienenfahrzeug selbst aufweist.

Damit das Potenzial, welches sich aus der flexibleren Fahrzeugdisposition ergibt, gehoben werden kann, muss das EVU dafür Sorge tragen, dass ihre Triebfahrzeugführer nachweislich befähigt werden, die potenziell in Frage kommenden Fahrzeugbaureihen zu führen und mögliche Infrastrukturen zu befahren[380]. Zudem sind die Mitarbeiter der EVU auf eventuelle neue Störungen und Anforderungen bei der Instandhaltung vorzubereiten und zu schulen. Vergleichbar mit dem Kunden- und System-Service der Verkehrs-Aktiengesellschaft Nürnberg[381] ist es in diesem Zusammenhang vorstellbar, dass sich Berufsprofile weiterentwickeln, um das Störungsmanagement und den Service für die Fahrgäste zu verbessern. Qualifizierte Mitarbeiter des Zugbegleitpersonals könnten im Störungsfall für Handlungen in der Rückfallebene herangezogen werden[382].

Phase vierzehn (EVU oder Aufgabenträger)

In der letzten Phase des Lebenszyklus ist die virtuelle Kupplung vom Eigentümer des Schienenfahrzeugs stillzulegen und zu entsorgen. Diese Phase gehört nicht in den Prozess der Einführung und Etablierung der virtuellen Kupplung und wird daher hier nicht näher betrachtet.

[378] Vgl. Hecht et al. (2008), S. 491.
[379] Vgl. BMVI (2011), S. 16.
[380] Vgl. TfV, § 3, Absatz 1.2 i.V.m. Anlage 2, A.2. g) und h).
[381] Vgl. Striebich (2016), Folie 17.
[382] Vgl. Breustedt (2017), S. 33.

7.1.2 Abschätzungen zum zeitlichen Rahmen

Aufgrund der oben dargestellten vielfältigen Auslöser für die Einführung und Etablierung des Einsatzes der virtuellen Kupplung, kann aus heutiger Sicht noch keine verbindliche Aussage darüber getroffen werden, zu welchem Zeitpunkt die virtuelle Kupplung im SPNV in großen Teilen der SPNV-Flotte tatsächlich eingesetzt wird. Stattdessen soll nachfolgend herausgestellt werden, wann der Einsatz der virtuellen Kupplung am frühestens möglich wäre und welche Faktoren seine Marktetablierung positiv unterstützen.

Überführt man den soeben chronologisch vorgestellten Lebenszyklus in die tägliche Praxis, können vier, zum Teil parallel laufende Prozesse identifiziert werden (vgl. Abbildung 7-2):

- der Beschaffungsprozess der virtuellen Kupplung,
- der Beschaffungsprozess der Schienenfahrzeuge,
- der Ausschreibungsprozess des Verkehrsvertrags sowie
- der Betrieb.

Die nachfolgende Erläuterung der einzelnen Prozesse wird verdeutlichen, dass im SPNV die Einführung der virtuellen Kupplung frühestens 2025/2026 möglich sein wird.

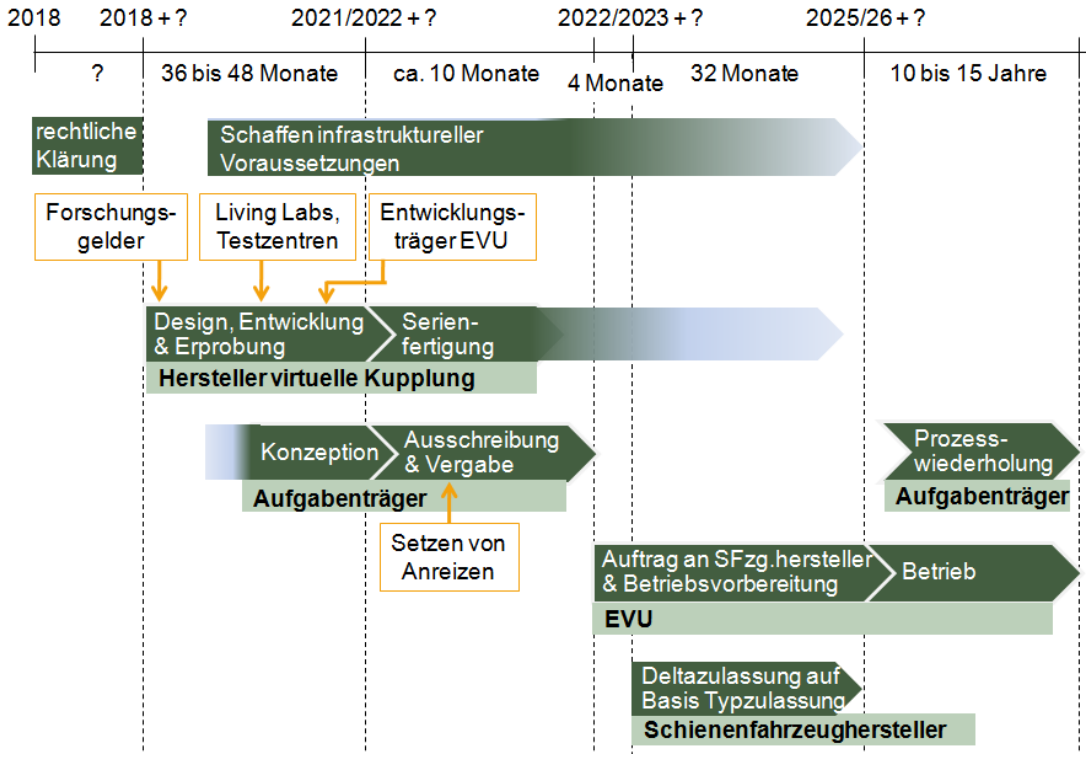


Abbildung 7-2 Zeitliche Abschätzung zur Markteinführung
Quelle: eigene Darstellung

Bevor die vier Prozesse gestartet werden können, sind vorab offene rechtliche Fragen (zum Beispiel Konformität zum Regelwerk) und Haftungverantwortlichkeiten zu klären, um für alle Beteiligten die notwendige rechtliche Planungssicherheit zu erreichen. Besteht daraus der Bedarf, Regelwerke anpassen zu müssen, verlängert sich der benötigte Zeitbedarf. Darüber hinaus ist bis zur Betriebsaufnahme sicher zu stellen, dass die notwendige Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung steht. Vergleichbar mit den USA, welche im Januar 2016 zur Förderung des automatisierten Fahrens auf der Straße ein vier Milliarden-Dollar-Programm zur Klärung rechtlicher Fragen und für Testzwecke aufgelegt haben[383], könnte der Bund hierbei unterstützen. Eine solche Unterstützung wäre beispielsweise im Rahmen eines Fachprogramms des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur zielführend. Vergleichbares existiert in Deutschland bereits für das hochautomatisierte Fahren auf der Straße im Rahmen des Projektes PEGASUS, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie noch bis 2019 gefördert wird und zum Ziel hat, ein Vorgehen für das Testen automatisierter Fahrfunktionen zu entwickeln[384].

Beschaffungsprozess virtuelle Kupplung

Für die Ermittlung des Zeitbedarfs für den Beschaffungsprozess, welcher die oben dargestellten Phasen eins bis zehn, also den Zeitraum vom Konzept bis zur erfolgreichen Markteinführung der virtuellen Kupplung umfasst, ist zunächst die Zeit für die Entwicklung ihrer Serienkompetenz abzuschätzen (ERG 9 und IRG V, vgl. Abschnitt 5.1.1). Diese umfasst die Entwicklung, Erprobung und projektspezifische Prüfungen und kann bei Innovationen im SPNV mit etwa 36 bis 48 Monaten angenommen werden[385]. Eine staatliche Förderung von Forschung und Entwicklung, welche nicht auf monetäre Effekte eines Projektes fokussiert, sondern als Ziel die Stärkung des Gesamtsystems SPNV verfolgt, kann hierbei ebenso unterstützen und zu Verkürzungen führen, wie die vorbereitende Bearbeitung von einzelnen Forschungsfragen im Bereich der Simulation und Modellierung im Rahmen von Verbundvorhaben oder die Förderung des Ausbaus der Kommunikationsinfrastruktur.

[383] Vgl. Wagner (2017), S. 3.
[384] Vgl. PEGASUS (ohne Angabe).
[385] Vgl. SCI, KCW (2012), Folie 45.

Darüber hinaus wird es als zielführend eingeschätzt, dass EVU Erprobungsträger zur Verfügung stellen, an denen in Laborumgebung, auf einem Testgelände, wie zum Beispiel Wegberg-Wildenrath, und schließlich im Feldtest die Technologie umfassend geprüft und validiert werden kann. Weiterhin können zur Unterstützung der Entwicklungs- und Validierungsphase Living Labs und Testzentren genutzt oder etabliert werden. Beispielhaft kann hier auf das Digitale Testfeld Autobahn auf der A9 verwiesen werden, das von der Bundesregierung eingerichtet wurde, um das vernetzte und automatisierte Fahren auf der Straße in einem idealtypischen Umfeld, einem Labor unter Realbedingungen, zu erproben[386].

Ausschreibungsprozess des Verkehrsvertrages

Bereits parallel zur Entwicklung der virtuellen Kupplung kann der Aufgabenträger über einen Zeitraum von etwa 24 bis 36 Monaten die zu vergebende Leistung planen und konzipieren[387]. Von der Veröffentlichung im EU-Amtsblatt bis zur Betriebsaufnahme vergehen üblicherweise etwa 46 Monate, wobei etwa zehn Monate für den Vergabeprozess an die EVU, etwa vier Monate für die Beauftragung des Schienenfahrzeugherstellers[388] und etwa 32 Monate für die Betriebsvorbereitung zur Verfügung stehen.

Beschaffungsprozess Schienenfahrzeug

Diese etwa 32 Monate benötigt der Schienenfahrzeughersteller für den Beschaffungsprozess der Deltazulassung des Schienenfahrzeuges auf Basis einer Typzulassung, welcher die Delta-Entwicklung, Fertigung und Zulassung umfasst[389]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Implementierung der virtuellen Kupplung nicht als Neuentwicklung, sondern als Weiterentwicklung des Schienenfahrzeugs verstanden wird. Je nach Bauart und Schienenfahrzeughersteller kann der Forschungs- und Entwicklungsbedarf dabei stark variieren. Der Sicherheitsnachweis des Fahrzeugs wird parallel zur Entwicklung des Fahrzeugs beziehungsweise des Systems erbracht und beginnt bereits in der Konzeptphase[390].

[386] Vgl. acatech (2015), S. 27.
[387] Vgl. SCI, KCW (2012), Folie 45.
[388] Vgl. Woywod (2015), Folie 17.
[389] Vgl. BMVI (2011), S. 23.
[390] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt et al. (2012c), S. 3.

Betrieb

Nach Betriebsaufnahme erbringt das EVU für die Dauer des Verkehrsvertrages, also durchschnittlich 12 Jahre[391], den SPNV für das vergebene Netz. Während dieser Zeit können Bestandsfahrzeuge mit der virtuellen Kupplung nachgerüstet werden. Hierbei sind jedoch betriebliche Einschränkungen zu beachten, da die umzurüstenden Fahrzeuge für die Dauer der Umrüstung nicht für den Betrieb zur Verfügung stehen. Es empfiehlt sich daher, die Umrüstungen nicht separat, sondern im Rahmen der Instandhaltungen, Retrofit oder Hauptuntersuchungen durchzuführen. Ein deutlich größeres Umsetzungspotenzial bietet sich jedoch immer dann, wenn Verkehrsverträge enden und Neuausschreibungen die Möglichkeit bieten, das Verkehrsangebot mit neuen Fahrzeugkonzepten zu optimieren oder innovative Technologien in die Fahrzeuge aufzunehmen und im Rahmen von Ausschreibungen mit Anreizen ihre Einführung zu forcieren, zum Beispiel durch Erweiterung der Vergabekriterien.

Migrationspfad

Der Nutzen der virtuellen Kupplung ist im Kern auf die Flexibilisierung des Betriebs zurückzuführen. Aus Sicht der EVU ist ihr Nutzen umso höher und damit ihre schnelle Einführung und Verbreitung umso wahrscheinlicher, je inhomogener ihr Fuhrpark ist und je flexibler die Fahrzeugdisposition erfolgen soll.

Bezogen auf die gesamte SPNV-Flotte ist jedoch davon auszugehen, dass sich die virtuelle Kupplung in ihrer Einführungsphase eher langsam verbreiten wird. Gründe liegen in den langen Lebenszyklen der Schienenfahrzeuge, den organisatorischen Strukturen und Ausschreibungsprozessen im SPNV sowie in der im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern größeren Innovationsträgheit des Eisenbahnsektors[392]. Gleichzeitig ist es in Anbetracht des hohen intermodalen Wettbewerbsdrucks und den zahlreichen technologischen und gesellschaftlichen Veränderungen zwingend notwendig, dass Innovationen auch im Bahnsektor schneller und einfacher in die Fahrzeuge integriert werden[393]. Vom dem aktuellen Automatisierungs- und Digitalisierungstrend kann dabei eine unterstützende Wirkung ausgehen (vgl. Abschnitt 7.4). Je nachdem, wie schnell der Nutzen gehoben werden kann und wie

[391] Vgl. BAG-SPNV (2016a), S. 17.
[392] Vgl. Schuppe, Weidner (2015), S. 334.
[393] Vgl. Everding, Fürstenau (2016), S. 60.

groß dieser ausfällt, kann die Akzeptanz der virtuellen Kupplung am Markt stark steigen. Dies spiegelt sich im Anstieg der Verbreitungskurve in der Wachstums- und Reifephase des Produktlebenszyklus wider[394]. Um den Etablierungsprozess zu beschleunigen, ist daher eine hohe Akzeptanz bei den EVU, den Aufgabenträgern, Gewerkschaften und weiteren relevanten Marktakteuren zu unterstützen. Es kann hierbei an der bereits vorhandenen Akzeptanz für autonom fahrende U-Bahnen, Straßenbahnen und Seilbahnen angeknüpft werden[395].

Unter der Annahme, dass die virtuelle Kupplung nicht im Regelwerk festgeschrieben wird, kann davon ausgegangen werden, dass eine vollständige, 100-prozentige, Durchdringung des Marktes nicht erreicht werden wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Nutzen des Einsatzes der virtuellen Kupplung in Einzelfällen nicht ausreichen wird, um die durch sie entstehenden Kosten zu decken.

Zudem kann davon ausgegangen werden, dass es eine lange Übergangsphase geben wird, in der nur wenige Fahrzeuge über eine virtuelle Kupplung verfügen und entsprechend nicht das vollständige Nutzenpotenzial ausgeschöpft werden kann. Die Markteinführungsstrategie muss daher Szenarien des gemischten Betriebs berücksichtigen, sowohl innerhalb der Flotte eines EVU als auch EVU-übergreifend, in Bezug auf das Verkehrsnetz eines Aufgabenträgers. Dass dies technisch und betrieblich zu großen Herausforderungen führt, zeigen Erfahrungen aus der Automatisierung des U-Bahn-Betriebs der U2 und U3 in Nürnberg, welche auch unter „rollendem Rad“ im Mischbetrieb erfolgte[396].

Wahrscheinlich erscheint daher ein eher kubisches Wachstum der Marktverbreitung, welches später abflacht und sich einem Wert von unter 100 Prozent annähert (vgl. Abbildung 7-3 in Annäherung an die Theorie des Produktlebenszyklus[397]).

[394] Vgl. Deutscher Bundestag (2016), S. 4.
[395] Vgl. Gralla (2016a), S.26.
[396] Vgl. Striebich (2016), Folie 29.
[397] Vgl. Deutscher Bundestag (2016), S. 4f.

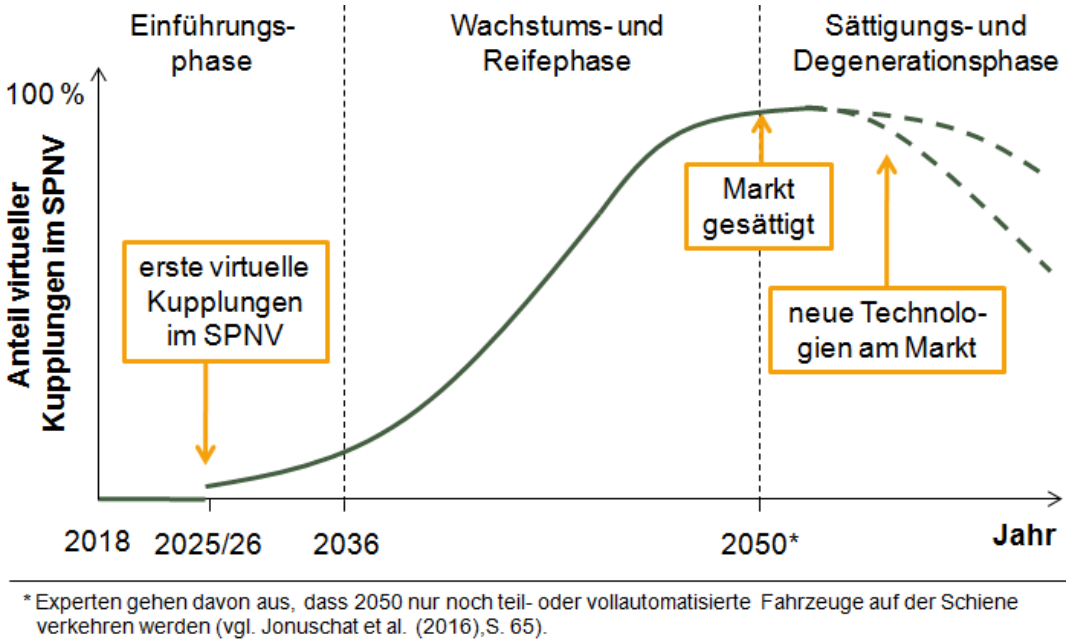


Abbildung 7-3 Möglicher Migrationspfad „Einsatz virtuelle Kupplung in der deutschlandweiten SPNV-Flotte“
Quelle: eigene Darstellung

Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass der aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungstrend dazu führen wird, dass sich das hochautomatisierte Fahren auf der Schiene weiterentwickeln und schließlich auch durchsetzen wird (vgl. Abschnitt 7.4). Geht die Entwicklung hin zu kleinen autonomen Fahrzeugen, kann die virtuelle Kupplung nur eine Zwischenlösung darstellen. Bleibt hingegen zwar das Fahrzeugkonzept der gekuppelten Einheiten bestehen, aber werden zudem zum Bespiel Gefäß- und Beförderungsgrößen verändert, hat die virtuelle Kupplung das Potenzial, über einen langen Zeitraum am Markt etabliert zu bleiben. Je nachdem, welche Entwicklung eintritt, wird die Verbreitungskurve in der Phasen „Sättigung und Degeneration“ des Produktlebenszyklus[398] entsprechend stärker oder schwächer abfallen.

Zusammenfassend können für die virtuelle Kupplung, die in Abbildung 7-4 dargestellten, vier erfolgskritischen Faktoren herausgestellt werden.

[398] Vgl. Deutscher Bundestag (2016), S. 4.

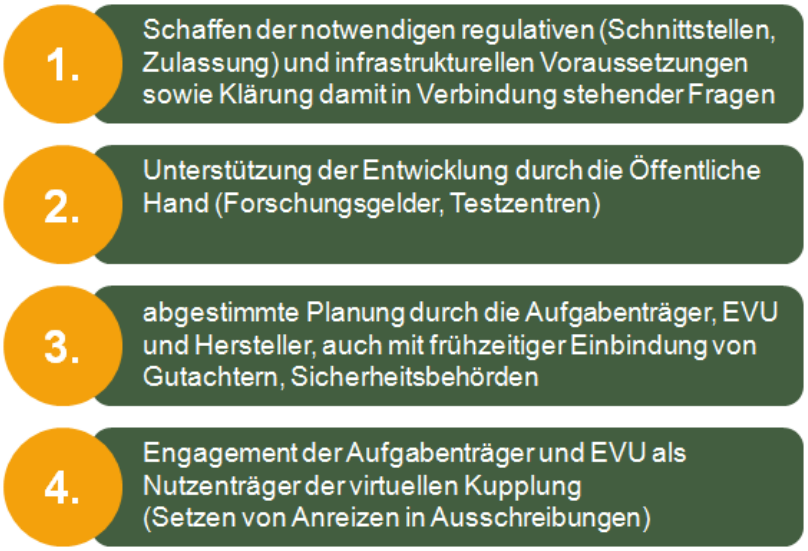


Abbildung 7-4 Erfolgskritische Faktoren für die Markteinführung und -etablierung der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

An verschiedenen Stellen wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Konformität der virtuellen Kupplung mit ihrem rechtlichen Umfeld zwingende Voraussetzung für ihre Markteinführung ist. Aufgrund dieser zentralen Bedeutung wird darauf nachfolgend detaillierter eingegangen.

7.2 Rechtliches Umfeld

Wenngleich die Erforschung neuer Technologien zu den deutschen Grundrechten zählt[399], ergeben sich dennoch rechtliche Fragestellungen, die zu klären sind, um den relevanten Akteuren die Rechtssicherheit zu geben, welche für die erfolgreiche Etablierung einer neuen Technologie Voraussetzung ist. Auch die Umsetzung der virtuellen Kupplung wirft solche juristischen Fragen auf, da aus deren Einsatz neue Systemcharakteristika und Rahmenbedingungen für das SPNV-System entstehen. Es ist daher zu prüfen, ob beziehungsweise unter welchen Voraussetzungen die Konformität zum rechtlichen Umfeld gegeben ist.

Vor diesem Hintergrund sollen ausgewählte rechtliche Fragestellungen diskutiert und notwendige Weiterentwicklungen des rechtlichen Umfeldes aufgezeigt werden. Hierzu werden zunächst die erwähnten neuen Systemcharakteristika und Rahmenbedingungen vorgestellt (Abschnitt 7.2.1), um im Anschluss auf das Eisenbahnrecht des Bundes (Abschnitt 7.2.1) und der Europäischen Union (Abschnitt 7.2.3) sowie auf haftungsrechtliche Fragen (Abschnitt 7.2.4) eingehen zu können.

[399] Vgl. GG, Artikel 5, Absatz 3.

Die nachfolgende Darstellung folgt stets dem Prinzip, dass nach einer kurzen Einleitung in das Fachgebiet, von der Umsetzung der virtuellen Kupplung betroffene Festlegungen und mögliche Rechtsfolgen vorgestellt sowie im Anschluss notwendige Handlungen erläutert werden. Der Abschnitt schließt mit einer Zusammenfassung der rechtlichen Herausforderungen (Abschnitt 7.2.5).

7.2.1 Rechtlich relevante neue Charakteristika und Rahmenbedingungen

Es werden nachfolgend nur die Charakteristika betrachtet, welche sich von der konventionellen Kupplung unterscheiden. Vorausgesetzt wird, dass jedes Fahrzeug, für sich betrachtet die notwendigen Regelwerke erfüllt.

Mit dem Einsatz der virtuellen Kupplung im SPNV geht die Etablierung eines – für den SPNV in Deutschland – neuen Betriebskonzeptes einher: Triebfahrzeuge eines virtuellen Zugverbandes sind nicht mehr physisch, sondern ausschließlich virtuell, über eine Luftschnittstelle miteinander verbunden (vgl. Abbildung 7-5, **Merkmal 1**). Darüber hinaus sind als neue Charakteristika zu nennen (vgl. Abbildung 7-5):

- Der Slave folgt dem Master führerlos, automatisiert in einem variablen Sicherheitsabstand (**Merkmal 2**). Es befindet sich im Führerstand des Slaves kein Triebfahrzeugführer, der während des Betriebs als virtueller Zugverband die manuelle Steuerung übernehmen kann[400].
- Einzelne Funktionen des Slaves werden vom Master aus gesteuert, andere von diesem automatisiert umgesetzt (**Merkmal 3**, vgl. Abschnitt 4.4).
- Die konventionelle Kupplung ist zu entfernen, eine Hilfskupplung zum Abschleppen aber weiterhin vorzusehen[401] (**Merkmal 4**).

[400] Die Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab) beinhaltet bereits Regelungen für den unbemannten Betrieb von Straßenbahnen (vgl. BOStrab, §53, Absatz 2). Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungen der Regelwerke für den Straßenbahn- und Vollbahnbereich sowie aufgrund ihrer unterschiedlichen Rahmenbedingungen, ist jedoch davon auszugehen, dass eine Übertragbarkeit der Anforderungen nicht ohne weiteres möglich ist (vgl. Polz, Beck (2000), S. 681). Aus diesem Grund und da sich die vorliegende Arbeit explizit mit Triebfahrzeugen für den SPNV beschäftigt, für welche die BOStrab nicht gilt, wird an dieser Stelle auf nähere Erläuterungen zur BOStrab verzichtet.

[401] Zu prüfen sind zum Beispiel die Folgen auf die Crashfestigkeit und den Brandschutz. Daraus folgende notwendige Änderungen sind umzusetzen. Hierbei ist auch zu prüfen, ob die konventionelle Kupplung zu einer virtuellen Kupplung weiterentwickelt werden kann.

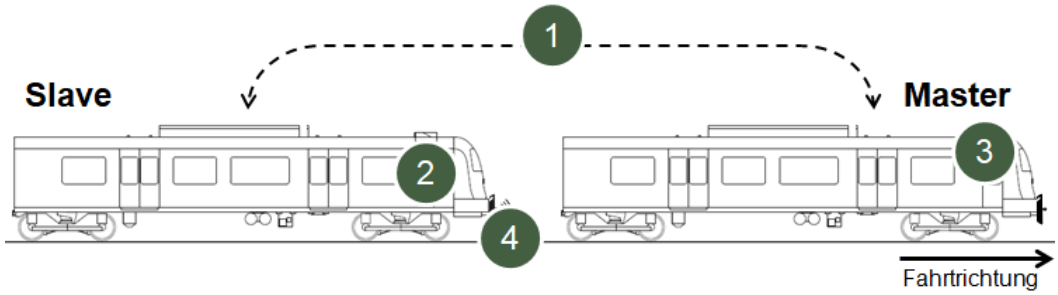


Abbildung 7-5 Rechtlich relevante Charakteristika der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Sonstige notwendige Anpassungen der Fahrzeuge und der Infrastruktur führen zu keinen grundsätzlichen Änderungen des Fahrzeugverhaltens oder des SPNV-Betriebs.

7.2.2 Eisenbahnrecht des Bundes

In Deutschland bildet das Eisenbahnrecht des Bundes das zentrale juristische Umfeld für den Bau und den Betrieb von SPNV-Schienenfahrzeugen. Für die vorliegende Fragestellung relevant sind in diesem Zusammenhang insbesondere das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG) sowie die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO). Beide Regularien gelten für Eisenbahnen und damit für EVU, welche Eisenbahnverkehrsleistungen erbringen[402].

Die hier vorgestellten Überlegungen zum notwendigen Klärungs- und Anpassungsbedarf stehen im Kontext der notwendigen Zulassung von Schienenfahrzeugen, welche das Modul „Virtuelle Kupplung“ einsetzen sollen.

Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)

Die Gewährleistung eines sicheren und attraktiven Eisenbahnbetriebs sowie die Umsetzung von Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaften oder der Europäischen Union im Bereich des Eisenbahnrechts sind Ziel des AEG[403].

[402] Die EBO gilt ausschließlich für regelspurige Eisenbahnen, welche Verkehrsleistungen auf dem öffentlichen Eisenbahnnetz erbringen (vgl. EBO, § 1, Absatz 1), das AEG für alle Eisenbahnen (vgl. AEG, § 1, Absatz 2 in Verbindung mit § 2, Absatz 1).
[403] Vgl. AEG, § 1, Absatz 1.

Für die virtuelle Kupplung sind insbesondere folgende Paragraphen relevant:

§ 4 – Sicherheitspflichten, Zuständigkeiten des Eisenbahn-Bundesamtes und § 4a – Instandhaltung:

Schienenfahrzeuge müssen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme den Anforderungen der öffentlichen Sicherheit an Bau und Betrieb genügen.

- ➔ Ist eine IBG erforderlich, müssen EVU, Halter von Eisenbahnfahrzeugen oder Hersteller nachweisen, dass mit der Umsetzung der virtuellen Kupplung die Anforderungen der öffentlichen Sicherheit erfüllt werden.
- ➔ Weiterhin sind die EVU dazu verpflichtet, das notwendige Personal für den Betrieb und die Instandhaltung des virtuellen Zugverbandes so zu schulen, dass der Betrieb sicher geführt und die Fahrzeuge in betriebssicherem Zustand gehalten werden können[404].

§ 5a Aufgaben und Befugnisse der Eisenbahnaufsichtsbehörden:

Für die Abwehr von Gefahren, welche beim Betrieb der Eisenbahnen entstehen, sind die Eisenbahnaufsichtsbehörden zuständig[405].

- ➔ Aufgrund dieser zentralen Rolle der Eisenbahnaufsichtsbehörden ist es als zweckdienlich einzustufen, diese frühzeitig in die Entwicklung und Umsetzung der virtuellen Kupplung einzubinden.

[404] Vgl. AEG, § 4, Absatz 1ff und § 4a, Absatz 1 und 2.
[405] Vgl. AEG, § 5a, Absatz 1.

§ 7b Änderungen, Rücknahme und Widerruf der Sicherheitsbescheinigung und nationalen Bescheinigung:

Die EVU dürfen nur dann am regelspurigen öffentlichen Eisenbahnbetrieb teilnehmen, wenn sie über eine Sicherheitsbescheinigung verfügen, welche unter anderem nachweist, dass das EVU die besonderen Anforderungen für den sicheren Verkehrsbetrieb auf dem betreffenden Schienennetz erfüllt[406]. Verfügt das EVU über keine Sicherheitsbescheinigung, bedarf es für die Aufnahme des Betriebes der Erlaubnis der Aufsichtsbehörde[407].

➔ Zu klären ist, ob das Betriebskonzept der virtuellen Kupplung eine wesentliche Änderung im Sinne des § 7b des AEG darstellt. Ist dies der Fall, muss das EVU eine Änderung der erteilten Sicherheitsbescheinigung beantragen[408], da andernfalls eine Ordnungswidrigkeit vorliegt, welche mit einer Geldbuße geahndet werden kann[409].

Zusammengefasst ist festzuhalten, dass im AEG keine Festlegungen existieren, welche die Umsetzung der virtuellen Kupplung per se ausschließen. Nachzuweisen ist jedoch, dass der Betrieb des virtuellen Zugverbandes sicher erfolgen kann. Zudem ist zu prüfen, ob die Sicherheitsbescheinigungen der EVU Gültigkeit behalten. Weiterhin sind das für den Betrieb und die Instandhaltung des virtuellen Zugverbandes benötigte Personal entsprechend zu schulen und die Eisenbahnaufsichtsbehörden frühzeitig einzubinden (vgl. Abbildung 7-6).

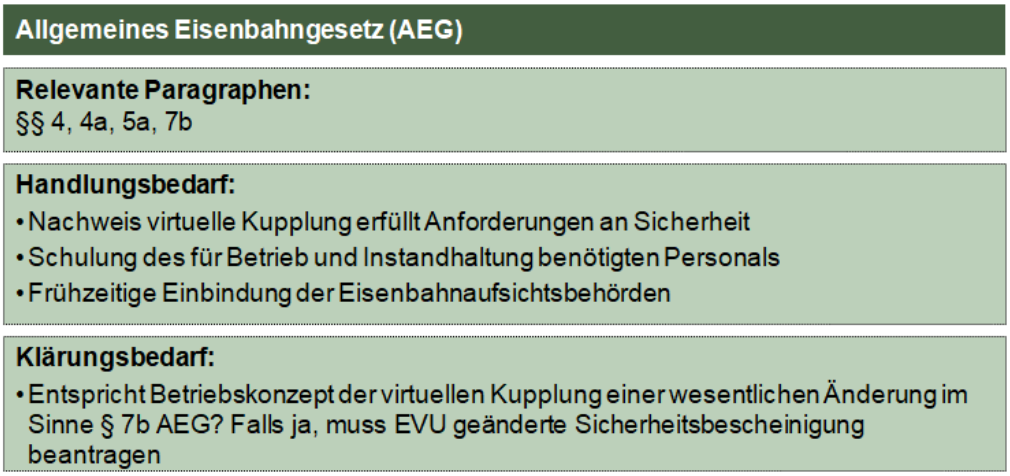


Abbildung 7-6 Rechtsfolgen aus dem AEG
Quelle: eigene Darstellung

[406] Vgl. AEG, § 7a, Absatz 1f..
[407] Vgl. AEG, § 7f, Absatz 1.
[408] Vgl. AEG, § 7b, Absatz 1.
[409] Vgl. AEG, § 28, Absatz 1 in Verbindung mit Absatz 2.

Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)

Für Schienenfahrzeuge des SPNV in Deutschland ist weiterhin die EBO von zentraler Bedeutung, da sie Rahmenvorschriften über die Ausgestaltung der Fahrzeuge und Grundsätze des Eisenbahnbetriebs enthält, welche die Mindestanforderungen der Sicherheit im Eisenbahnbetrieb gewährleisten[410].

§ 2 – Allgemeine Anforderungen:

Schienenfahrzeuge müssen den Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen und hierzu den Vorschriften der EBO sowie den anerkannten Regeln der Technik entsprechen[411].

➔ Analog zum § 4 des AEG muss nachgewiesen werden, dass die virtuelle Kupplung mindestens das gleiche Maß an Sicherheit und Ordnung bietet wie die konventionelle Kupplung.

§ 18 – Einteilung, Begriffsklärungen:

Triebfahrzeuge sind entweder unmittelbar zu bedienen oder von der Steuerungseinrichtung eines führenden Fahrzeugs oder durch Fernsteuerung zu steuern[412].

➔ Das Betriebskonzept der virtuellen Kupplung sieht vor, dass die Traktions- und Bremssteuerung des Slaves zur Einhaltung des notwendigen Sicherheitsabstandes automatisiert erfolgt. Hierzu nutzt der Slave die vom Master zur Verfügung gestellten Informationen. Um zu gewährleisten, dass der Slave auch weiterhin als Triebfahrzeug eingestuft wird, ist das Bereitstellen der notwendigen Informationen einer Fernsteuerung gleichzusetzen.

[410] Vgl. EBO, § 2, Absatz 1.
[411] Vgl. EBO, § 2, Absatz 1 in Verbindung mit Absatz 2.
[412] Vgl. EBO, § 18. Absatz 4.

§ 24 – Zug- und Stoßeinrichtungen:

An beiden Enden müssen die Fahrzeuge über federnde Zug- und Stoßeinrichtungen verfügen[413].

- ➔ Es ist vorgesehen, die konventionelle Kupplung durch die virtuelle Kupplung zu ersetzen. Hierdurch entfallen außer dem Kupplungskopf und der Elektrokontaktkupplung auch die Kupplungsstange und die Anlenkung, welche einen Großteil des Energieverzehrs der Kupplung übernehmen[414] (vgl. Abschnitt 2.3.3). Für die Umsetzung der virtuellen Kupplung müssen daher alle potenziell virtuell zu kuppelnden Triebfahrzeuge an beiden Enden jeweils mit alternativen federnden Zug- und Stoßeinrichtungen ausgerüstet sein. Im Rahmen der technischen Umsetzungen der virtuellen Kupplung ist dabei auch zu prüfen, inwieweit die konventionelle Kupplung unter Beibehaltung von Energieverzehrelementen zu einer virtuellen Kupplung weiterentwickelt werden kann.
- ➔ Alternativ ist zu prüfen, ob und unter welchen Voraussetzungen der virtuelle Zugverband als ein (dauerhaft) verbundenes Fahrzeug definiert werden kann. Vorstellbar ist zum Beispiel eine Definition über die gleiche Geschwindigkeit, Position und Zugkennung. In diesem Fall würde es genügen, wenn sich die Zug- und Stoßeinrichtungen ausschließlich am Anfang und am Ende des Zugverbandes befänden[415].

§ 34 – Begriff, Art und Länge der Züge:

Züge, also Einheiten aus mehreren Regelfahrzeugen, müssen Signale führen, die den Schluss und (bei Dunkelheit und unsichtigem Wetter) die Spitze erkennen lassen[416].

- ➔ Auch hier ist zu definieren, dass der virtuelle Zugverband regulatorisch als ein Zug eingestuft wird. In Folge dessen würden der Master mit Spitzensignal, aber ohne Schlusssignal und der Slave ohne Spitzensignal, dafür aber mit Schlusssignal verkehren.

[413] Vgl. EBO, § 24, Absatz 1.
[414] Vgl. Voith Turbo Scharfenberg (2012), S. 22.
[415] Vgl. EBO, § 24, Absatz 2.
[416] Vgl. EBO, § 34, Absatz 1, in Verbindung mit Absatz 6.

§ 35 – Bremsen der Züge:

Verkehren Züge mit Geschwindigkeiten von über 50 km/h sind diese mit einer durchgehenden Bremse auszustatten. Zudem sind unter anderem dann Bremsproben vorzunehmen, wenn der Zug den Anfangsbahnhof verlässt oder sobald der Zug ergänzt oder getrennt wurde[417].

- ➔ Der virtuelle Zugverband besteht aus zwei Fahrzeugen, welche jeweils eine separate, voneinander unabhängige Bremssteuerung besitzen. Wird der virtuelle Zugverband als Zug im Sinne des § 34, Absatz 1 der EBO akzeptiert, ist der § 35 der EBO anzupassen oder inhaltlich um einen neuen Absatz zu ergänzen.
- ➔ Eine Bremsprobe des virtuellen Zugverbandes ist zu den genannten Szenarien vorzusehen.

§ 39 – Zugfolge:

Verkehren Züge mit Geschwindigkeiten von mehr als 30 km/h, dürfen sie nur im Abstand der Zugfolgestellen einander folgen[418].

- ➔ Analog zu den vorherigen Paragraphen, muss auch hier der virtuelle Zugverband mit dem konventionellen Zugverband gleichgesetzt werden, um zu erreichen, dass sich Master und Slave gleichzeitig im selben Blockabschnitt aufhalten dürfen.

§ 45 – Besetzen der Triebfahrzeuge und Züge:

Arbeitende Triebfahrzeuge sind während der Fahrt mit einem Triebfahrzeugführer zu besetzen, sofern es sich nicht um ein gesteuertes Fahrzeug handelt[419].

- ➔ Diese Vorschrift kann nur dann als erfüllt gelten, wenn die Bereitstellung der Informationen, welche der Slave zum automatisierten Folgen des Masters benötigt, genügt, um das virtuelle Folgen als Fernsteuerung einzustufen.

[417] Vgl. EBO, § 35, Absatz 1 und 7.
[418] Vgl. EBO, § 39, Absatz 3.
[419] Vgl. EBO, § 45, Absatz 1 in Verbindung mit EBO, § 18, Absatz 4.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in der EBO keine Vorschriften enthalten sind, welche den Betrieb eines virtuellen Zugverbandes grundsätzlich ausschließen würden. Voraussetzungen hierfür sind jedoch, dass

a) nachgewiesen wird, dass die virtuelle Kupplung mindestens das gleiche Maß an Sicherheit und Ordnung bietet, wie die konventionelle Kupplung,

b) das automatisierte Folgen des Slaves als Fernsteuerung klassifiziert und

c) die Kommunikation des virtuellen Zugverbandes, also die Interaktion von Master und Slave, als gleichwertig zum konventionellen Kuppeln eingestuft wird.

In der weiteren technischen Diskussion ist zudem zu klären, ob die konventionelle Kupplung zu einer virtuellen Kupplung weiterentwickelt und so die vorhandenen Zug- und Stoßvorrichtungen genutzt werden können. Für die betriebliche Umsetzung ist es relevant, dass die Bremsprobe vor Verlassen des Anfangsbahnhofes und nach jedem Stärken und Schwächen des Zuges (virtuell) durchgeführt wird. Eine Zusammenfassung des Ergebnisses ist der Abbildung 7-7 zu entnehmen.

Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)

Relevante Paragraphen:
§§ 2, 18, 24, 34, 35, 39, 45

Handlungsbedarf:
- Nachweis, dass virtuelle Kupplung Anforderungen an Sicherheit und Ordnung erfüllt
- Gleichsetzen virtueller Zugverband mit konventionellem Zugverband
- Gleichsetzen der Bereitstellung der für das Folgen des Slaves notwendigen Informationen mit Fernsteuerung
- Aufnehmen der Möglichkeit von getrennten Bremssteuerungen der Fahrzeuge eines Zugverbandes
- Finden von Ersatz für Energieverzehrelemente konventioneller Kupplung (inkl. Prüfung, ob Weiterentwicklung der konventionellen zu virtuellen Kupplung möglich)
- Ermöglichen des virtuellen Durchführens der Bremsprobe

Klärungsbedarf:
- Kann der virtuelle Zugverband als ein Fahrzeug betrachtet werden? Falls ja, würde es genügen, wenn sich Zug- und Stoßeinrichtungen ausschließlich am Anfang und Ende des Zugverbandes befänden.

Abbildung 7-7 Rechtsfolgen aus der EBO
Quelle: eigene Darstellung

7.2.3 Eisenbahnrecht der europäischen Union

Getrieben von der fortschreitenden Europäisierung und Liberalisierung des Schienenverkehrsmarktes wurde das europäische Eisenbahnrecht in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt[420]. Unter anderem ist es hierbei das Ziel, die Eisenbahnnetze in Europa durchgängig nutzen zu können und einen sicheren und reibungslosen Übergang zwischen den nationalen Grenzen zu ermöglichen[421]. Die Europäische Union hat hierzu zahlreiche Gesetze erlassen, von denen ausschließlich die Verordnungen direkt gelten, während die übrigen Gesetze zuvor in nationales Recht umzusetzen sind[422]. Für die Umsetzung der virtuellen Kupplung sind hier insbesondere nachfolgende zwei Verordnungen näher zu betrachten:

Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 der Kommission (CSM-VO)

Die CSM-VO dient der Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und erleichtert den Zugang zum Schienenverkehrsmarkt durch eine Harmonisierung der Risikomanagementverfahren und der auszutauschenden sicherheitsrelevanten Informationen sowie aus einer Harmonisierung der Ergebnisse des Risikomanagementverfahrens[423]. Anzuwenden ist sie immer dann, wenn technische, betriebliche oder organisatorische Änderungen im Eisenbahnsystem vorgenommen wurden[424]. Wird diese Änderung gemäß der Verordnung als signifikant eingestuft, ist ein festgelegtes Risikomanagement-verfahren anzuwenden[425].

➔ Unter Berücksichtigung der in VO (EU) 402/2013, Artikel 4, Absatz 2 genannten Kriterien ist davon auszugehen, dass die Einführung der virtuellen Kupplung eine signifikante Änderung darstellt. Das EVU oder der Antragsteller, der die Inbetriebnahme der virtuellen Kupplung fordert, ist daher dafür verantwortlich, die detaillierte Signifikanzbewertung sowie das in Anhang 1 der Verordnung erläuterte Risikomanagementverfahren durchzuführen[426]. Im Rahmen dessen ist nachzuweisen, dass die virtuelle Kupplung alle Sicherheitsanforderungen erfüllt, die im Hinblick auf die Akzeptanz, der mit den ermittelten Gefährdungen verbundenen Risiken erforderlich sind[427].

[420] Vgl. Janicki (2011), S. 32.
[421] Vgl. Europäisches Parlament (2017), S. 1.
[422] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe a).
[423] Vgl. VO (EU) 402/2013, Artikel 1, Absatz 1in Verbindung mit Artikel 1, Absatz 2.
[424] Vgl. VO (EU) 402/2013, Artikel 2, Absatz 1.
[425] Vgl. VO (EU) 402/2013, Artikel 2, Absatz 2.
[426] Vgl. VO (EU) 402/2013, Artikel 5, Absatz 1.
[427] Vgl. VO (EU) 402/2013, Anhang 1, Absatz 1.1.1.

Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission (TSI Loc&Pas)

Die Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) wurden eingeführt, um ein sicheres und interoperables, also technisch kompatibles, europäisches Bahnsystem zu verwirklichen[428]. Für die Teilsysteme des Eisenbahnsystems wurden jeweils eigene TSI erarbeitet[429]. Die TSI Loc&Pas enthält in ihrem Anhang technische Spezifikationen für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“[430]. Dabei wird für grundlegende Anforderungen an Sicherheit, Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit, Gesundheitsschutz, Umweltschutz und technische Kompatibilität auf die Anforderungen in Anhang 3 der Richtlinie 2008/57/EG verwiesen[431].

Nachfolgend wird auf einzelne, für die virtuelle Kupplung relevante Spezifikationen eingegangen.

Anhang, Absatz 4.2.2.2.3 – Endkupplung in Verbindung mit Anhang, Absatz 4.2.2.2.4 – Abschleppkupplung:
Sofern an keinem Ende einer Zugeinheit eine Kupplung vorhanden ist, muss eine Vorrichtung zum Anbringen einer Abschleppkupplung vorgesehen sein[432], mit Hilfe derer die Fahrzeugeinheiten im Fall eines Ausfalls durch Abschleppen oder Abschieben geborgen werden können[433].

➔ Wie bereits bei § 24 der EBO beschrieben, soll auf die konventionelle Kupplung verzichtet werden. Folglich ist eine alternative Vorrichtung zum Anbringen einer Abschleppkupplung vorzusehen, welche die Anforderungen der TSI erfüllt[434].

[428] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe b).
[429] Vgl. RL 2008/57/EG, Artikel 5.
[430] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Artikel 1.
[431] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 3.1.
[432] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 4.2.2.2.3.
[433] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 4.2.2.2.4.
[434] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 5.3.3.

Anhang, Absatz 4.2.4.2.1 – Funktionale Anforderungen Bremsen:

Die Hauptbremsfunktion muss ein durchgehendes Signal aufweisen: Das Signal der Bremsanwendung muss von einer zentralen Steuereinheit über eine Steuerleitung an den ganzen Zug übertragen werden[435].

➔ Das Betriebskonzept der virtuellen Kupplung sieht vor, dass die Regelung der Abstandssteuerung automatisiert erfolgt, der Slave also automatisiert beschleunigt und bremst. Der virtuelle Zugverband verfügt daher weder über eine zentrale Steuereinheit noch über eine durchgehende Steuerleitung. Eine Konformität zu dieser Anforderung ist damit nur dann möglich, wenn die Bereitstellung der für den Zugverband notwendigen Informationen des Masters, einer zentralen Steuerung gleichgesetzt wird und wenn die Definition der Steuerleitung um virtuelle, nicht physische, Lösungen erweitert wird.

Anhang, Absatz 4.2.5.3.1 – Allgemeines zum Fahrgastnotruf in Verbindung mit Anhang, Absatz 4.2.5.3.2 – Anforderungen an Informationsschnittstellen

In jedem Fahrzeug des Zugverbandes ist ein Fahrgastalarm vorzusehen, der es den Fahrgästen ermöglicht, den Triebfahrzeugführer auf eine potenzielle Gefahr aufmerksam zu machen. Der Triebfahrzeugführer muss seine Kenntnisnahme dieser Gefahr für den Fahrgast wahrnehmbar bestätigen können.[436]

➔ Wenngleich keine physische Verbindung zwischen Master und Slave besteht, ist dennoch die auditive Kommunikationsmöglichkeit der Fahrgäste des Slaves zum Triebfahrzeugführer im Master vorzusehen (vgl. Abschnitt 4.4).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Konformität der virtuellen Kupplung zu den Anforderungen der TSI Loc&Pas dann gegeben wäre, wenn

a) an den Fahrzeugen eine Vorrichtung zur Anbringung einer Abschleppkupplung vorgesehen wird und

b) die Anforderung bezüglich der zentralen Steuereinheit und der durchgehenden Steuerleitung an das Betriebskonzept der virtuellen Kupplung angepasst werden würde.

Um Letzteres einzuleiten, kann der Hersteller oder sein, in der Europäischen Union ansässiger Vertreter, eine Erklärung darüber abgeben, dass er mit der virtuellen Kupplung eine innovative Lösung entwickelt hat, welche von den aktuellen

[435] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 4.2.4.2.1.
[436] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 4.2.5.3.1in Verbindung mit Anhang, Absatz 4.2.5.3.2.

maßgeblichen Bestimmungen dieser TSI abweicht. Die Kommission prüft dann die eingereichten Abweichungen und kann hierzu die Europäische Eisenbahnagentur um eine Stellungnahme ersuchen.[437] Fällt diese positiv aus, kann die Innovation, hier die virtuelle Kupplung, umgesetzt werden und die notwendige Überarbeitung der Spezifikation wird angestoßen[438]. Als Anknüpfungspunkt könnte der Hinweis zur automatischen Geschwindigkeitsregelung dienen, der bereits in der aktuellen Fassung der Verordnung enthalten ist[439].

Die Ergebnisse der Betrachtung des Eisenbahnrechts der Europäischen Union ist in Abbildung 7-8 zusammengefasst.

CSM-VO	TSI Loc&Pas
Relevante Artikel: Artikel 1, 2, 4, 5	**Relevante Anhänge:** Anhänge 4.2.2.2.3, 4.2.2.2.4, 4.2.4.2.1, 4.2.5.3.1, 4.2.5.3.2
Handlungsbedarf: • Durchführen des Risikomanagement-verfahren zum Nachweis der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen	**Handlungsbedarf:** • Vorsehen einer Abschleppkupplung • Vorsehen Kommunikationsmöglichkeit Fahrgast - Triebfahrzeugführer
Klärungsbedarf: • Stellt virtuelle Kupplung signifikante Änderung des Eisenbahnsystems dar?	**Klärungsbedarf:** • Anforderungen bzgl. der zentralen Steuereinheit und der durchgehenden Steuerleitung sind im Sinne der virtuellen Kupplung weiterzuentwickeln

Abbildung 7-8 Rechtsfolgen in Bezug auf das europäische Eisenbahnrecht
Quelle: eigene Darstellung

7.2.4 Haftungsrechtliche Fragen

Es muss davon ausgegangen werden, dass es kein absolut technisch fehlerfreies System zur Umsetzung der virtuellen Kupplung geben wird – wie bei jedem anderen technischen System auch. Selbst die Verwendung von redundanten Systemen zur Fehlererkennung als Back-up-Systeme kann nicht zu einem Null-Fehlersystem führen. Wichtig ist es daher, einerseits umfangreiche technische und betriebliche Sicherheitskonzepte vorzusehen, welche das notwendige Sicherheitsniveau erreichen lassen (vgl. Abschnitte 5.2 und 5.3) und andererseits rechtliche Folgen im Vertrags- und Schadensersatzrecht so zu klären, dass für alle Beteiligten eine hinreichend umfangreiche Rechtsicherheit gegeben ist.

[437] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Artikel 10, Absatz 1 bis 4.
[438] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Artikel 10, Absatz 4.
[439] Vgl. VO (EU) 1302/2014, Anhang, Absatz 4.2.4.4.2.

Für Halter und Hersteller der Schienenfahrzeuge sowie für die Triebfahrzeugführer ergeben sich dabei unterschiedliche Fragestellungen, welche nachfolgend kurz andiskutiert werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse hinsichtlich der haftungsrechtlichen Verantwortungsverteilung zusammengefasst.

Haftung des Fahrzeughalters

Zur Deckung der durch Unfälle beim Betrieb einer öffentlichen Eisenbahn verursachten Personen- und Sachschäden, sind die EVU verpflichtet, eine Haftpflichtversicherung abzuschließen und aufrechtzuerhalten. Gleiches gilt für die Wagenhalter, zur Deckung von Unfällen bei nichtselbstständiger Teilnahme am Eisenbahnbetrieb verursachten Schäden.[440]

Die Haftpflichtversicherung deckt Schadensersatzansprüche ab gegen den Halter, Fahrer oder Eigentümer des Fahrzeugs wegen Schäden, die durch dessen Gebrauch verursacht wurden[441]. Dabei haftet der Halter verschuldensunabhängig für Schadensfälle, die aus dem Betriebsrisiko resultieren. Zudem haftet er zumindest im Außenverhältnis auch für Produktfehler des Herstellers in voller Höhe. Im Innenverhältnis erfolgt der Ausgleich zwischen Halter und Hersteller über § 426 des BGB.[442] Demnach kann der Halter (beziehungsweise dessen Haftpflicht-versicherung) den Hersteller des Systems in Regress nehmen, sofern die Ursache für den Unfall ein Systemversagen ist[443]. Wird nachgewiesen, dass ausschließlich die technische Fehlfunktion zu dem Unfall geführt hat, muss der Hersteller im Innenverhältnis zum Halter den Schaden allein tragen[444].

Gegenüber den konventionell gekuppelten Fahrzeugen, kann sich bei den virtuell gekuppelten Fahrzeugen ein erhöhtes Betriebsrisiko aus dem automatisierten Folgen des Slaves ergeben. Wenngleich gegenüber dem geschädigten Dritten Halter und Hersteller Gesamtschuldner und wegen unerlaubter Handlung ersatzpflichtig sind[445], ist der Hersteller für technische Fehlfunktionen allein verantwortlich, da es bei dem automatisierten Folgen des Slaves keinen Fahrer gibt, der Einfluss auf den Fahrvorgang nimmt. Demnach kann ein Unfall im Rahmen der automatisierten Fahrt

[440] Vgl. AEG, § 14, Absatz 1f.
[441] Vgl. Eichelberger (2017), S. 143.
[442] Vgl. Buck-Heeb, Dieckmann (2017), S. 80.
[443] Vgl. BGB, § 426.
[444] Vgl. BGB, § 254.
[445] Vgl. BGB, § 840, Absatz 1.

potenziell stets ein Produkthaftungsfall sein. Im Innenverhältnis reduziert sich damit das Haftungsrisiko des Halters zu Lasten des Herstellers. Voraussetzung hierfür ist, dass der Halter seiner Verkehrspflicht insofern nachgekommen ist, als dass er den Triebfahrzeugführer im sicheren Umgang mit dem Fahrzeugverband eingewiesen hat[446].

Gegenüber seiner Haftpflichtversicherung ist der Fahrzeughalter verpflichtet, die ihm bekannten Gefahrenumstände anzuzeigen, die der Versicherer aufgrund deren Erheblichkeit für den Versicherungsvertrag schriftlich nachfragte[447]. Führt der Fahrzeughalter (das EVU) die virtuelle Kupplung ein, ist daher zu prüfen, inwiefern eine Gefahrerhöhung vorliegt, welche einen gewissen Dauerzustand erreicht, das Gleichgewicht zwischen versichertem Risiko und Prämie stört und dazu führt, dass der Versicherungsvertrag angepasst werden muss[448]. In diesem Fall ist das EVU verpflichtet, die Gefahrerhöhung nach Kenntnisnahme unverzüglich anzuzeigen[449]. Beispielsweise ist es vorstellbar, dass die Verwendung der virtuellen Kupplung in der Haftpflichtversicherung als weiches Tarifmerkmal aufgenommen wird. Dies hätte entweder zur Folge, dass ihre Verwendung den Prämienrabatt entfallen lässt oder sich daraus Einschränkungen des Versicherungsschutzes ergeben. Denkbar sind zudem vertraglich vereinbarte Haftungsausschlüsse und Obliegenheiten vor Eintritt des Versicherungsfalls, deren Verletzung zu Nachteilen beim Versicherungsschutz führen kann.[450]

Für Schäden am versicherten Fahrzeug kommt die Kaskoversicherung auf. Auch für diese Versicherungsform ist das Versicherungsvertragsgesetz anzuwenden, in Folge dessen die vorangestellten Überlegungen analog gelten. Insbesondere für die Vollkaskoversicherung ergibt sich hier eine veränderte Gefahrensituation, da diese auch Schäden durch mut- oder böswillige Handlungen Dritter abdeckt.[451] Im Vergleich zur konventionellen Kupplung liegt bei der virtuellen Kupplung aufgrund der kabellosen Datenübertragung hier eine erhöhte Gefahr des unberechtigten Eingriffs durch Dritte vor (vgl. Abschnitt 5.3.2). Aus Hackerangriffen notwendig werdende Reparaturen sind in der Vollkaskoversicherung mitversichert. Der Versicherer ist dabei prinzipiell

[446] Vgl. Buck-Heeb, Dieckmann (2017), S. 81.
[447] Vgl. VVG, § 19, Absatz 1.
[448] Vgl. VVG, § 23, Absatz 1 und 2.
[449] Vgl. VVG, § 23, Absatz 3.
[450] Vgl. Eichelberger (2017), S. 132f.
[451] Vgl. ebd., S. 143.

frei, Haftungsausschlüsse und Obliegenheiten zu vereinbaren[452], wie zum Beispiel eine Obliegenheit zur fortlaufenden Instandhaltung der virtuellen Kupplung in Bezug auf Security.

Im Ergebnis bedeutet die Einführung der virtuellen Kupplung für den Halter des Fahrzeugs erhöhte Anforderungen an seine Verkehrspflichten (Instruktion der Triebfahrzeugführer) sowie Aufwände aus gegebenenfalls notwendigen Anpassungen der Haftpflicht- und Kaskoversicherung.

Haftung des Herstellers

Das Betriebskonzept der virtuellen Kupplung sieht vor, dass der Slave von keinem Triebfahrzeugführer gesteuert wird, sondern das Fahrzeug automatisiert folgt. Im Ergebnis dessen ist fast immer eine Fehlfunktion des Systems für den Schaden verantwortlich, für die der Hersteller gegenüber dem Halter haften muss.

Maßgebliche Faktoren, die eine Haftung des Schienenfahrzeugherstellers (oder des Herstellers der virtuellen Kupplung) auslösen können, sind Konstruktions-, Instruktions- und Produktbeobachtungsfehler. Mit der Umsetzung der virtuellen Kupplung kommen prinzipiell alle drei Fehlerklassen in Betracht: Konstruktionsfehler, zum Beispiel verursacht durch eine fehlerhafte Programmierung, Instruktionsfehler, resultierend aus einer unzureichenden Instruktion des EVU über den bestimmungsmäßigen Gebrauch, die Inbetriebnahme und mögliche Gefahren der virtuellen Kupplung sowie Produktbeobachtungsfehler, wenn der Hersteller die EVU nicht über Fehler informiert, die nach Inverkehrgabe aufgetreten sind. Im Rahmen des Schutzes vor Konstruktionsfehlern müssen Hersteller auch dafür Sorge tragen, dass die Software der Fahrzeuge ausreichend vor unberechtigten Angriffen von außen geschützt sind[453] (vgl. Abschnitt 7.3).

Für die haftungsrechtlichen Rahmenbedingungen der Schienenfahrzeughersteller und den Hersteller der virtuellen Kupplung haben das Produkthaftungsgesetz (ProdHaftG) sowie die nach den von der Rechtsprechung zu § 823 Abs. 1 des BGB entwickelten Grundsätze der Produzentenhaftung eine zentrale Bedeutung[454].

Während die Haftung nach dem ProdHaftG, häufig auch als Gefährdungshaftung bezeichnet wird und allein an das Inverkehrbringen eines fehlerhaften Produktes

[452] Vgl. Eichelberger (2017), S. 145.
[453] Vgl. Ebers (2017), S. 99 und 106.
[454] Vgl. ebd., S. 99.

anknüpft, setzt die Produzentenhaftung nach § 823 Abs. 1 des BGB eine schuldhafte Pflichtverletzung voraus[455].

Nach dem ProdHaftG ist derjenige Herstellerkreis für einen Produktfehler verantwortlich, der das Endprodukt, einen Grundstoff oder ein Teilprodukt hergestellt hat oder auch nur durch das Anbringen eines unterscheidungskräftigen Kennzeichens als Hersteller fungiert[456]. Damit haften sowohl der Hersteller der virtuellen Kupplung als auch der Schienenfahrzeughersteller für Fehler der virtuellen Kupplung. Der Schienenfahrzeughersteller und der Hersteller der virtuellen Kupplung sind demnach verpflichtet, Maßnahmen zu ergreifen, die zum Zeitpunkt der Inverkehrgabe nach dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik konstruktiv möglich und geeignet sind, Schäden zu verhindern[457]. Produkt-beobachtungpflichten sind im ProdHaftG nicht abgedeckt[458].

Die deliktische Produzentenhaftung nach § 823 des BGB hingegen schließt zusätzlich zu den oben genannten Fehlern Produktbeobachtungsfehler ein. Die Produktbeobachtung umfasst sowohl die Auswertung von zugeleiteten Beanstandungen (passive Produktbeobachtung), als auch die selbstständige systematische Erfassung und Auswertung von denkbaren Gefahrenhinweisen (aktive Produktbeobachtung). Erkennt der Hersteller einen Fehler, muss er seine laufende Produktion umstellen und für, im Verkehr befindliche Produkte Instruktions- und Warnpflichten nachkommen.[459] Die Verantwortung für die Produktsicherheit obliegt hier vorrangig dem Endhersteller, der die Konstruktion und Fabrikation der Fahrzeuge steuert, also dem Schienenfahrzeughersteller. Kann dieser jedoch nachweisen, dass ein fehlerhaftes Vorprodukt für den Fehler verantwortlich ist, welches von einem Zulieferer bezogen wurde, ist der Hersteller nicht verantwortlich, wenn er plausibel nachweisen kann, dass er seinen Zulieferer sorgfältig ausgewählt, überwacht und den Wareneingang ausreichend kontrolliert hat[460].

Die Zulieferer haften gegenüber dem Geschädigten wiederum auch nicht ohne weiteres aus § 823 des BGB, da sie keine umfassende Verantwortung für

[455] Vgl. Ebers (2017), S. 100.
[456] Vgl. ProdHaftG, § 4, Absatz 1.
[457] Vgl. Ebers (2017), S. 103.
[458] Vgl. ebd., S. 113.
[459] Vgl. ebd., S. 113f.
[460] Vgl. ebd., S. 101.

Konstruktion und Fabrikation des Endproduktes tragen, sondern nur im Rahmen ihres Aufgabenbereiches zur Sorgfalt verpflichtet sind[461].

Um zu klären, in wessen Verantwortungssphäre die Fehlerursache fällt, sind außer den oben genannten Fehlern auch nachträgliche Installationen eines Updates, das von einem anderen Hersteller stammt, unterlassene Bedienungs- und Überwachungspflichten oder Softwareangriffe von außen in Betracht zu ziehen[462].

Die mit der virtuellen Kupplung erreichte erhöhte Automatisierung führt bei den Herstellern zu höheren Anforderungen an ihre Sorgfaltspflicht. Da insbesondere Programmierfehler schwer vermeidbar sind und sich neue Anforderungen aus dem IT-Schutz ergeben, besteht eine kontinuierliche Beobachtungs- und Korrekturpflicht während des Produktionsprozesses und nach der Inverkehrgabe. Weiterhin ergeben sich erhöhte Instruktionspflichten, welchen mit Erläuterungen in einem Handbuch nachgekommen werden kann. Da auf diesem Weg jedoch noch nicht sichergestellt werden kann, dass die Hinweise auch tatsächlich zur Kenntnis genommen werden, wäre eine konstruktive Instruktion vorstellbar, die darauf basiert, dass bereits die Konstruktion sicherstellt, dass nur Nutzer das System aktivieren können, die zuvor über die sachgerechte Bedienung informiert wurden[463].

Aus Sicht der Rechtsprechung ist darüber hinaus zu klären, ob der Hersteller des Slaves aufgrund der teilautomatisierten Steuerung, nämlich der Automatisierung von Traktion und Bremse, als „Fahrer“ des Slaves anzusehen ist und deshalb die Haftungsansprüche eines Triebfahrzeugführers auch für ihn gelten.

Insgesamt ergeben sich aus der Einführung der virtuellen Kupplung für die Hersteller komplexere Pflichten und Haftungsrisiken. Deutlich wird zudem, dass die Bedeutung der Produkt- und Produzentenhaftung des Herstellers mit entsprechender Auswirkung auf die Versicherung solcher Risiken erheblich steigen wird.

Besondere haftungsrechtliche Herausforderungen ergeben sich bei Kupplung von Fahrzeugen verschiedener Hersteller. Hier besteht Klärungsbedarf, um sicherzustellen, dass die Marktakteure zum einen über eine ausreichend hohe Rechts- und damit auch Planungssicherheit verfügen und zum anderen, um etwaige Haftungsrisiken hinreichend genau abschätzen zu können. Beide Faktoren sind für

[461] Vgl. Ebers (2017), S. 101.
[462] Vgl. ebd., S. 117.
[463] Vgl. ebd., S. 111.

eine erfolgreiche Markteinführung und -etablierung unabdingbar. Zu prüfen wäre dabei auch, inwieweit der Einbau eines Unfalldatenspeichers zur Aufzeichnung, relevanter Daten eines Unfallereignisses dabei helfen kann, die Beweisführung zu vereinfachen.

Haftung des Triebfahrzeugführers

Vor dem Fahrantritt hat der Triebfahrzeugführer nach dem Sorgfaltsmaßstab die Pflicht, seinen virtuellen Zugverband und damit auch die virtuelle Kupplung auf erkennbare Mängel hin zu überprüfen (Sorgfaltspflicht)[464]. Um einschätzen zu können, was die Systeme leisten können und was nicht, muss er hierzu mit dem Funktionsumfang der gekuppelten Fahrzeuge vertraut sein. Damit der Triebfahrzeugführer hierzu in der Lage ist, muss sichergestellt werden, dass er vom EVU im ordnungsgemäßen Umgang mit allen von ihm zu kuppelnden Fahrzeugen geschult wurde. Hat er den Zugverband geprüft und ordnungsgemäß konfiguriert, darf der Triebfahrzeugführer davon ausgehen, dass dieser auch tatsächlich einwandfrei funktioniert[465].

Während der Fahrt muss der Triebfahrzeugführer den Zugverband auch weiterhin überwachen, damit er Abweichungen von der ordnungsgemäßen Funktionsweise erkennt und entsprechend reagieren kann[466]. In Bezug auf die virtuelle Kupplung wird der Triebfahrzeugführer von einer Diagnoseeinheit unterstützt, auf deren Überwachung sich seine Beobachtungspflicht beschränkt.

Kommt der Triebfahrzeugführer diesen Sorgfalts- und Überwachungspflichten nicht nach und verletzt er in deren Ergebnis vorsätzlich oder fahrlässig das Leben, den Körper oder die Gesundheit anderer Personen, ist er diesen Personen gegenüber schadensersatzpflichtig[467]. Der Triebfahrzeugführer haftet hingegen nicht, wenn er beweisen kann, dass der Unfallschaden durch einen technischen Fehler verursacht worden ist und ihn diesbezüglich kein Überwachungsverschulden trifft.

[464] Vgl. BGB, § 276, Absatz 2.
[465] Vgl. Buck-Heeb, Dieckmann (2017), S. 71.
[466] Vgl. Ebers (2017), S. 115 f.
[467] Vgl. BGB, § 823, Absatz 1.

Haftungsrechtlichen Verantwortungsverteilung

Die vorangegangenen Abschnitte haben verdeutlicht, dass sich mit der Einführung der virtuellen Kupplung die haftungsrechtliche Verantwortung und damit in Verbindung stehende Pflichten der einzelnen Akteure verändern (vgl. Abbildung 7-9).

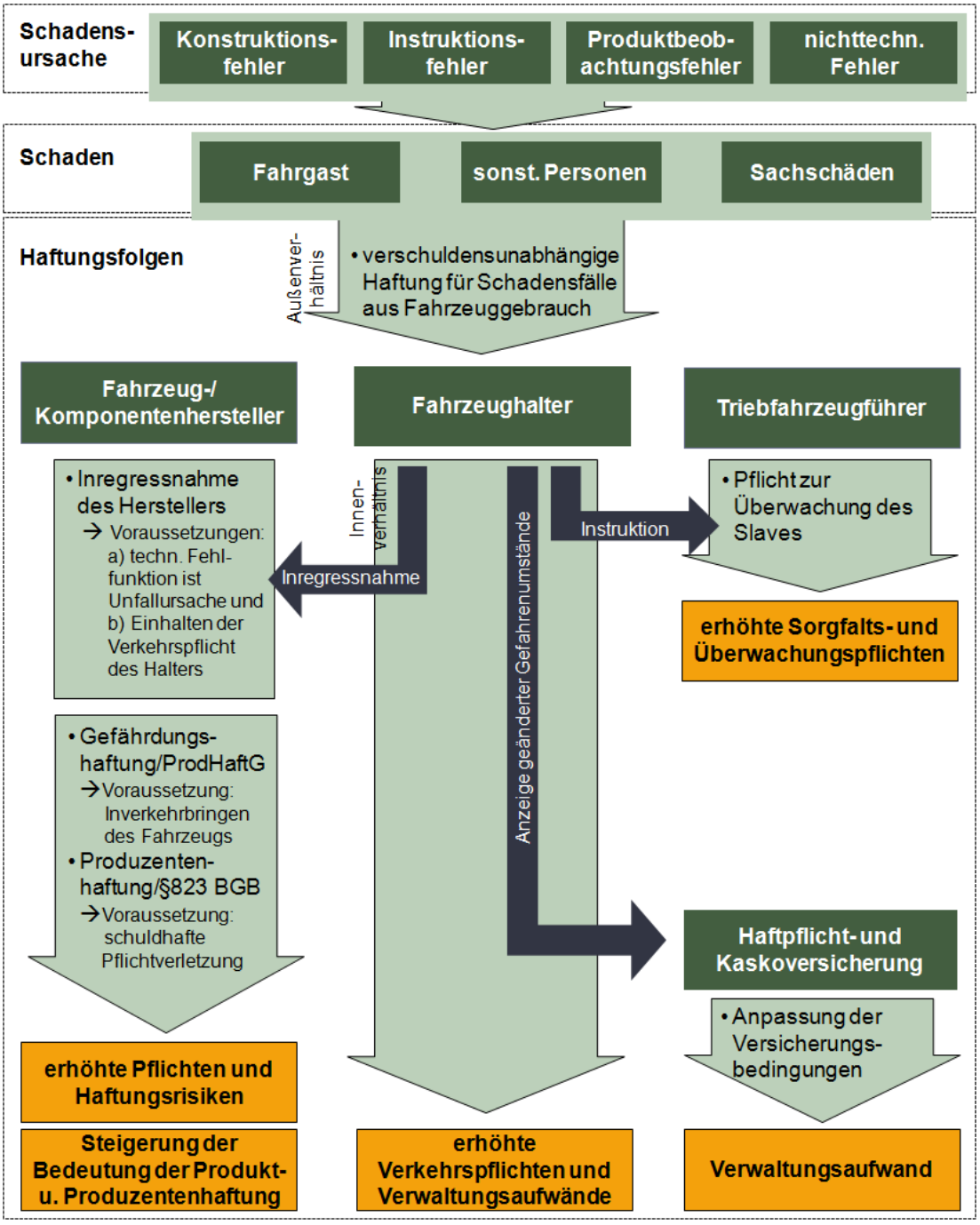


Abbildung 7-9 Auswirkungen auf die Haftungsverhältnisse
Quelle: eigene Darstellung

So ergeben sich für den Fahrzeughalter erhöhte Verkehrspflichten und prozessuale Aufwände aus der Notwendigkeit, den Triebfahrzeugführer im ordnungsgemäßen Umgang mit dem virtuellen Zugverband zu schulen sowie aus der Pflicht, die Haftpflicht- und Kaskoversicherung über die veränderten Gefahrenumstände zu informieren. Für die Versicherung und den Fahrzeughalter entstehen daraufhin Verwaltungsaufwände, um Risiken abzuschätzen und die Versicherungsbedingungen gegebenenfalls anzupassen.

Für die Triebfahrzeugführer ergeben sich neue und geänderte Anforderungen an die Überwachung des virtuellen Zugverbandes, zu deren Details sie vom Fahrzeughalter geschult werden. Die größten Veränderungen ergeben sich auf Seiten der Fahrzeug- und Komponentenhersteller, in deren Ergebnis die Hersteller mehr Pflichten und Haftungsrisiken tragen sowie die Bedeutung der Produkt- und Produzentenhaftung erheblich steigt. Besonderer rechtlicher Klärungsbedarf ergibt sich aus der Anforderung, dass auch herstellerübergreifend gekuppelt werden soll.

Es ist daher dafür Sorge zu tragen, dass Haftungsrisiken kalkulierbar bleiben, da andernfalls zu befürchten ist, dass Hersteller angesichts betriebswirtschaftlich existenzbedrohender Haftungssummen von der Entwicklung und Einführung der virtuellen Kupplung absehen oder diese nur prohibitiv zu hohen Preisen anbieten können, obwohl gesamtgesellschaftlich ein Interesse an ihr besteht (vgl. Abschnitt 2.2). Es ist somit zu verhindern, dass allein der Hersteller jedes Risiko des Einsatzes der virtuellen Kupplung tragen muss, da dies zu einem erheblichen Innovations-, Investitions- und damit zu einem massiven Markteinführungshindernis führen würde. Ziel muss es sein, die Haftung nach noch zu bestimmenden Kriterien zwischen EVU und Hersteller aufzuteilen. Geprüft werden könnte zudem, ob und inwiefern der Bund hier unterstützen kann.

Um die Markteinführung und -etablierung der virtuellen Kupplung zu unterstützen, wird es somit als zielführend eingeschätzt, dass

a) alle offenen Haftungsfragen rechtsverbindlich geklärt werden und

b) geprüft wird, ob und inwieweit der Bund, zum Beispiel durch finanzielle Unterstützungen, dazu beitragen kann, dass die zu leistenden Versicherungsprämien kein Hindernis für die Entwicklungs- und Investitionsentscheidung darstellen.

7.2.5 Zusammenfassung rechtlicher Herausforderungen

Die Entwicklung neuer Technologien ist häufig nicht hinreichend mit der Weiterentwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen abgestimmt. So stellt auch für den Einsatz der virtuellen Kupplung ihr gesetzliches Umfeld eine wesentliche Hürde für ihre erfolgreiche Marktetablierung dar. Die vorangegangenen Abschnitte haben die in Abschnitt 7.1.1 aufgestellte These untermauern können, dass für eine erfolgreiche Markteinführung und -etablierung der virtuellen Kupplung Klärungs- und Handlungsbedarf im Eisenbahnrecht des Bundes und der europäischen Union sowie bei haftungsrechtlichen Fragen besteht (vgl. Abbildung 7-10).

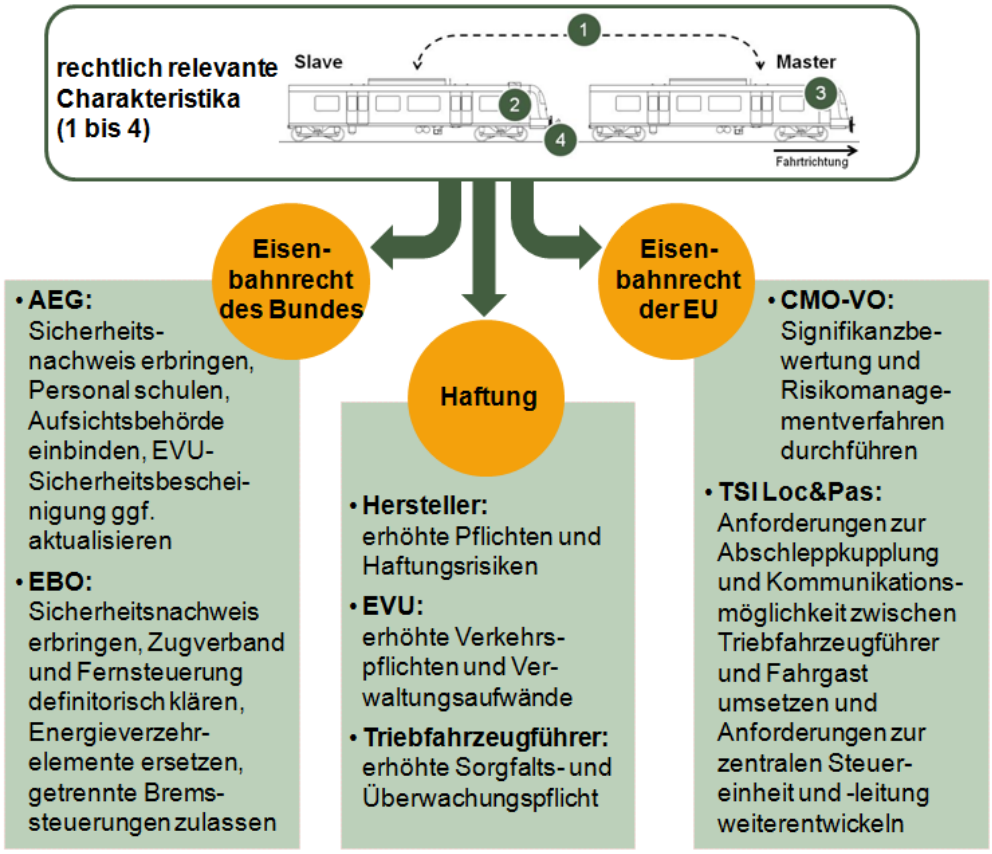


Abbildung 7-10 Auswirkungen und Herausforderungen auf das eisenbahnrechtliche Umfeld und auf die Haftung
Quelle: eigene Darstellung

Nur wenn diese, aus dem rechtlichen Umfeld resultierenden Anforderungen berücksichtigt und dort, wo notwendig, rechtliche Klärungen herbeigeführt und rechtliche Regelungen weiterentwickelt werden, kann die virtuelle Kupplung am Markt erfolgreich etabliert werden. Nach aktueller Rechtslage wäre ihre Einführung jedoch nicht zulässig.

In den letzten Jahrzehnten hat der Gesetzgeber für alle Beteiligten am Eisenbahnbetrieb einen verlässlichen Rechtsrahmen geschaffen, welcher kontinuierlich fortentwickelt wurde, um den Bedürfnissen des Eisenbahnmarktes gerecht zu werden[468]. Im Zuge des aktuellen Automatisierungstrends sind der Gesetzgeber und die Rechtswissenschaften nun verstärkt gefordert, den damit verbundenen rechtlichen Herausforderungen zeitnah auf nationaler und europäischer Ebene gerecht zu werden. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang, dass das Eisenbahn-Bundesamt bereits 1998 in Aussicht gestellt hatte, dass das führerlose Fahren bei Einhaltung bestimmter Voraussetzungen behördlich zulässig sein könnte[469].

Die Veränderungen bei der haftungsrechtlichen Verantwortung und damit in Verbindung stehender Pflichten der einzelnen Akteure führen insbesondere beim Hersteller zu deutlich erhöhten Haftungsrisiken. Um zu verhindern, dass in Folge dessen die Entwicklung der virtuellen Kupplung nicht angestoßen wird, ist zu prüfen, inwieweit das Haftungsrisiko zwischen EVU und Hersteller nach noch zu bestimmenden Kriterien aufgeteilt werden und ob der Bund hier unterstützen könnte. Besondere haftungsrechtliche Herausforderungen ergeben sich aus dem Kuppeln von Fahrzeugen verschiedener Hersteller.

Ein aktives Weiterentwickeln des rechtlichen Rahmens, um die notwendige Rechtssicherheit für die Entwicklung der virtuellen Kupplung zu gewährleisten, ist damit nicht nur eine juristische Notwendigkeit, wie zum Beispiel für die Zulassung, sondern auch aus wirtschaftlicher Perspektive relevant, etwa in Bezug auf die Haftung für das automatisierte Folgen des Slaves.

Eng mit dem rechtlichen Umfeld und der technologischen Entwicklung hin zu mehr Automatisierung verbunden sind die Fragestellungen zur „Security“ – Angriffssicherheit, welche nachfolgend diskutiert werden.

[468] Vgl. Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe d).
[469] Vgl. Molle (1998), S. 444.

7.3 „Security" – Angriffssicherheit

2015 wurde über das Internet durch eine Schwachstelle im Infotainmentsystem eines US-amerikanischen Geländewagens die Kontrolle über das Fahrzeug übernommen, in Folge dessen unter anderem dessen Bremsen, Beschleunigung, die Türverriegelung und die Klimaanlage ferngesteuert werden konnten[470]. 2016 gelang es Forschern bei einem Fahrzeug die Türen, die Dachluke und den Kofferraum aus der Ferne zu öffnen[471]. Diese Vorfälle zeigen beispielhaft, dass mit jeder weiteren Digitalisierung der Fahrzeuge die Möglichkeit einhergeht, dass Angriffe auf die dort verarbeiteten Daten stattfinden[472]. Die digitalen Welten bieten hier für Internet-Kriminelle, Terrororganisationen und „spielfreudige" Hacker große Angriffsflächen, um Manipulationen zu bewirken[473].

Auch im Eisenbahnsektor gewinnt der Schutz vor unberechtigten Angriffen (Security) zunehmend an Relevanz[474]. Gründe liegen insbesondere in der zunehmenden Vernetzung einzelner, eingebetteter Systeme (Embedded-systems) und der damit einhergehenden immer größer werdenden Angriffsfläche auf das Gesamtsystem[475]. Dabei ist der Schutzzweck, insbesondere der sicherheitsrelevanten Daten als außerordentlich hoch zu bewerten, da er die Aufrechterhaltung der Funktionalität des Fahrzeugs und damit die körperliche Unversehrtheit und das Leben der Fahrgäste und des Zugpersonals betrifft[476]. Darüber hinaus betrifft die IT-Sicherheit auch die Verfügbarkeit des Eisenbahnsystems. Ziel muss es also sein, nicht nur funktional sichere, sondern auch angriffssichere Lösungen umzusetzen[477]. Zu keinem Zeitpunkt des Betriebs dürfen Sicherheitslücken entstehen, welche Unbefugten Zugriff auf die Fahrzeugsysteme ermöglichen, zu Datenverlust während der Übertragung führen, ungeplante Aktionen von außen zulassen oder nicht vorgesehene Handlungen innerhalb des Systems vornehmen[478].

Für die Umsetzung der virtuellen Kupplung stellt der unbefugte Eingriff in die Steuerungstechnik eine besonders große Gefahr dar, da aus der für die Umsetzung

[470] Vgl. Eikenberg (2015).
[471] Vgl. Wilkens (2016).
[472] Vgl. Eichelberger (2017), S. 145.
[473] Vgl. Kossak (2016), S. 28.
[474] Vgl. Meyer zu Hörste (2017b), S. 38.
[475] Vgl. Poignée, Kraus (2017), S. 38.
[476] Vgl. Forgó (2017), S. 167.
[477] Vgl. Poignée, Kraus (2017), S. 39.
[478] Vgl. Brückmann (2016), S. 69.

notwendigen Kommunikation mit dem Fahrzeugsteuerungssystem die Möglichkeit folgt, diese direkt und indirekt beeinflussen zu können[479]. Die Security ist daher fahrzeugseitig sicherzustellen und muss insbesondere die drahtlosen Kommunikationskanäle sowie die Sensoren und Schnittstellen schützen, über welche die Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Unter Verwendung von Zonen gemäß IEC 62443 und geschützten Verbindungen (Kanäle) zwischen den Zonen ist hierzu ein Securitykonzept mit einer IT-Security-Architektur zu erstellen[480]. Mögliche Ansatzpunkte bilden zum Beispiel Authentifizierungs- und Autorisierungsmechanismen, Kryptographische Verfahren, Eindringungsüberwachungs- und Abwehrmechanismen[481] sowie Rückflussdaten und periodische Selbsttests. Auch können Datentelegramme zur sicheren Kommunikation in bestehenden Netzwerken um „safety layer“ erweitert[482] oder die zweite Schicht im OSI-Modell „Sicherungsschicht (Data Link Layer)“ weiterentwickelt werden.

Die sich schnell verändernde Gefahrenlage führt dazu, dass die Security über den gesamten Lebenszyklus des Produktes kontinuierlich auf dem neuesten Stand der Technik zu halten ist, um der aktuellen Bedrohungslage erfolgreich begegnen zu können[483]. Für die praktische Umsetzung der virtuellen Kupplung bedeutet dies, dass nach dem ersten Schritt der Softwareentwicklung weitere Schritte folgen müssen, um die Software über ihre Nutzungsdauer im Hinblick auf die jeweilige Bedrohungslage aktuell zu halten.

Parallel zu den technischen Entwicklungen im Bereich Security steigen auch rechtliche IT-Anforderungen[484]. Reagiert hat der Gesetzgeber zum Beispiel mit dem IT-Sicherheitsgesetz, das einen Rechtsrahmen zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme schaffen soll und den Betreiber verpflichtet, ein Mindestniveau an IT-Sicherheit einzuhalten[485]. Dies umfasst zum Beispiel angemessene technische und organisatorische Vorkehrungen zur Vermeidung von Störungen

[479] Vgl. Kossak (2016), S. 28.
[480] Vgl. van Olfen (2017), S. 70.
[481] Vgl. ebd., S. 70.
[482] Vgl. Retschy (2015), Folie 16.
[483] Vgl. Poignée, Kraus (2017), S. 39.
[484] Vgl. Forgó (2017), S. 168.
[485] Wenngleich die dargestellten Pflichten im Eisenbahnbereich ausschließlich für EVU verpflichtend sind, welche die in der BSI-KritisV genannten Schwellenwerte überschreiten (vgl. BSI-KritisV, Anlage 7, Teil 3), wird auch den nicht von der BSI.KritisV eingeschlossenen EVU empfohlen, IT-Sicherheit im Krisenhandbuch und im Managementsystem zu verankern (vgl. Steinbacher (2017), S. 44f und 48).

der Integrität, Authentizität, Verfügbarkeit und Vertraulichkeit der IT-Systeme, Komponenten und Prozesse. Bis Ende Juni 2019 müssen die betroffenen EVU gegenüber dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik die Einhaltung der Vorkehrungen sowie im Anschluss alle zwei Jahre deren Aktualität nachweisen.[486]

Im Ergebnis sind bei der Entwicklung der virtuellen Kupplung und im Securitykonzept der EVU ausreichend hohe Securitymaßnahmen vorzusehen, welche kontinuierlich hinsichtlich ihrer Aktualität zu überwachen und, sofern notwendig, anzupassen sind.

Bevor die Ergebnisse zu notwendigen Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Markteinführung zusammengefasst werden, wird es als zielführend eingeschätzt, den möglichen Einsatz der virtuellen Kupplung in die aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussion einzuordnen, um daraus weitere Rahmenbedingungen ableiten zu können.

7.4 Einordnung in die aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussion

„Nur durch Digitalisierung und Automatisierung der Verkehrssysteme können wir die Probleme des zunehmenden Straßenverkehrs in den Griff bekommen, öffentliche Verkehrsmittel vor dem Verkehrskollaps bewahren und die Effizienz und Sicherheit bestehender Bahnsysteme steigern“, sagt Dr. Jochen Eickholt, CEO der Siemens Division Mobility[487]. Die Digitalisierung und Automatisierung sind damit nicht nur der nächste Evolutionsschritt in der Technik[488], sondern sie gelten gleichermaßen als zentrale Problemlösungsansätze für die aktuellen Herausforderungen der Verkehrssysteme. Die heute verwendeten elektronischen Stellwerke und Zugbeeinflussungssysteme bieten dabei eine ideale Voraussetzung für darauf aufbauende Lösungen, bis hin zum automatisierten Fahren[489].

Die virtuelle Kupplung soll die rasante Entwicklung in der Informations- und Kommunikationstechnologie, die zunehmende digitale Vernetzung und die

[486] Vgl. Steinbacher (2017), S. 45 und S. 47.
[487] Vgl. Buhl (2016a), S. 4.
[488] Vgl. Buhl (2016a), S. 4.
[489] Vgl. Pelz, Dickgießer (2015), S. 35.

angestoßene Entwicklung autonomer Systeme[490] nutzen und zu einer erhöhten Automatisierung im SPNV führen. Die virtuelle Kupplung kann damit als ein Element des Konzeptes Schiene 4.0 verstanden werden, welches derzeit die politische und gesellschaftliche Diskussion im besonderen Maße prägt.

Auf der Straße gehen aktuelle Überlegungen zum zukünftigen öffentlichen Verkehr konsequent in die Richtung des fahrerlosen, bedarfsorientierten Verkehrs[491]. Zentraler Auslöser der Automatisierung ist hier die Möglichkeit, eine höhere Sicherheit und höhere Effizienz des Straßenverkehrs zu erreichen[492]. DB Schenker geht davon aus, ihre LKW-Verkehre ab 2020 im Platooning und ab 2030 auf Langstrecken ohne Fahrer betreiben zu können[493]. Ab 2020 sollen zudem erste Einsatzszenarien für hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen und fahrerloses Parken auf Parkplätzen oder in Parkhäusern serienmäßig möglich sein[494]. Voll automatisiertes Fahren soll dann im Laufe der 2030er folgen[495].

Die technologischen Ansätze und betrieblichen Umsetzungen können von der Straße auf die Schiene jedoch nur vereinzelt übertragen werden, da sich das Eisenbahnsystem grundsätzlich vom Straßensystem unterscheidet[496]. Die hohe Komplexität und der vergleichsweise offene Zugang zum Eisenbahnsystem führen bei der Umsetzung einer höheren Betriebsautomatisierung zu großen Herausforderungen. Die Architektur eines Systems für automatisiertes Fahren auf der Schiene wird sich daher von der auf der Straße erheblich unterscheiden[497].

Trotz der bekannten technischen und rechtlichen Herausforderungen hat das automatisierte Fahren auf der Schiene eine hohe Dynamik erhalten und gilt als Megatrend der Zukunft[498]. Wichtiger Treiber ist dabei der Wunsch nach einer höheren Leistungsfähigkeit, höherer Betriebsstabilität und höherer Flexibilität[499].

[490] Vgl. Jäger et al. (2016), S. 416.
[491] Vgl. Meyer zu Hörste (2017a), S. 1.
[492] Vgl. Jäger et al. (2016), S. 416.
[493] Vgl. Wirsing (2016), Folie 14.
[494] Vgl. Jäger et al. (2016), S. 422.
[495] Vgl. ebd., S. 417.
[496] Vgl. ebd., S. 416 .
[497] Vgl. ebd., S. 422.
[498] Vgl. Buhl (2016a), S. 6.
[499] Vgl. Jäger et al. (2016), S. 416 f.

Für die Klassifizierung des Automatisierungsgrades haben sich fünf Stufen (GoA 0 bis GoA 4)[500] etabliert, welche sich zum Beispiel hinsichtlich der Verantwortlichkeiten für die relevanten Betriebshandlungen unterscheiden lassen (vgl. Abbildung 7-11).

Grade of Automation	Name	Sicherung Fahrstraße	Fahren und Bremsen	Kollisions-vermeidung	Sicherung Fahrgast-wechsel	Störfall-behandlung
0	On-sight train operation (TOS)	Fahrer	Fahrer	Fahrer	Zugpersonal	Zugpersonal
GoA 1	Non-automated operation (NTO)	System	Fahrer	Fahrer	Zugpersonal	Zugpersonal
GoA 2	Semi-automated operation (STO)	System	System	Fahrer	Zugpersonal	Zugpersonal
GoA 3	Driverless operation (DTO)	System	System	System	Zugpersonal oder System	Zugpersonal
GoA 4	Unattended operation (UTO)	System	System	System	System	Zugpersonal oder System

Abbildung 7-11 Automatisierungsgrade gemäß IEC 62267
Quelle: eigene Darstellung auf Basis Jäger et al. (2016), S. 420

Der Betrieb des virtuellen Zugverbandes verknüpft einen konventionell, triebfahrzeugführergesteuerten Betrieb des Masters mit einer automatisierten Steuerung des Slaves. Das Modul kann damit der Automatisierungsstufe GoA 3 beziehungsweise den DTO-Systemen (Driverless Train Operation) zugeordnet werden, welche mit der Antriebs- und Bremssteuerung des Fahrzeugs einhergehen und das Anfahren, Beschleunigen, Bremsen und Anhalten des Fahrzeuges automatisieren. Der Triebfahrzeugführer muss die Störfallbehandlung vornehmen können, sich aber während der Fahrt nicht im Führerstand aufhalten.[501]

Je nachdem welche Verkehrsart man im Schienenverkehr betrachtet, unterscheiden sich die technischen und betrieblichen Rahmenbedingungen. Entsprechend unterschiedlich fallen auch die Zielsetzungen und Einführungsstrategien automatisierter Verkehre aus[502]. Wenngleich die grundsätzlichen technischen Voraussetzungen des automatisierten Fahrens auf der Schiene gegeben sind, so sind für dessen betriebliche Umsetzung erhebliche Herausforderungen für Integration,

[500] Vgl. Jäger et al. (2016), S. 419.
[501] Vgl. Pelz, Dickgießer (2015), S. 36 f.
[502] Vgl. Jäger et al. (2016), S. 416 f.

Test und Erprobung bis zur Zulassung zu bewältigen[503]. Wann und in welchem Umfang die einzelnen Stufen auf der Schiene Realität werden, kann heute nicht abschließend eingeschätzt werden. Einige Beispiele: Die Deutsche Bahn AG hat angekündigt, bereits 2025 auf Teilen des Streckennetzes vollautomatisch fahrende Züge zu betreiben[504]. 2030 soll dies auch im Fern- und Güterverkehr auf der Schiene möglich sein[505], wobei davon ausgegangen wird, dass im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV), perspektivisch 20 bis 30 Prozent teilautomatisiert[506] betrieben werden können (GoA2)[507]. Zudem prognostizieren Experten, dass 2050 nur noch teil- oder vollautomatisierte Fahrzeuge auf der Schiene verkehren werden[508]. Mit einem Eisenbahnsystem, das ausschließlich aus autonomen Schienenfahrzeugen besteht, welche selbstentscheidend vom Start zum Ziel fahren, sei in den nächsten 50 Jahren nicht zu rechnen[509]. Bei städtischen Schienenbahnen hingegen ist der Megatrend „Automatisierung" heute bereits tägliche Realität in weltweit über 80 Anwendungsfällen (GoA4). Im SPNV, für dessen Anwendung die virtuelle Kupplung vorgesehen ist, sind die Rahmenbedingungen für die Automatisierung jedoch deutlich komplexer.[510] Gründe liegen insbesondere im Streckenlayout und in der fehlenden Möglichkeit, das Streckennetz lückenlos zu überwachen und gegen äußere Einflüsse abzugrenzen[511].

Soll der SPNV dennoch in Richtung einer Automatisierung des Betriebs weiterentwickelt werden, ist entweder ein evolutionärer oder revolutionärer Ansatz vorstellbar. Ein revolutionärer, also von heutigen Systemen losgelöster Ansatz, bei dem kleinere Gefäßgrößen schnell und flexibel bedarfsgerecht eingesetzt werden, bedarf einer Neukonzeption des gesamten Bahnsystems. Beim evolutionären Ansatz hingegen werden vorhandene Entwicklungen der Fahrzeug- und Betriebskonzepte logisch fortgeschrieben[512]: Heute bereits in den SPNV-Fahrzeugen vorhandene Fahrerassistenzsysteme können zum Beispiel als Basis für das automatisierte Fahren

[503] Vgl. Meyer zu Hörste (2017a) , S.2.
[504] Vgl. Jonuschat et al. (2016). S. 65.
[505] Vgl. Janicki (2016), S. 12.
[506] Teilautomatisiert bedeutet hier, dass Assistenz- und Zugsteuerungssysteme den größten Teil der Fahrt selbstständig steuern, während der Triebfahrzeugführer nur noch kritische Abschnitte, wie zum Beispiel Baustellen, manuell übernimmt.
[507] Vgl. Buhl (2016a), S. 6.
[508] Vgl. Jonuschat et al. (2016). S. 65.
[509] Vgl. Everding, Fürstenau (2016), S. 58.
[510] Vgl. Schindler, Eßer (2016), S. 468.
[511] Vgl. Pelz, Dickgießer (2015), S. 39.
[512] Vgl. Meyer zu Hörste (2017a), S. 1.

verwendet und der Fahrbetrieb im Sinne vernetzter Fahrzeuge weiterentwickelt werden[513]. Als einen Baustein des evolutionären Ansatzes kann die virtuelle Kupplung auf diesem Weg verstanden werden.

Für eine erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung ist es daher wichtig, sie als Teil der Automatisierungsentwicklung zu verstehen und sie dem Markt zudem möglichst schnell zur Verfügung zu stellen, da sonst die Gefahr besteht, von anderen automatisierten Systemen überholt zu werden. Gleichzeitig sollte auch ihr Potenzial als Brückentechnologie vergegenwärtigt werden: So kann die virtuelle Kupplung zum Beispiel im ländlichen Raum den Einsatz von Flügelkonzepten vereinfachen, welche für die Gestaltung des dortigen Verkehrsangebotes eine hohe Bedeutung haben. Weiterhin kann die virtuelle Kupplung dabei unterstützen, Erfahrungen mit der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu sammeln, welche für die nächsten Schritte zur Automatisierung des SPNV wertbringend eingesetzt werden können.

Wichtig zu beachten ist zudem, dass es für den Erfolg der virtuellen Kupplung wesentlich ist, dass sie nicht nur von den Aufgabenträgern und EVU, sondern auch von den Fahrgästen akzeptiert wird und zum Teil noch vorherrschende Vorbehalte gegen das automatisierte (fahrerlose) Folgen des Slaves abgebaut werden[514]. Daher sollten die zukünftigen Fahrgäste frühzeitig mit dem neuen Betriebskonzept der virtuellen Kupplung, zum Beispiel im Rahmen von Testfahrten und Messen, vertraut gemacht werden. An dieser Stelle sei auch auf einen möglichen Widerstand der Gewerkschaften hingewiesen, der sich aus dem Umstand des führerlosen Folgens des Slaves entwickeln kann.

Insbesondere vor dem Hintergrund der langen Nutzungsdauer der Schienenfahrzeuge und des damit einhergehenden langsamen Technologiewechsels, ist der im Bahnsektor notwendige Änderungsprozess möglichst schnell einzuleiten. Begleitend kann Lobbyarbeit bei den relevanten Akteuren (Fahrgäste, Gewerkschaften, Politik) dabei unterstützen, die Akzeptanz des Einsatzes der virtuellen Kupplung zu erhöhen.

Ein wichtiger Schritt stellt daher die „Strategie Schiene digital“ dar, auf welche sich der Bund, die Deutsche Bahn AG und die Bahnindustrie im Sommer 2016

[513] Vgl. Meyer zu Hörste (2017a), S. 1.
[514] Vgl. Schindler, Eßer (2016), S. 471.

verständigt haben und die eine zunehmende Automatisierung und Vernetzung des Schienenverkehrs fokussiert[515].

Abbildung 7-12 fasst die Ergebnisse des Abschnittes zusammen.

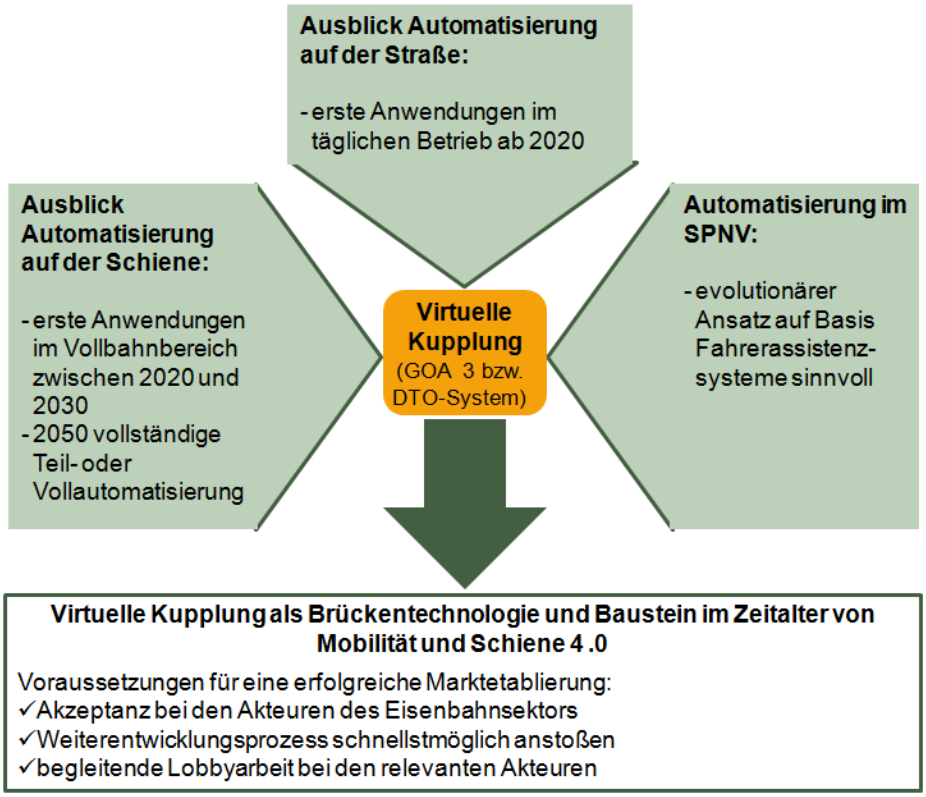


Abbildung 7-12 Einordnung der virtuellen Kupplung in die aktuelle Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussion
Quelle: eigene Darstellung

7.5 Zwischenfazit zur Markteinführung und -etablierung

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass außer den technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen von den einzelnen Marktakteuren rechtliche und organisatorische Herausforderungen zu bewältigen sind. Deutlich wird, dass die erfolgreiche Markteinführung und -etablierung nur dann gelingen kann, wenn alle betroffenen Marktakteure hierzu einen Beitrag leisten (vgl. Abbildung 7-13). Der Dialog und die Kooperation der Akteure sowie die Entwicklung einer abgestimmten Einführungsstrategie werden daher als zielführend eingeschätzt.

[515] Vgl. BMVI et al. (2016), S. 3.

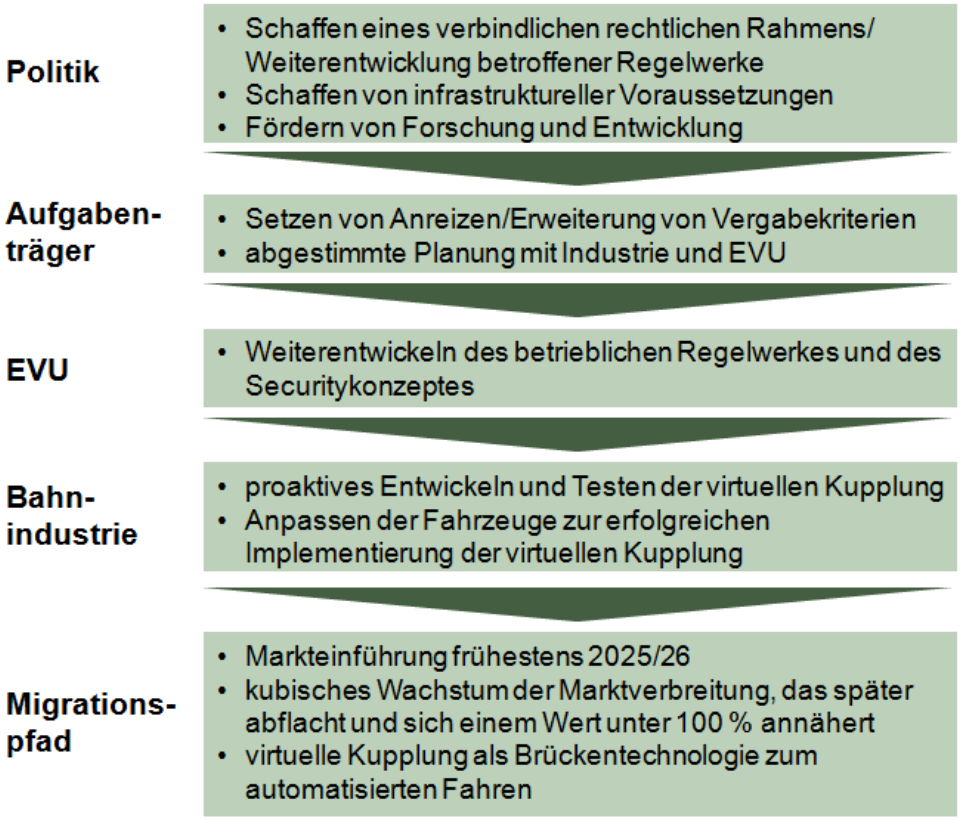


Abbildung 7-13 Handlungsbedarf der einzelnen Marktakteure zur Begegnung rechtlicher und prozessualer Herausforderungen
Quelle: eigene Darstellung

Aufgrund der Beschaffungsstrukturen im SPNV und den damit einhergehenden, notwendigen zeitlichen Vorläufen, ist davon auszugehen, dass der Einsatz der virtuellen Kupplung frühestens 2025/26 erfolgen könnte. Da dieser nach aktueller Rechtslage nicht zulässig wäre, ist hierfür zwingende Voraussetzung, dass die Regelwerke im Eisenbahnrecht des Bundes und der Europäischen Union entsprechend weiterentwickelt, im Kontext stehende Fragen geklärt und notwendige Auswirkungen auf die Fahrzeuggestaltung umgesetzt wurden. Der Zeitpunkt der potenziellen Markteinführung verschiebt sich dabei umso weiter in die Zukunft, je mehr Zeit für das Schaffen des verbindlichen rechtlichen Rahmens benötigt wird. Eine Unterstützung durch die öffentliche Hand kann positiven Einfluss auf den Zeitpunkt der Markteinführung nehmen. Die virtuelle Kupplung dem Markt schnellstmöglich zur Verfügung zu stellen, wird auch vor dem Hintergrund der aktuellen Digitalisierungs- und Automatisierungsdiskussionen als zielführend eingeschätzt.

Der Verlauf der dann folgenden Marktetablierung ist abhängig von dem Nutzen für die EVU, der Akzeptanz bei den Marktakteuren und einer begleitenden Lobbyarbeit.

Sie wird mit einer langen Übergangsphase einhergehen, in welcher im SPNV sowohl Fahrzeuge mit als auch ohne virtuelle Kupplung verkehren. Zu erwarten ist ein langsames Wachstum der Marktverbreitung, welcher später abflacht. Über Anreize in den Verkehrsausschreibungen (Erweiterung der Vergabekriterien) kann die Etablierung unterstützt und damit beschleunigt werden.

Der Einsatz der virtuellen Kupplung führt bei den Herstellern, EVU und Triebfahrzeugführern zu erhöhten Pflichten und beim Hersteller zu erhöhten Haftungsrisiken. Damit diese Haftungsverteilung nicht zum Ausschlusskriterium der Einführung wird, sollte geprüft werden, inwieweit das Haftungsrisiko zwischen EVU und Hersteller nach noch zu bestimmenden Kriterien aufgeteilt werden und inwieweit der Bund hier unterstützen könnte. Je nach Größe des EVU, besteht zudem die Pflicht oder die Empfehlung, der durch den Einsatz der virtuellen Kupplung erhöhten Gefahr von unberechtigten Angriffen von außen zu begegnen, indem deren Securitykonzepte um ausreichend hohe Securitymaßnahmen ergänzt werden, deren Aktualität kontinuierlich aufrechtzuerhalten sind.

Wie lange die virtuelle Kupplung am Markt etabliert sein kann, wird wesentlich von den Automatisierungsentwicklungen auf der Straße und der Schiene abhängen. Gleichzeitig kann die virtuelle Kupplung aber auch als Baustein in diesem Trend verstanden werden. Erfahrungen in diesem Feld, zum Beispiel aus der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, können deshalb auch in einem breiteren Kontext genutzt und weiterentwickelt werden.

8 Fazit

Dieses Kapitel hat zum Ziel, die Ergebnisse der Arbeit zu bündeln und ein Zukunftskonzept für die erfolgreiche Einführung und Etablierung der virtuellen Kupplung zu beschreiben sowie Erfolgsfaktoren hervorzuheben (Abschnitt 8.1). Zum Abschluss dieser Arbeit soll die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit erläutert werden (Abschnitt 8.2).

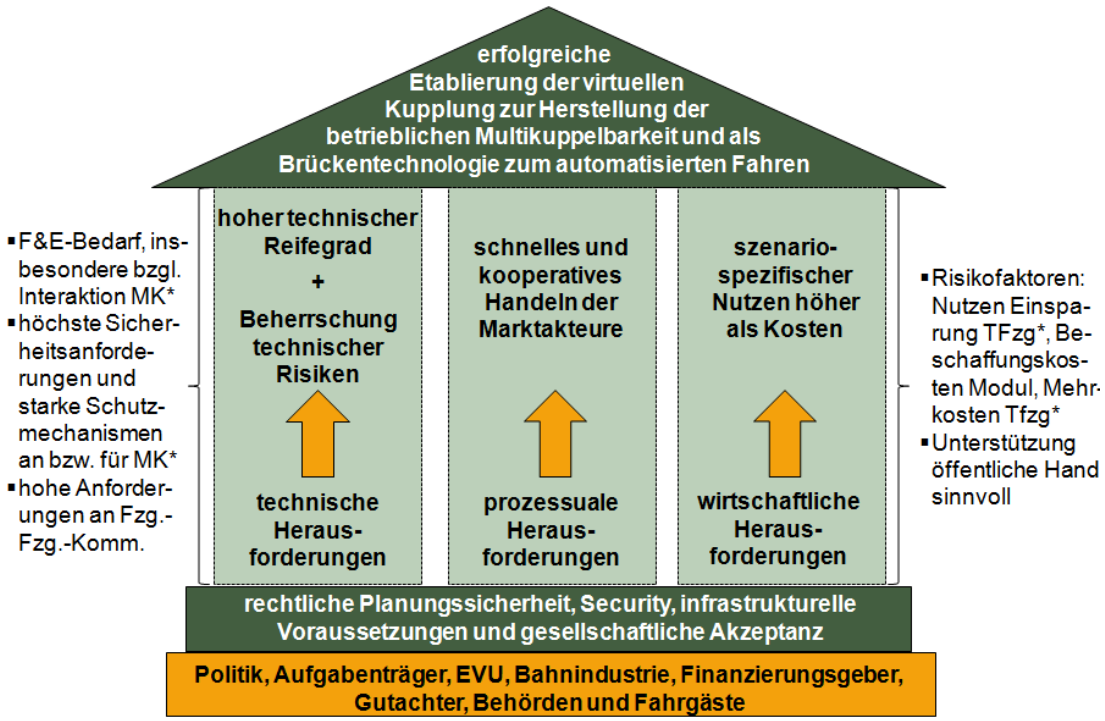
8.1 Zukunftskonzept „Erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung"

Deutschland muss in seinem Mobilitätssektor auf „Intelligente Mobilität" setzen, um auch weiterhin weltweit als moderner Mobilitätsstandort wahrgenommen zu werden. Hierzu sind heute bereits vorhandene Elemente, wie zum Beispiel Sensoren, Daten, Ortung, Rechnerleistung und Kommunikationssysteme im Sinne einer effizienten und bedarfsgerechten Mobilität miteinander zu verknüpfen.[516] Die virtuelle Kupplung für SPNV-Triebfahrzeuge greift diesen Gedanken auf. Das Konzept sieht vor, die Fahrzeugeinheiten eines Zugverbandes ohne eine physische Verbindung als logische Einheit dicht hintereinander verkehren zu lassen. Die hierfür benötigten Informationen und Befehle werden über zwei voneinander unabhängige Kommunikationskanäle ausgetauscht.

Die virtuelle Kupplung wurde anfangs aus einer Auswahl von fünf Lösungsansätzen als chancenreichster Lösungsansatz für die betriebliche Multikuppelbarkeit im SPNV identifiziert. Kern der vorliegenden Arbeit bildet die ganzheitliche Bewertung der virtuellen Kupplung entlang einer Analyse von technischen, wirtschaftlichen, rechtlichen und prozessualen Herausforderungen und Risiken, denen für eine erfolgreiche Einführung und Etablierung der virtuellen Kupplung mit geeigneten Lösungsstrategien begegnet werden muss. Im Verlauf der Arbeit konnte zudem das Potenzial der virtuellen Kupplung als Brückentechnologie hin zum automatisierten Fahren aufgezeigt werden.

Als Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse entsteht ein Zukunftskonzept, welches die entscheidenden Faktoren für die erfolgreiche Etablierung einer virtuellen Kupplung beschreibt (vgl. Abbildung 8-1).

[516] Vgl. Eck (2015), S. 16.



* F&E ≙ Forschung und Entwicklung, MK ≙ Modulkomponenten, TFzg ≙ Triebfahrzeug

Abbildung 8-1 Zukunftskonzept für die erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung
Quelle: eigene Darstellung

Deutlich wurde, dass die erfolgreiche Etablierung des Einsatzes der virtuellen Kupplung im Wesentlichen auf ihrer technischen Entwicklung und der Bewältigung von Marktumsetzungsherausforderungen basiert. Für deren Bewältigung sind die Bemühungen aller im Sektor betroffenen Akteure und deren koordiniertes Vorgehen notwendig. Insbesondere in Bezug auf den rechtlichen Rahmen besteht noch entscheidender Klärungs- und Handlungsbedarf, da der Einsatz der virtuellen Kupplung mit der aktuellen Rechtslage nicht vereinbar ist. Darüber hinaus zählen zu den zentralen Herausforderungen zur Markteinführung das Schaffen der infrastrukturellen Voraussetzungen, welche zum Einhalten der Anforderungen an die Kommunikation benötigt werden sowie die Gewährleistung der Security und das Erlangen der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Aus heutiger Sicht wäre mit einer Markteinführung der virtuellen Kupplung nicht vor 2025/26 zu rechnen. Ein pauschaler und valider Zeitplan für die notwendigen Schritte ist aufgrund der Vielfalt nicht direkt planbarer Aktionen jedoch nur schwer ableitbar. Einfluss auf den frühestmöglichen Einsatzzeitpunkt haben zudem die Kooperation der beteiligten Akteure, die Willensbekundung der Politik und der Klärungs- und Handlungsbedarf in Bezug auf die rechtlichen Fragestellungen. Mit

positiven, unterstützenden Impulsen ist aus dem stattfindenden Trend zu mehr Digitalisierung und Automatisierung zu rechnen.

8.2 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das hier entwickelte Zukunftskonzept für die erfolgreiche Etablierung der virtuellen Kupplung bildet die Grundlage einer detaillierten Betrachtung von Einzelfaktoren der virtuellen Kupplung, unter anderem zum Beispiel für programmatische Entscheidungen in Bezug auf die politische Förderung sowie einer detaillierten technisch fokussierten Anforderungsanalyse (Requirements Engineering, vgl. Abbildung 4-1).

Darüber hinaus ergeben sich aus den getroffenen Annahmen und aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen weiterführende Forschungsfragen, deren Beantwortung diese Arbeit und damit das Konzept der virtuellen Kupplung untersetzen und weiterentwickeln können. Abbildung 8-2 fasst die Felder zusammen, welche die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit charakterisieren.

Abbildung 8-2 Wissenschaftlichen Anschlussfähigkeit
Quelle: eigene Darstellung

In der vorliegenden Arbeit wurde in Weiterentwicklung und Verknüpfung heute bereits etablierter Methoden, ein Verfahren für die Auswahl und die ganzheitliche Bewertung von innovativen technologischen Ansätzen im SPNV erarbeitet, welches sich aus sechs Schritten zusammensetzt (vgl. Abbildung 8-3). Seine Anwendung auf

andere Fragestellungen, technologische Ansätze und technische Lösungen des SPNV ist prinzipiell möglich. Denkbar ist zum Beispiel eine Anwendung in Vorbereitung von Verkehrs- oder Fahrzeugausschreibungen oder im Rahmen von Forschungsprojekten zur Erarbeitung von Leitbildern für die Zukunft des SPNV.

Mittels der Anpassung einzelner Annahmen

- im Auswahlverfahren für den zu präferierenden Lösungsansatz,
- im NOWS-Verfahren,
- bei den Markteinführungsschritten und
- bei dem zu betrachtenden rechtlichen Umfeld,

kann das Verfahren auf den SPFV und den SGV übertragen und angewendet werden.

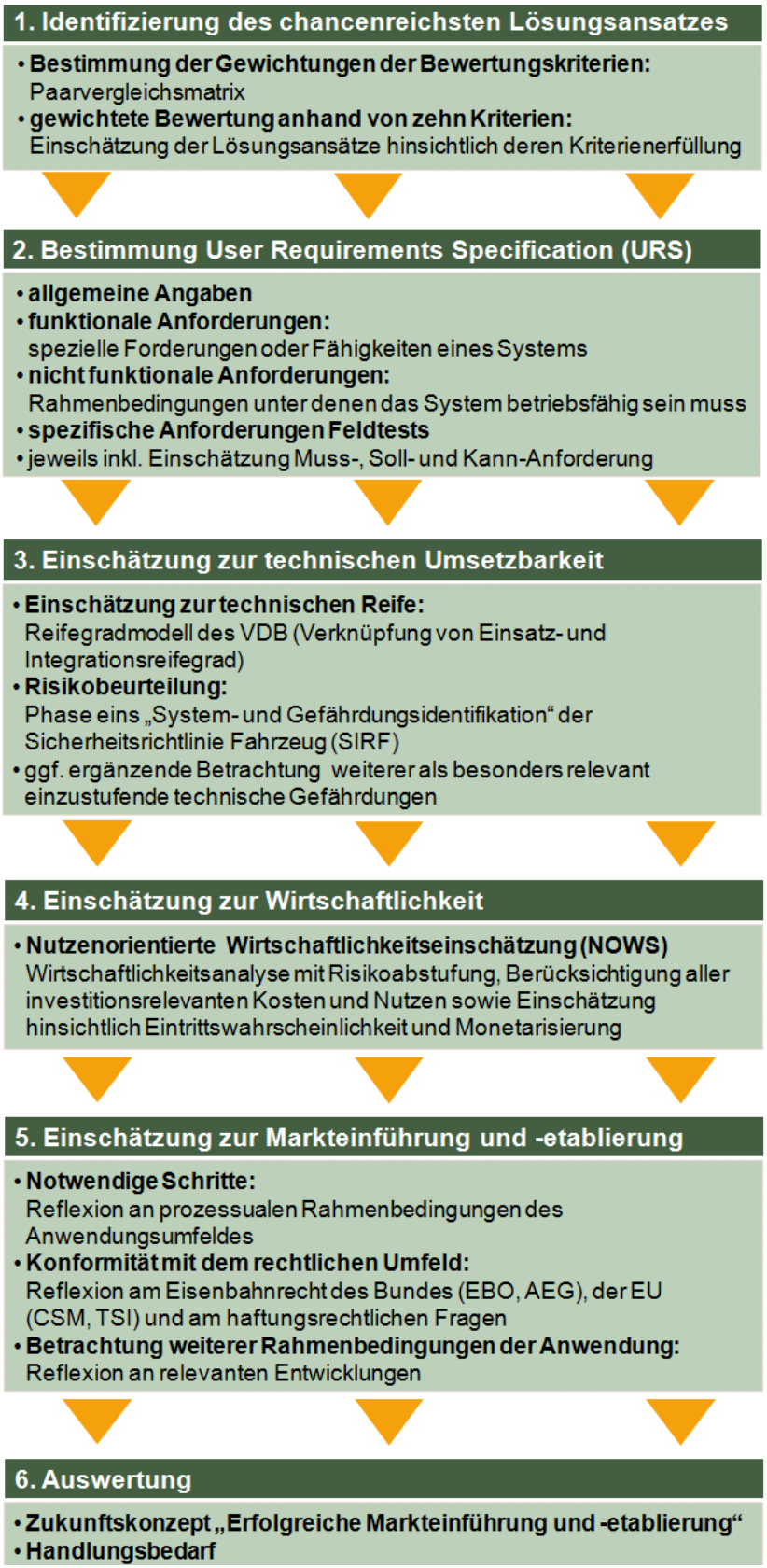


Abbildung 8-3 Verfahren zur Auswahl und Bewertung innovativer Lösungsansätze
Quelle: eigene Darstellung

Betont sei, dass sich die virtuelle Kupplung am Markt nur dann erfolgreich etablieren kann, wenn der Nutzen aus ihrem Einsatz für die Marktakteure ausreichend groß ist und sie eine positive Wirtschaftlichkeit aufweist. Je nach Aufgabenträger, EVU und betrachtetem Einsatzszenario kann der Business-Case der virtuellen Kupplung daher stark schwanken.

In den kommenden Jahren wird die Automatisierung des Bahnbetriebs weiter zunehmen. Welcher der technologisch vorstellbaren Automatisierungsansätze sich letztlich im täglichen Betrieb etablieren und bewähren kann, wird weniger von technischen als von betrieblichen und rechtlichen Randbedingungen abhängen. Die vorliegende Arbeit reiht sich daher aus Sicht der Autorin gut in die aktuellen Diskussionen zur Automatisierung des Schienenverkehrs ein und kann der Ausgangspunkt für einen erfolgreichen Einsatz der virtuellen Kupplung werden – für ein nachhaltiges Stärken des SPNV und seine verbesserte intermodale Wettbewerbsfähigkeit.

9 Literaturverzeichnis

Aberle, Gerd (2009): Transportwirtschaft – Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Aberle, Gerd (2015a): Pokern um Regionalisierungsmittel; Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe (67) 1/2015, S. 11.

Aberle, Gerd (2015b): ÖPNV-Finanzierung politisch gefährdet; Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe (67) 2/2015, S. 11.

Acatech (2015): Neue autoMobilität. Automatisierter Straßenverkehr der Zukunft (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag 2015.

AEG - Allgemeines Eisenbahngesetz: in der Fassung vom 20. Juli 2017; URL: http://www.gesetze-im-internet.de/aeg_1994/AEG.pdf, Zugriff: 09.08.2017.

Allianz pro Schiene (2005): Bahn frei für Europa – Für eine zukunftsweisende Verkehrspolitik in der EU; URL: https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2015/09/bahn-frei-fuer-europa.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

Allianz pro Schiene (2015a): Allianz pro Schiene-Arbeitsgruppe „Systemumfeld Schienenfahrzeuge“. Workshop zur Leitfrage: Welche generationsprägenden Merkmale sollen Schienenfahrzeuge des Nahverkehrs haben?; URL: https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2016/02/151123-Protokoll-Allianz-pro-Schiene-Arbeitsgruppe-Systemumfeld-Schienenfahrzeuge.pdf, Zugriff: 19.01.2018.

Allianz pro Schiene (2015b): Unser Leitbild, in der Fassung vom 10. Dezember 2015; URL: https://www.allianz-pro-schiene.de/wp-content/uploads/2015/10/151210_Leitbild.pdf, Zugriff: 21.01.2018.

Allianz pro Schiene (2017a): Elektrifizierungs-Programm fürs deutsche Schienennetz – Bundesländer-Vergleich zum Elektrifizierungsgrad zeigt große Lücken, Pressemitteilung vom 10. Oktober 2017; URL: https://www.allianz-pro-schiene.de/presse/pressemitteilungen/elektrifizierungs-programm-fuers-deutsche-schienennetz/, Zugriff: 12.10.2017.

Allianz pro Schiene (2017b): Übersicht: Elektrifizierung der Schiene in den Bundesländern, Grafik zur Pressemitteilung „Elektrifizierungs-Programm fürs deutsche Schienennetz – Bundesländer-Vergleich zum Elektrifizierungsgrad zeigt große Lücken“ vom 10. Oktober 2017; URL: https://onedrive.live.com/?authkey=%21AEvONzdAIzt81c8&cid=F18B48F1FC943851&id=F18B48F1FC943851%212776&parId=F18B48F1FC943851%212774&o=OneUp, Zugriff: 11.10.2017.

Alstom (2013a): Case study transport: Lille Metropole – The world’s first UTO to UTO revamping project; URL: http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Lille%20metro%20RS%20and%20Urbalis%20Fluence%20-%20Case%20Study%20-%20EN.pdf?epslanguage=en-GB, Zugriff: 21.12.2016.

Alstom (2013b): URBALIS ™ Solutions – Beyond CBTC Basics; URL: http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Urbalis%20range%20-%20Brochure%20-%20EN.pdf?epslanguage=en-GB, Zugriff: 31.12.2016.

Alstom (2016): Signaling Product Solutions: Urbalis™ Fluence; URL: http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/URBALIS%20Fluence%20-%20Product%20Sheet%20-%20EN.pdf?epslanguage=en-GB, Zugriff: 31.12.2016.

Austermann, Thomas (2017): Innovationen im Verkehrssektor – Analyse der Bedingungen für erfolgreiche technologische Neuerungen; Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe (69) 3/2017, S. 86 – 88.

BAG-SPNV (ohne Angabe): Fahrzeuge, URL: https://bag-spnv.de/fahrzeuge, Zugriff: 12.10.2017.

BAG-SPNV (2010): Die Finanzierung des SPNV sichern – nachhaltige Mobilität ermöglichen, Positionspapier veröffentlicht am 17.06.2010; URL: https://bag-spnv.de/positionen-ziele?file=files/bagspnv/startseite/positionen-ziele/downloads/2010-06-17_Positionspapier_Finanzierung.pdf, Zugriff: 07.12.2017.

BAG-SPNV (2013): Marktreport SPNV – Ein Lagebericht zum Wettbewerb im Schienenpersonennahverkehr; URL: http://bag-spnv.de/presse/details/marktreport-spnv-2013-der-wettbewerb-im-spnv-ist-wieder-im-aufwind-braucht-aber-stabilere-rahmenbedingungen?file=files/bagspnv/presse/2013/06/2013-06-28_Marktreport_SPNV_2013_final.pdf, Zugriff: 21.04.2014.

BAG-SPNV (2015): Aufgabenträger und Eisenbahnverkehrsunternehmen im SPNV – Fahrplanjahr 2016; URL: https://bag-spnv.de/files/bagspnv/startseite/wettbewerb-markt/2015-12-15%20Aufgabentraeger%20&%20Eisenbahn verkehrsunternehmen%202016.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

BAG-SPNV (2016a): Marktreport SPNV 2015/16, Ein Lagebericht zum Schienenpersonennahverkehr in Deutschlag; URL: http://bag-spnv.de/files/bagspnv/downloads/BAG-SPNV_Marktreport_SPNV_2015-16.pdf, Zugriff: 02.04.2016.

BAG-SPNV (2016b): Mitglieder der BAG-SPNV, Stand 10.08.2016; URL: http://bag-spnv.de/mitglieder, Zugriff: 30.10.2016.

BAG-SPNV (2016c): Endlich Planungssicherheit für SPNV erzielt! Aufgabenträger können jetzt langfristig ihren Auftrag erfüllen; Pressemitteilung vom 17.06.2016, URL: https://bag-spnv.de/presse/details/regmitteleinigung-endlich-planungssicherheit-fuer-spnv-erzielt?file=files/bagspnv/downloads/2016-06-17%20PM%20Regmitteleinigung%20-%20Endlich%20Planungssicherheit%20fuer%20SPNV%20erzielt.pdf, Zugriff: 04.10.2017.

BAG-SPNV (2016d): Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren, 3. Ausgabe; URL: https://bag-spnv.de/fahrzeuge?file=files/bagspnv/downloads/2016-02-23%20Fahrzeuganforderungen%20final%20gesamt.pdf, Zugriff: 12.10.2017.

BAG-SPNV (2017): Bahn-Elektrifizierung endlich voranbringen; Pressemitteilung vom 14.07.2017, URL: https://bag-spnv.de/presse/details/bahn-elektrifizierung-endlich-voranbringen?file=files/bagspnv/downloads/17-07-14%20PI%20BAG-SPNV%20Bahnelektrifizierung%20voranbringen.pdf, Zugriff: 11.10.2017.

BAG-SPNV, VDV (2014): Verbände sprechen sich für Gebrauchtfahrzeugmarkt im SPNV aus; Pressemitteillung vom 18.09.2014, URL: https://bag-spnv.de/presse/details/verbaende-sprechen-sich-fuer-gebrauchtfahrzeugmarkt-im-spnv-aus?file=files/bagspnv/downloads/2014-09-18%20PM%20Verbaendepapier%20Gebrauchtfahrzeugmarkt.pdf, Zugriff: 14.10.2017.

BAG-SPNV, VDV (2016): Fahrzeug 2020+; URL: https://www.vdv.de/vdv-bag-fahrzeug2020-.pdfx?forced=true&forced=true, Zugriff 11.12.2016.

Bahn-Report (2016): Die SPNV-Karte – Welches EVU erbringt wo SPNV-Leistungen im Fahrplan 2017, Stand: 11.12.2016; URL: http://www.bahn-report.de/docs/leseproben/http_download.inc.php?dat=SPNV-Karte2017.pdf, Zugriff: 29.10.2017.

Baier, Martin; Enning, Manfred (2006): FlexCargoRail – Ein Fahrzeugsystem für effizienten Einzelwagenverkehr; Beitrag erschienen in: Logistik management, 8. Jahrgang 2006, Ausgabe 3, URL: http://www.irt.rwth-aachen.de/uploads/media/Logistik_Management_3-06_01.pdf, Zugriff: 14.03.2015.

BEG – Bayerische Eisenbahngesellschaft (2013): Bahnland Bayern – Ausschreibungen 2013; URL: http://beg.bahnland-bayern.de/de/wettbewerb?file=files/media/corporate-portal/wettbewerb/projekte/beg-ausschreibung-expressverkehr-oberfranken.pdf, Zugriff: 07.10.2017.

BeNEX (2016): BeNEX Unternehmensbericht 2015 – unsere Facetten; URL: http://www.benex.de/files/161021_bnx_ub15.pdf, Zugriff: 26.01.2018.

BGB – Bürgerliches Gesetzbuch: in der Fassung vom 21.02.2017; URL: https://www.gesetze-im-internet.de/bgb/BGB.pdf, Zugriff: 20.08.2017.

Bitterberg, Ulrich; Pöpleu, Jan (2009): Kuppelbarkeit von Elektro- und Dieseltriebzügen unterschiedlicher Bauserien und Hersteller im SPNV, Endbericht Nr. 804-07 für die Bundesarbeitsgemeinschaft der Aufgabenträger im SPNV (BAG-SPNV), Berlin. Studie, nicht öffentlich.

Blome, Christian (2017): Vergleichende Beschreibung im Verkehr am Beispiel des differenzierten Stadtschnellbahnverkehrs in Ballungsräumen; genehmigte Dissertation an der Technischen Universität Berlin.

BMVI (o.A.): Automatisiertes und vernetztes Fahren; URL: http://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Automatisiertes-und-vernetztes-Fahren/automatisiertes-und-vernetztes-fahren.html, Zugriff: 11.08.2017.

BMVI (2011): Handbuch Eisenbahnfahrzeuge – Leitfaden für Herstellung und Zulassung; URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/LA/handbuch-eisenbahnfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 25.06.2017.

BMVI (2015): Bericht zum Forschungsbedarf, Runder Tisch Automatisiertes Fahren – AG Forschung; URL: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bericht-zum-forschungsbedarf-runder-tisch-automatisiertes-fahren.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 11.08.2017.

BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030; URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-kabinettsplan.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 12.10.2017.

BMVI (2017): Bundesrat stimmt Gesetz zum automatisierten Fahren zu; Pressemitteilung 065/2017 vom 12.05.2017, URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/065-dobrindt-gesetz-automatisiertes-fahren.html, Zugriff: 03.01.2018.

BMVI, Deutsche Bahn AG, Verband der Bahnindustrie in Deutschland (2016): Zukunftsforum Schiene Digital – 5-Punkte-Strategie, verabschiedet am 22. Juni 2016; URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Schiene/zukunftsforum-schiene-digital-5-punkte-strategie.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 24.07.2017.

BNetzA - Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2016): Marktuntersuchung Eisenbahnen 2016; URL: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2016.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff: 18.10.2017.

Bock, Ulrich (2001): Betriebs- und Kommunikationskonzept für dynamische Rendezvous-Manöver von Zügen; Dissertationsschrift, eingereicht am 21.05.2001 an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Bollow, Friedrich (2015): Ethernet per und durch die automatische Zugkupplung – berührungslos, kontaktbehaftet, nachrüstbar; Beitrag erschienen in: ZEVrail Ausgabe 139 (2015) 4 April, S. 140 – 147.

Bombardier Transportation (ohne Angabe): CITYFLO 550 – Overview and Reference Projects; URL: http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions/mass-transit-solutions/cityflo-550.html, Zugriff: 22.10.2017.

Bombardier Transportation (2016): Bombardiers vollautomatisches Personentransportsystem INNOVIA APM 300 geht am Flughafen München ans Netz; Pressemitteilung vom 22. April 2016, URL: http://de.bombardier.com/de/media/newsList/details.bt-20160422-bombardiers-innovia-apm-300-automated-people-mover-s.bombardiercom.html?, Zugriff: 22.10.2017**.**

Bonnet, Christophe (2003): Chauffeur 2; Final Presentation, Balocco, 07.05.2003; URL: http://www.itsforum.gr.jp/Public/E4Meetings/P01/fremont5_2_2.pdf, Zugriff: 20.03.2015.

BOStrab – Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung: Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahn, Stand vom 16.12.2016; URL: http://www.gesetze-im-internet.de/strabbo_1987/BOStrab.pdf, Zugriff: 07.01.2018.

Brenck, Dr. Andreas; Mitusch, Prof. Dr. Kay; Dams, Jan (2008): Verbrauchererwartungen an Dienstleistungsqualität im Bahnverkehr; Studie im Auftrag des Verbraucherzentrale Bundesverband e.V., URL: http://www.vzbv.de/sites/default/files/mediapics/erwartungen_dienstleistungsqualitaet_bahnverkehr_2008.pdf; Zugriff: 25.08.2015.

Breustedt, Thorsten (2017): Mensch, Macht und Maschine: 5 Dimensionen der Technik; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 10/2017, S. 28 – 34.

Brückmann, André (2016): Fernüberwachung bahntechnischer Systeme; Beitrag erschienen in Internationales Verkehrswesen, Ausgabe (68) 4/2016, S. 68 – 69.

BSI-KritisV – BSI-Kritisverordnung: Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI Gesetz, Stand vom 21.06.2017, URL: https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BSI-KritisV.pdf, Zugriff: 14.01.2018.

Buck-Heeb, Petra; Dieckmann, Andreas (2017): 3. Kapitel. Zivilrechtliche Haftung von Fahrer und Halter bei (teil-)autonomem Fahren; Beitrag erschienen in: Oppermann/Stender-Vorwachs: Autonomes Fahren – Rechtsfolgen, Rechtsprobleme, technische Grundlagen, München, Verlag C.H.Beck, S. 59 – 91.

Buhl, Eberhard (2016a): Die Zukunft der Mobilität ist digital; Beitrag erschienen in: Das Magazin für intelligente Mobilität, Ausgabe 15.2016, S. 4 - 7.

Buhl, Eberhard (2016b): Automatisiertes Fahren auf der Schiene, Beitrag erschienen in: Das Magazin für intelligente Mobilität, Ausgabe 15.2016, S. 18 – 23.

Büker, Thorsten (2010): Ausgewählte Aspekte der Verspätungsfortpflanzung in Netzen; Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, URL: http://publications.rwth-aachen.de/record/63831/files/3469.pdf; Zugriff: 06.09.2015.

Bundesrat (2016): Gesetzentwurf der Bundesregierung – Entwurf eines Gesetzes zur Änderung der Artikel 8 und 39 des Übereinkommens vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr, Drucksache 243/16, erschienen am 06.05.16, URL: https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2016/0201-0300/243-16.pdf?__blob=publicationFile&v=5, Zugriff: 04.01.2018.

BZKI - Begleitforschung zur zuverlässigen, drahtlosen Kommunikation in der Industrie (2017): Aspekte der Zuverlässigkeitsbewertung in ZDKI, Fachgrupe 1, URL: http://www.industrialradio.de/Attachments/ZDKI-FG1_Zuverl%C3%A4ssigkeit_Druck.pdf, Zugriff: 09.11.2017.

CENELEC (2017): Who we are; URL: https://www.cenelec.eu/aboutcenelec/whoweare/, Zugriff: 31.12.2017.

Daniel, Anselm F. (2007): Flex-Cargo-Rail: Flexibles System für den Einzelwagenverkehr; Beitrag erschienen in: Güterbahnen, Ausgabe 03/2007, S. 23 – 27; URL: http://www.irt.rwth-aachen.de/uploads/media/Gueterbahnen_3-07_01.pdf, Zugriff: 27.11.2015.

DB Energie (2012): Regelungen für den Zugang zum Bahnstromnetz der DB Energie GmbH - Konsultationsfassung Zugangsmodell -, Stand: 07. Mai 2012; URL: http://www.dbenergie.de/file/dbenergie-de/14062586/74gDbiBLcdfpb9aEsTsSwV7kYMQ/14034396/data/dbenergie_konsultation_netzzugang_bahnstrom.pdf, Zugriff: 12.10.2017.

DB Netz (2014a): European Train Control System (ETCS) bei der DB Netz AG; URL: https://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/2394144/C2itNOHyXI4KTwb_3kn-uKcscpI/7263212/data/etcsbroschuere_2014.pdf, ,Zugriff: 07.02.2016.

DB Netz (2014b): Allgemeine Geschäftsbedingungen für GSM-R-Dienstleistungen (AGB-GSMR-DL) der DB Netz AG, Stand: 14.12.2014; URL: https://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/12685998/0AROBo5pQuK9F7rIYHird3tGQGQ/9801764/data/snb_2017_anlage_3.3.2_agb_gsmr_r.pdf, Zugriff: 05.01.2018.

DB Netz (2014c): Neuherausgabe Richtlinie 408 – Fahrdienstvorschrift – sowie Aktualisierung der damit in Bezug stehenden Richtlinien, Brief enthalten im PDF auf S. 5 – 11; URL: http://www1.deutschebahn.com/file/fahrweg-de/10223642/Z3NvHEMCjPIqV9gUPTpShT78KmM/9771134/data/rw_408.48_aktualisierung_1.pdf, Zugriff: 12.11.2017.

DB Netz (2016): Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung, Neubaustrecke Ebensfeld – Erfurt; URL: http://www.vde8.de/mediathek/file/8883/dToFyLnkH0Bu24dvcJU-Usm1JTlViZHj_qXh0g8Yh7s/mediathek/02%20VDE%208.1%20Neubaustrecke%20Ebensfeld-Erfurt/05%20Ausruestung/VDE-81-NEUBAU_ETCS_Zugsteuerung-Zugsicherung-Signalgebung_European-Train-Control-System.pdf, Zugriff: 04.01.2018.

DB Netz (2017a): Infrastrukturregister – Grundsätze, Stand: März 2017, Version 4.4; URL: http://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/10829066/XOX9JS5Ev8_b4wQI8ImeIV5nDEg/13641284/data/allgemein.pdf, Zugriff: 11.10.2017.

DB Netz (2017b): Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG 2018 (SNB 2018), Gültig ab 10.12.2017; URL: http://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/12685998/KEszSAc4Coe6M83Pax9KjhW-JY0/13634450/data/snb_2018.pdf, Zugriff: 11.10.2017.

DB Netz (2017c): Infrastrukturregister – Interaktive Karte; URL: http://fahrweg.dbnetze.com/fahrweg-de/kunden/nutzungsbedingungen/infrastrukturregister/interaktive_karte.html, Zugriff: 11.10.2017.

DB Netz (2017d): Das Trassenpreissystem 2018 der DB Netz AG; URL: https://fahrweg.dbnetze.com/file/fahrweg-de/10316940/YoiOkcyOGvY9BFpKjOcWTCNKEQk/14145146/data/tpsbroschuere2018.pdf, Zugriff: 20.10.2017.

DB Regio (2015): RegioAktuell – Informationen für die Nachverkehrsbranche, Ausgabe 2/15; URL: http://www.db-regio.de/db_regio/view/mdb/db_regio/branche/mdb_204567_150601_nra_1502_gesamt.pdf, Zugriff: 14.12.2016.

DB Systemtechnik (2015): DB Systemtechnik prüft Lokomotiven und Doppelstockwagen von Škoda; Pressemitteilung veröffentlicht am 08.04.2015, URL: http://www.db-systemtechnik.de/dbst-de/news/news/11412384/pi_skoda.html, Zugriff: 02.10.2017.

Deine Bahn (2004): Automatische Mittelpufferkupplung – Scharfenberg-Kupplung, Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 2/2004, S. 109 – 112.

Dellner (ohne Angabe): Die Welt von Dellner; URL: https://dcab-public.sharepoint.com/Downloads/Brochures/German%20brochure.pdf, Zugriff:14.10.2017.

Dellmann, Torsten; Berger, Arne (2006): Autonomie und Automation der Eisenbahn im Kontext der Verkehrstechnik; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe 55 (2006), Heft 4, S. 233 – 240.

Denis, Guillaume; Sanner, Stéphane (2015): Urbalis™ Fluence – Zugorientierte CBTC-Lösung, Foliensatz vom März 2015, Dokument öffentlich nicht zugänglich.

Deutsche Bahn (2017a): Sauerlandnetz: Erste PESA-Neufahrzeuge rollen ab Herbst 2018; Pressemitteilung veröffentlicht am 27.07.2017, URL: http://www.deutschebahn.com/presse/duesseldorf/de/aktuell/presseinformationen/14785038/170727_PESA.html, Zugriff: 02.10.2017.

Deutsche Bahn (2017b): Fragen und Antworten zur Pünktlichkeit, Stand: 17.01.2017; URL: https://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/fahrplan_und_buchung/reiseauskunft/puenktlichkeitskommunikation/mdb_243202_faq_puenktlichkeit_personenverkehr-stand_17_1_2017.pdf, Zugriff: 10.12.2017.

Deutscher Bundestag (2006): Bericht der Bundesregierung zur Qualitätsoffensive im öffentlichen Personenverkehr – Verbraucherschutz und Kundenrechte stären. Unterrichtung durch die Bundesregierung; Drucksache 16/1484, Veröffentlichung am 11.05.2006, URL: http://dipbt.bundestag.de/doc/btd/16/014/1601484.pdf, Zugriff: 16.12.2017.

Deutscher Bundestag (2016): Zur Diskussion um die Verkürzung von Produktlebenszyklen; Dokumentation, URL: https://www.bundestag.de/blob/438002/42b9bf2ae2369fd4b8dd119d968a1380/wd-5-053-16-pdf-data.pdf, Zugriff: 06.01.2016.

Di Liberto, Emanuele (2016): LTE (Long Term Evolution) 4th generation radio mobile communication for Railway: Why? When? How?; Vortrag auf der 12th UIC ERTMS World Conference 2016, URL: http://www.ertms-conference2016.com/IMG/pdf/4.5_nokia_e_di_liberto_lte_advantages_v4_final.pdf, Zugriff: 19.11.2017.

DIN 25002-5: Bahnanwendungen - Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge - Teil 5: Funktionale Struktur, Ausgabedatum 2001-10.

Ebers, Martin (2017): 4. Kapitel. Autonomes Fahren: Produkt- und Produzentenhaftung; Beitrag erschienen in: Oppermann/Stender-Vorwachs: Autonomes Fahren – Rechtsfolgen, Rechtsprobleme, technische Grundlagen, München, Verlag C.H.Beck, S. 93 – 125.

EBO - Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung: in der Fassung vom 10.10.2016; URL: https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/ebo/gesamt.pdf, Zugriff: 06.05.2017.

Eck, Florian (2015): Digital, sicher, vernetzt, individuell – Intelligente Mobilität braucht einen Aktionsplan, Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe (67) 1/2015, S. 16f.

Eichelberger, Jan (2017): 5. Kapitel. Autonomes Fahren und Privatversicherungsrecht; Beitrag erschienen in: Oppermann/Stender-Vorwachs: Autonomes Fahren – Rechtsfolgen, Rechtsprobleme, technische Grundlagen, München, Verlag C.H.Beck, S. 127 – 155.

Eickholt, Jochen (2016): Digitalisierung: Die Zukunft der Mobilität, Vortrag auf der InnoTrans 2016 Vorpressekonferenz am 28.06.2016, URL: https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2016/mobility/2016-09-innotrans/praesentation-digitalisierung-zukunft-mobilitaet-d.pdf, Zugriff: 08.02.2017.

Eikenberg, Ronald (2015): Hacker steuern Jeep Cherokee fern; Beitrag erschienen auf heise online, veröffentlicht am 22.07.2015, 6.20 Uhr, URL: https://www.heise.de/security/meldung/Hacker-steuern-Jeep-Cherokee-fern-2756331.html, Zugriff: 25.08.2017.

Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe a): EU-Recht; URL: https://www.eba.bund.de/DE/RechtRegelwerk/EU-Recht/eu-recht_node.html, Zugriff: 14.08.2017.

Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe b): Technische Spezifikationen für die Interoperabilität; URL: https://www.eba.bund.de/DE/RechtRegelwerk/TSI/tsi_node.html, Zugriff: 15.08.2017.

Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe c): Fahrzeugzulassung; URL: https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Fahrzeugzulassung/fahrzeugzulassung_node.html, Zugriff: 03.01.2018.

Eisenbahn-Bundesamt (ohne Jahresangabe d): Rechtlicher Rahmen; URL: https://www.eba.bund.de/DE/RechtRegelwerk/rechtregelwerk_node.html, Zugriff: 07.01.2018.

Eisenbahn-Bundesamt, Verband der Bahnindustrie in Deutschland, Deutsche Bahn, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2012a): SIRF 100 Allgemeiner Teil; URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeuge/Fahrzeugtechnik/Funktionale_Sicherheit/31_SIRF_100.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff: 30.03.2017.

Eisenbahn-Bundesamt, Verband der Bahnindustrie in Deutschland, Deutsche Bahn, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2012b): SIRF 300 Durchführungsbestimmungen; URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeuge/Fahrzeugtechnik/Funktionale_Sicherheit/31_SIRF_300.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff: 30.03.2017.

Eisenbahn-Bundesamt, Verband der Bahnindustrie in Deutschland, Deutsche Bahn, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2012c): SIRF 400 Ausführungsbestimmungen; URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeuge/Fahrzeugtechnik/Funktionale_Sicherheit/31_SIRF_400.pdf;jsessionid=1E94ED7CC600EF073B968AC9B5108D62.live11293?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff: 30.03.2017.

Eisenbahn-Bundesamt, Verband der Bahnindustrie in Deutschland, Deutsche Bahn, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2012d): Technischer Sicherheitsplan (TeSiP); URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeuge/Fahrzeugtechnik/Funktionale_Sicherheit/31_Anlage_1_SIRF_Tesip_Funktionsliste.xls?__blob=publicationFile&v=1, Zugriff: 30.03.2017.

Eisenbahn-Bundesamt, Verband der Bahnindustrie in Deutschland, Deutsche Bahn, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2013): SIRF 200 Sicherheitsnachweisverfahren; URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Fahrzeuge/Fahrzeugtechnik/Funktionale_Sicherheit/31_SIRF_200.pdf;jsessionid=1E94ED7CC600EF073B968AC9B5108D62.live11293?__blob=publicationFile&v=2, Zugriff: 30.03.2017.

EN 50126: Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS), Deutsche Fassung EN 50126:1999, Ausgabe März 2000.

Enning, et. al. (2009): FlexCargoRailDefinitionsphase; Berichtsband zum Verbundprojekt; URL: http://www.irt.rwth-aachen.de/uploads/media/BMWI_FKZ_19G7013A.pdf, Zugriff: 18.10.2015.

Eurailpress (2001): Kein FunkFahrBetrieb auf der Lautertalbahn, Nachricht vom 07.11.2001, URL: http://www.eurailpress.de/news/alle-nachrichten/single-view/news/kein-funkfahrbetrieb-auf-der-lautertalbahn.html, Zugriff: 22.10.2017.

Europäische Kommission (2005a): 10 Fragen zum ERTMS, MEMO/05/235, veröffentlicht am 4. Juli 2005 in Brüssel; URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Europa/ERTMS/ERTMS10Fragen.pdf?__blob=publicationFile&v=3, Zugriff: 04.01.2017.

Europäische Kommission (2005b): Promote Chauffeur II – Projects & Results, veröffentlicht am 13.06.2005 in der Datenbank Community Research and Development Information Service (CORDIS) der Europäischen Kommission; URL: http://cordis.europa.eu/project/rcn/56873_en.html, Zugriff: 04.01.2017.

Europäisches Parlament (2017): Kurzdarstellungen über die Europäische Union – 2017, Schienenverkehr; URL: http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU_5.6.6.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

Europäisches Parlament und Rat (2004): Berichtigung der Entscheidung Nr. 884/2004/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 zur Änderung der Entscheidung Nr. 1692/96/EG über gemeinschaftliche Leitlinien für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes, URL: http://ec.europa.eu/ten/transport/legislation/doc/2004_0884_de.pdf, Zugriff: 19.08.2017.

Everding, Jan Philip; Fürstenau Frank (2016): Die Antwort der Beschaffungs- und Technikstrategie Schienenfahrzeuge auf die vierte Mobilitätsrevolution; Beitrag erschienen in: Eisenbahntechnische Rundschau. Ausgabe Mai 2016, S. 57-60.

EVO – Eisenbahnverkehrsordnung: in der Fassung vom 19.02.2016; URL: https://www.gesetze-im-internet.de/evo/EVO.pdf, Zugriff: 14.08.2017.

Fieberg, Ines (2004): Voith Turbo Scharfenberg – an den Zügen dieser Welt zu Hause; Beitrag erschienen in: EI – Eisenbahningenieur, Ausgabe (55) 9/2004, S. 132 – 135.

Forgó, Nikolaus (2017): 6. Kapitel. Datenschutzrechtliche Fragestellungen des autonomen Fahrens; Beitrag erschienen in: Oppermann/Stender-Vorwachs: Autonomes Fahren – Rechtsfolgen, Rechtsprobleme, technische Grundlagen, München, Verlag C.H.Beck, S. 157 – 171.

George, Klaus-Dieter (2006): Handbuch für den Eisenbahnbetriebsleiter. Band 3, Fahrzeuge und maschinentechnische Anlagen, Leipzig: AWV Aus- und Weiterbildungszentrum Verkehrsgewerbe Leipzig GmbH.

Gerlach, Katrin (2008): POSITRON – ein sicheres Ortungssystem, Vortrag im Rahmen des Workshops „Effiziente Nutzung regionaler Eisenbahn-infrastruktur“ am 08.10.2008 in Braunschweig; URL: http://elib.dlr.de/55818/1/08_Gerlach_POSITRON.pdf, Zugriff: 02.11.2017.

Gerstlberger, Prof. Dr. Wolfgang; Siegl, Michael (2009):Öffentliche Dienstleistungen: unverzichtbarer Baustein der Daseinsvorsorge! Zwei Jahrzehnte Privatisierung: Bilanz und Ausblick; Beitrag erschienen in WISO Diskurs, Ausgabe Juni 2009; URL: http://library.fes.de/pdf-files/wiso/06514.pdf; Zugriff: 25.08.2015.

Geuckler, Michael (2017): Erwartungen/Anforderungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht der Aufgabenträger; Vortrag bei der VDB Fachgruppe Personenfahrzeuge am 04. April 2017, Foliensatz nicht öffentlich zugänglich.

GG – Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland: mit Stand vom 13.07.2017, URL: https://www.gesetze-im-internet.de/gg/GG.pdf, Zugriff: 25.08.2017.

Girardet, Daniel; Müller, Jürgen; Ott, Anselm; Zils, Markus (2014): Neue Wachstumschancen im Schienenpersonenverkehr; Beitrag erschienen in ETR – Eisenbahntechnische Rundschau Ausgabe Mai 2014 Nr. 5, S. 16 – 19.

Gralla, Christoph (2016a): Pro Autonomes Fahren; Beitrag erschienen in bahn manager, Ausgabe 03-2016, S. 26.

Gralla, Christoph (2016b): Autonomes Fahren im Nahverkehr, ein alter Hut oder Digitalisierung 4.0; Vortrag auf dem 16. Internationalen SIGNAL + DRAHT-Kongress 2016 am 10. und 11.11.2016 in Fulda.

Grimm, Matthias; Hartwig, Katrin; Meyer zu Hörste, Dr. Michael (2005): Anforderungen an eine sicherheitsrelevante Ortung im Schienenverkehr; URL: http://elib.dlr.de/20857/1/Poster_2_Grimm.pdf, Zugriff: 04.06.2016.

Grote, Andreas (2000): Angekoppelt – Hightech bei DB Cargo; Beitrag erschienen in: c’t Magazin, Heft 13/2000, S. 232 - 236.

Halbekath, Jürgen (2013): Betriebliches und technisches Risikomanagement; Beitrag erschienen in Deine Bahn, Ausgabe 12/2013, S. 12 – 17.

Happe, Johannes (2005): Ein Konzept für elektronisch gekoppelte Lks-Konvois auf Autobahnen mittels Fahrerassistenzsystemen, Fortschritt-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 591, Düsseldorf: VDI Verlag.

Harhurin, Alexander; Hiebenthal, Thomas (2011): Funktionsorientierte Spezifikation als Vertrag zwischen Auftraggeber und Hersteller; Beitrag erschienen in: Signal und Draht, Ausgabe (103) 6/2011, S. 22 – 27.

Hecht, Markus (2013): Passive Sicherheit – zu viel des Guten?; Beitrag erschienen in: ZEVrail, Augabe 137 (2013) 5 Mai, S. 161.

Hecht, Markus; Jänsch, Eberhard; Lang, Hans Peter; Lübke, Dietmar; Mayer, Joachim; Mittmann, Walter; Pachl, Jörn; Siegmann, Jürgen; Weigand, Werner (2008): Das System Bahn. Handbuch. Hamburg: DVV Media Group GmbH / DVV Rail Media (Eurailpress).

Heinrich, Ingo (2017): Außerplaninstandhaltung von Eisenbahnfahrzeugen – Algorithmus für einen vorhersagbaren Schadindex, Wiesbaden: Springer Gabler/Springer Fachmedien.

Henckel, Susanne (2011): Wettbewerb und Anforderungen – der SPNV in der Zange der Rahmenbedingungen?; Vortrag im Rahmen des 6. VCD-Bahnkongress Niedersachsen am 17.11.2011, Foliensatz öffentlich nicht zugänglich.

Henke, Christian (2013): Betriebs- und Regelstrategien für den autonomen Fahrbetrieb von Schienenfahrzeugen mit Linearantrieb, genehmigte Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik der Universität Paderborn.

Henke, Christian; Rustemeier, Carsten; Schneider, Tobias; Böcker, Prof. Dr. Joachim; Trächtler, Prof. Dr, Ansgar (2007): RailCab – Ein Schienen-verkehrssystem mit autonomen Linearmotor getriebenen Einzelfahrzeugen; URL: http://wwwlea.uni-paderborn.de/fileadmin/Elektrotechnik/AG-LEA/forschung/veroeffentlichungen/2007/07ETG_Henke_Rustemeier_Schneider_Boecker_Traechtler.pdf, Zugriff: 18.11.2015.

Henke, Christian; Tichy, Matthias; Schneider, Tobias; Böcker, Joachim; Schäfer, Wilhelm (2008): System Architecture and Risk Management for Autonomous Railway Convoys; Beitrag erschienen im Tagungsband zur Systems Conference, 2nd Annual IEEE, 7. bis 10. April 2008.

Hoopmann, Ralf (2016): Der SPNV-Markt im Jahr 2016 aus der Sicht der Aufgabenträger; Vortrag auf dem Deutschen Nahverkehrstag am 03. Juni 2016 in Koblenz, URL: https://www.deutschernahverkehrstag.de/fileadmin/vortraege/DNT2016_Hoopmann_SPNV-Markt_2016.pdf, Zugriff: 19.10.2017.

Husmann, Martin (2017): Aktuelles vom SPNV-Markt; Vortrag am 30.06.2017 in München, URL: https://www.pkf-muenchen.de/media/public/db/media/102/2017/07/100243/husmannvrr_aktuellesvomspnv-markt.pdf, Zugriff: 03.10.2017.

Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken (2003): Innovationspreis für „CargoMover“; Erschienen in WiM – Wirtschaft in Mittelfranken, Ausgabe 12/2003, Seite 48, URL: http://www.ihk-nuernberg.de/de/IHK-Magazin-WiM/WiM-Archiv/WIM-Daten/2003-12/Unternehmen-und-Personen/Innovationspreis-fuer-bdquo-CargoMover-ldquo-.jsp.

Institut für Unternehmenskybernetik (2013): Abschlussbericht zum Forschungsantrag (16684N), Thema: Return on Open Innovation- Methode zur Investitions-und Effizienzsicherung von Open Innovation für KMU; URL: http://www.ima-zlw-ifu.rwth-aachen.de/fileadmin/user_upload/IfU/Forschung/Forschungsgruppen/Wirtschafts_und_Sozialkybernetik/Invoice/downloads/Invoice_Abschlussbericht.pdf, Zugriff: 29.01.2017.

IT-Sicherheitsgesetz – Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme: Gesetz vom 17.07.2015; URL: http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl115s1324.pdf, Zugriff: 10.01.2018.

Jäger, Bärbel; Meyer zu Hörste, Michael; Hesse, Tobias; Köster, Frank (2016): Automatisiertes Fahren – Kann die Schiene von der Straße lernen? (ein technisch-betrieblicher Vergleich), Beitrag erschienen in: ZEVrail, Ausgabe 140 (2016) 10, Oktober, S. 416 - 423.

Jahn, Carlos (2016): Digitaler Wandel in der Seeschifffahrt – Herausforderungen und Potenziale, Vortrag auf dem 5. Hamburger Schifffahrtdialog am 19.04.2016; URL: http://hamburg.hk24.de/Veranstaltung/Anlagen/VSDB/131005793/5ter_Hamburger_Schifffahrtsdialog_Jahn_CML.pdf, Zugriff: 26.10.2017.

Janicke, Jürgen; Reinhard, Horst (2008): Schienenfahrzeugtechnik, DB Fachbuch, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Mainz, Bahn Fachverlag Heidelberg.

Janicki, Jürgen (2011): Systemwissen Eisenbahn, DB Fachbuch, 1. Auflage, Berlin, Bahn Fachverlag.

Janicki, Jürgen (2016): Digitalisierung und Automatisierung des Schienenverkehrs; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 09/2016, S. 8 – 12.

Januschat, Helga; Zweigel, René; Jahn, Valentin; Walter, Ulrike (2016): Update der Schiene: Innovationen im Bahnverkehr; Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen Ausgabe (68) 4/2016, S. 65-67.

Johner, Christian (2017): Lastenheft und Pflichtenheft: Unterschiede, veröffentlicht am 23. Februar 2017; URL: https://www.johner-institut.de/blog/iec-62304-medizinische-software/lastenheft-pflichtenheft-systemspezifikation/, Zugriff: 04.10.2017.

Kaumanns, Sven C. (2006): Unternehmen des öffentlichen Personennahverkehrs in der Konjunkturberichterstattung; Beitrag in Statistisches Bundesamt • Wirtschaft und Statistik, Ausgabe: 12/2005, URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/DienstleistungenFinanzdienstl/UnternehmenDienstl1205.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 27.04.2014.

Kellmeyer, Herbert (2004): Rangierarbeitsverfahren; Beitrag erschienen in: Bahn Praxis – Zeitschrift zur Förderung der Betriebssicherheit und der Arbeitssicherheit bei der DB AG, Ausgabe 09/2004, S. 103 - 106, URL: http://www.euk-info.de/fileadmin/PDF_Archiv/BahnPraxisB/Archiv_2004/BahnPraxisB_09-2004.pdf, Zugriff: 10.10.2015.

Kellmeyer, Herbert; Homeyer, Diemar (2013): Rangieren mit funkgesteuerten Triebfahrzeugen, Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 9/2013, S. 50 – 57.

Kieffer, Eberhard; Ernst, Jürgen; Jasper-Ottenhus, Christiane (2014): Das Bahnsteigkonzept der DB AG, Beitrag erschienen in: ETR –Eisenbahn-technische Rundschau Ausgabe Mai 2014, Nr. 5, S. 36 – 42, URL: https: //www.deutschebahn.com/file/de/11878120/gmoPoFG3rJwRIwguuX_ozEoNhAg/11870990/data/ETR_05_2014_Bahnsteighoehenkonzept.pdf, Zugriff: 08.10.2017.

Knauber, Peter (2006): Anforderungsanalyse, Requirements Engineering, Präsentation im Rahmen der Vorlesung Software Engineering an der FH Mannheim; URL: http://services.informatik.hs-mannheim.de/~knauber/BCSc-SE/06a-f.pdf, Zugriff: 11.11.2017.

Kochsiek, Joachim (2009): Flex-Cargo-Rail: Wege zu neuen Konzepten für die „letzte Meile"; Beitrag erschienen in: Güterbahnen, Ausgabe 4/2009, S. 20 – 26.

Kossak, Andreas (2016): Werden autonome Autos die städtischen Bahnsysteme überflüssig machen?; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe Mai 2016, Nr. 5, S. 24 – 30.

Kraftschik, R., Wiesenthal, K. (2001): FunkFahrBetrieb aus Sicht des Herstellers; URL: https://web.archive.org/web/20151005065556/http://vwitme011.vkw.tu-dresden.de/TrafficForum/vwt_2001/beitraege/VWT18proceedings_pages161-165.pdf, Zugriff: 22.10.2017.

Kühne, Jörg (2016): Breite Basis bei der Finanzierung reduziert die Risiken; Beitrag erschienen in: bahn manager, Ausgabe 02 – 2016, S. 118.

Leenen, Maria; Strang, Karl (2013): Deutscher Bahnmarkt steht vor Richtungsentscheidungen; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 3/2013, S. 53 – 57.

Leenen, Maria; Wolf, Andreas; Neumann, Lars; Herbermann, Alexander (2012): Fahrzeugfinanzierung im SPNV – Bewertung der Chancen und Risiken verschiedener Finanzierungslösungen aus der Sicht von Aufgabenträgern, Verkehrsunternehmen und Finanzierungsanbietern im Auftrag der DB Regio AG; URL: https://www.deutschebahn.com/file/de/11877804/COhchf2oHPRAh8VVmzmub9ps60w/3048378/data/sci_spnv_fahrzeugfinanzierung.pdf, Zugriff: 04.10.2017.

Lehrbaum, Martin (2016): Autonomes Fahren – zukunftssichere Kommunikation; Beitrag im Tagungsband zum 16. Internationalen SIGNAL + DRAHT-Kongress 2016 am 10. und 11.11.2016 in Fulda, S. 27 – 28.

Lemmer, Karsten (2009): Entwicklung eines Demonstrators für Ortungsaufgaben mit Sicherheitsverantwortung im Schienengüterverkehr DemoOrt, Abschlussbericht der Phasen 1 und 2; URL: https://www.tib.eu/suchen/download/?tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A61896620X&tx_tibsearch_search%5Bsearchspace%5D=tn&cHash=d31c5a7bc91610c6e7949a969f8cab97#download-mark, Zugriff: 11.11.2017.

Mankins, John C. (1995): Technology Readiness Levels – A White Paper, April 6, 1995; URL: https://www.hq.nasa.gov/office/codeq/trl/trl.pdf, Zugriff: 25.03.2017.

Manz, Hansjörg (2017): Zertifizierung der satellitenbasierten Ortung als industrielle Komponente im Schienenverkehr, Beitrag erschienen in: ZEVrail, Ausgabe 141 (2017) 10 Oktober, S. 372 – 379.

Meisner, Gunnar; Werning, Malte (2016): Das Optimum an Wirtschaftlichkeit, Beitrag erschienen in: Eisenbahn Journal Spezial 2/2016, V90, S. 56 – 65, URL: https://ia801907.us.archive.org/4/items/Eisenbahn_Journal_Special_Nr.2_2016/Eisenbahn_Journal_Special_Nr.2_2016.pdf, Zugriff: 26.10.2017.

Meub, Michael (ohne Jahresangabe): § 2 Methodenlehre: Einteilungen der Rechtsnormen und Auslegungsmethoden im Privatrecht; URL: http://www.meub.de/Inhalte/zivilrecht/bgb_at/02_Methodenlehre/Auslegung.pdf, Zugriff: 19.02.2017.

Meyer, Gereon; Martin, Christian (2014): Automatisiertes Fahren –Chancen für die Elektromobilität, Positionspapier des eNOVA Strategiekreises Elektromobilität; URL: http://www.strategiekreis-automobile-zukunft.de/public/files/enova-positionspapier-automatisiertes-fahren, Zugriff 06.08.2017.

Meyer zu Hörste, Michael (2013): ETCS – Wie weist man die Einhaltung eines Standards nach?; Vortrag auf der Verkehrskolloquium am 10.01.2013, URL: http://www.verkehrskolloquium.de/wp-content/uploads/2015/03/Vortrag_MzH.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

Meyer zu Hörste, Michael (2017a): Autonomes Fahren auf der Schiene: Eine neue Chance für den SPNV?; Beitrag erschienen in: InnoTrans 2018 Report, Ausgabe 1, 21. Jahrgang, Mai 2017, S. 1 – 2.

Meyer zu Hörste, Michael (2017b): Vollautomatisches Fahren: Vom Baustein zum System; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 10/2017, S. 36 – 40.

Michler, Oliver; Richter, Robert; Wolf, Alexander (2016): Interoperabilitätsuntersuchungen zwischen LTE und GSM-R für Bahnbetriebsanwendungen auf Basis von NI-basierten SDR-Komponenten; Beitrag erschienen im Begleitband zum 21. VIP-Kongress 2016, URL: http://www.etz.de/files/048_richter-michler-wolf.pdf, Zugriff: 19.11.2017.

Mofair; Netzwerk Europäische Eisenbahnen (2015): Wettbewerber-Report, Eisenbahn 2015/2016; URL: http://www.netzwerk-bahnen.de/assets/files/veroeffentlichungen/pdf/Wettbewerber-Report-2015-2016.pdf, Zugriff: 30.10.2016.

Mofair; Netzwerk Europäischer Eisenbahnen, Verband der Güterwagenhalter in Deutschland (2017): Wettbewerber-Report Eisenbahn 2017/2018, Langfassung; URL: https://mofair.de/wp-content/uploads/2017/10/Wettbewerber-Report_Eisenbahn_2017_18_Langfassung.pdf, Zugriff: 09.12.2017.

Molle, Peter (1998): Die Erprobung Selbsttätig Signalgeführter Triebfahrzeuge (SST) im Güterverkehr der Deutschen Bahn AG; Beitrag erschienen in Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Ausgabe 07/1998, S. 443 – 446.

Mott, Dr. Peter; Koesling, Sonja (2013): Was bewegt die ÖPNV-Branche?; Beitrag erschienen in Der Nahverkehr, Ausgabe 1-2/2013, S. 18 – 22.

Müller-Herbers, Sabine (2007): Methoden zur Beurteilung von Varianten, Reader der Fakultät Architektur und Stadtplanung am Institut für Grundlagen und Planung der Universität Stuttgart; URL: http://www.igp.uni-stuttgart.de/publika/pdf/methoden.pdf, Zugriff: 21.05.2017.

Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie (2016): Auf dem Weg zur Emissionsfreiheit im Zugverkehr – Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene, Fahrplan für den Einsatz von Brennstoffzellentriebwagen in Deutschland; Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, URL: https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20160701-bmvi-studie-untersucht-wirtschaftliche-rechtliche-und-technische-voraussetzungen-fuer-den-einsatz-von-brennstoffzellentriebwagen-im-zugverkehr/broschuere_wasserstoff-infrastruktur-fuer-die-schiene_online-version.pdf, Zugriff: 30.12.2017.

NEB (2016): Die neuen Pesa „Link" Dieseltriebzüge für die NEB erhalten EBA-Zulassung für Deutschland; Pressemitteilung veröffentlicht am 03.06.2016, URL: http://www.neb.de/unternehmen/aktuelles/details/die-neuen-pesa-link-dieseltriebzuege-fuer-die-neb-erhalten-eba-zulassung-fuer-deutschland/, Zugriff: 02.10.2017.

NFON (ohne Angabe): QoS (Quality of Service), Glossareintrag, URL: https://www.nfon.com/de/telefonanlage/ressourcen/glossar/qos-quality-of-service/, Zugriff: 05.01.2018.

Pachl, Jörn (2008): Systemtechnik des Schienenverkehrs – Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 5. bearbeitete und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, GWV Fachverlag.

Page, Hannah (2016): Automatisierung im Bahnbetrieb – Impuls ATO; Vortrag bei der Fachgruppe Personenfahrzeuge des VDB am 18.11.2016, Foliensatz öffentlich nicht zugänglich.

Paral, Thomas (2012): Interoperabilität bei automatischen Kupplungen – mechanisch ja, elektrisch nein – Daten-, Signal- und Energieübertragung im Zugverband; Vortrag bei den AMA-Thementagen „Sensorik und Messtechnik für Schienenfahrzeuge" am 08. und 09.11.2012 in Berlin, Foliensatz nicht öffentlich zugänglich.

PEGASUS (ohne Angabe): Forschungsprojekt PEGASUS – Automatisiertes Fahren effektiv absichern; URL: http://www.pegasus-projekt.info/de/about-PEGASUS, Zugriff: 12.01.2018.

Pelz, Markus; Dickgießer, Boris (2015): Lösungen für automatisiertes Fahren im Fern-, Güter- und Regionalverkehr; Beitrag erschienen in: Signal + Draht, Ausgabe 107, 9/2015, S. 35 – 39.

Pelz, Markus (2016): Autonomes Fahren im Schienenfernverkehr – Einflüsse der digitalen Evolution; Vortrag auf dem 16. Internationalen SIGNAL + DRAHT-Kongress 2016 am 10. und 11.11.2016 in Fulda.

Perrey, Jesko (1998): Nutzenorientierte Marktsegmentierung; Ein integrativer Ansatz zum Zielgruppenmarketing m Verkehrsdienstleistungsbereich; Springer Fachmedien Wiesbaden.

PBefG – Personenbeförderungsgesetz: in der Fassung vom 20. Juli 2017, URL: https://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/PBefG.pdf, Zugriff: 21.01.2018.

Poignée, Frank; Kraus, Patrick (2017): Wie funktional sichere Systeme vor Angriffen von außen geschützt werden; Beitrag erschienen in: ETR –Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe November 2017, S. 38 – 40.

Polisky, Eugen (2016): Modellierung und Simulation stochastischer, diskret - kontinuierlicher Systeme am Beispiel des dynamischen Flügelns für den Next Generation Train; Konferenzbeitrag auf der 14. Fachtagung EKA 2016, URL: http://elib.dlr.de/105069/1/EKA2016_9_Polisky_Modellierung%20und%20Simulation%20stochastischer%2C%20diskret-kontinuierlicher%20Systeme.pdf, Zugriff: 12.02.2017.

Polz, Johann; Beck, Rainer (2000): Automatisches Fahren auf Bahnen nach EBO; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe 49 (2000), Heft 10, S. 680 – 686.

ProdHaftG – Produkthaftungsgesetz: Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte mit Stand vom 17.07.2017; URL: https://www.gesetze-im-internet.de/prodhaftg/ProdHaftG.pdf, Zugriff: 22.08.2017.

Reder, Bernd (2014): Sprachwirrwarr bei Car-to-Car-Kommunikation; Internetbeitrag erschienen am 07.10.2014, URL: https://www.computerwoche.de/a/sprachwirrwarr-bei-car-to-car-kommunikation,3064890, Zugriff: 10.01.2018.

Rees, Dagmar (2017): Das Ziel: Ein Netz für alle Anwendungen, Beitrag erschienen in ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe März 2017, S. 22 – 25.

Regionalisierungsgesetz: Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs, mit Stand vom 23.12.2016; URL: www.gesetze-im-internet.de/regg/BJNR239500993.html, Zugriff: 04.10.2017.

Retschy, Jürgen (2015): Leittechnikarchitekturen von modernen Nahverkehrsfahrzeugen; Vortrag auf der ETG Fachtagung am 15. und 16. September 2015.

Rheinland-Pfalz-Takt (ohne Angabe): SÜWEX – aktuelle Projekte des ZSPNV Süd; URL: http://www.zspnv-sued.de/aktuelle-projekte/artikeldetails/artikel/suewex-1.html, Zugriff: 14.11.2017.

Rheinland-Pfalz-Takt (2015): Erste Bilanz – seit diesem Jahr wird eng getaktet und geflirtet; Interview mit Andreas Schilling und Ralph Roesen, URL:http://www.der-takt.de/suche/artikeldetails/artikel/suewex.html, Zugriff: 14.11.2017.

Richter, Michael (2016): Wie Wartungskonzepte im SPNV-Markt den Unterschied ausmachen können; Beitrag erschienen in: bahn manager, Ausgabe 02-2016, S. 30f.

RL 2004/49/EG: Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Eisenbahnsicherheit in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 95/18/EG des Rates über die Erteilung von Genehmigungen an Eisenbahnunternehmen und der Richtlinie 2001/14/EG über die Zuweisung von Fahrwegkapazität der Eisenbahn, die Erhebung von Entgelten für die Nutzung von Eisenbahninfrastruktur und die Sicherheitsbescheinigung („Richtlinie über die Eisenbahnsicherheit"); URL: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:220:0016:0039:de:PDF, Zugriff 15.08.2017.

RL 2006/42/EG: Richtlinie 2006/42 EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung); URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0042&from=DE, Zugriff: 23.11.2017.

RL 2008/57/EG: Richtlinie 2008/57/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Juni 2008 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft; URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0057&from=DE, Zugriff: 30.08.2017.

Roth, Michael; Doluschitz, Reiner (2007): Kosten-Nutzen-Analyse für Qualitätssicherungs- und Rückverfolgbarkeitssysteme in Wertschöpfungsketten tierischer Produkte; URL: https://pdfs.semanticscholar.org/0f0f/b640aaa30c91888abd2b61e1ea08d7267c4c.pdf, Zugriff: 01.02.2017.

Rothenstein, Dirk (2010): Zur Bedeutung der Kundenzufriedenheit für im Schienenpersonennahverkehr tätige Unternehmen, Dissertation an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften, Universität Duisburg-Essen; URL: https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/binary/PUJH25D3LH6DMSEA4A4WKGSJ3IKR5F5A/full/1.pdf, Zugriff: 19.10.2017.

Rudhart, Dr. Manfred (2014): Wettbewerb im Nahverkehr im Wandel; Beitrag erschienen in: EI-Eisenbahningenieur, Ausgabe November 2014, S. 36 – 38.

Rügheimer, Hannes (2017a): Schnell, schneller, 5G; Beitrag erschienen in DEKRA solutions, Ausgabe 3/2017, S. 18 – 21.

Rügheimer, Hannes (2017b): Auf Wellenlänge; Interview mit Joaguín Torrecilla und José de la Plaza, Erschienen in DEKRA solutions, Ausgabe 3/2017, S. 22f.

RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge (ohne Angabe): Forschungsprojekte – Fahrerassistenz und Fahrzeugführung KONVOI; URL: https://www.ika.rwth-aachen.de/de/forschung/projekte/fahrerassistenz-und-fahrzeugf%C3%BChrung/1635-konvoi.html, Zugriff: 22.10.2017.

Sagmeister, Christian (2014): GSM-R als das zentrale Kommunikationssystem; Beitrag erschienen in ZEVrail, Ausgabe 138 (2014) 5 Mai, S. 174 – 181.

Sand, Stephan (2016): Virtuell vernetzt – Wie Züge durch Kommunikation zusammenfinden; Beitrag erschienen in: bahn manager, Ausgabe 2/2016, S. 124f. .

Sander, Manuela; Richard, Hans (2004): Versuchsstrecke der Neuen Bahntechnik Paderborn; Beitrag erschienen in: EI – Eisenbahningenieur (55) Ausgabe 6/2004, S. 40 – 45.

Schäfer, Karsten (2007): „Riesengroße Kiste“; Beitrag vom 12.01.2007 in der Technology Review – Das Magazin für Innovation, URL: https://www.heise.de /tr/artikel/Riesengrosse-Kiste-279343.html, Zugriff: 02.01.2017.

Schäfer, Michael; Pauli, Willi (2000): FunkFahrBetrieb – Erstanwendung für die DB AG im Lautertal; Beitrag erschienen in: Signal + Draht, Ausgabe 92 3/2000, S. 23 – 27.

Schill, Christoph (2012): Interoperabilität bei automatischen Kupplungen - Mechanisch ja, elektrisch nein – Daten-, Signal- und Energieübertragung im Zugverbund; Vortrag im Rahmen der AMA-Thementage „Sensorik und Messtechnik für Schienenfahrzeuge“ am 08. und 09.11.2012 in Berlin.

Schindler, Dr. Christian; Eßer, Florian (2016): Chancen und Risiken für den Schienenverkehr durch „3A“; Beitrag erschienen in: ZEVrail Ausgabe 140 (2016) 11-12, November-Dezember, S. 464 – 471.

Schmid, Gregor; Voges, Wolfgang; Müller, Matthias (2017): Anwendung und Umsetzung einer reifegradoptimierten Projektabwicklung in der Schienenfahrzeugbeschaffung; Beitrag erschienen in: ZEVrail, Ausgabe 141 (2017) 10 Oktober, S. 390 – 396.

Schmitt, Gottfried (2012): Qualitätskriterien und Bonus-Malus-Systeme im Schienenpersonennahverkehr in Baden-Württemberg; Vortrag am 30. November 2012 in Stuttgart, URL: http://www.nvbw.de/fileadmin/nvbw/ Fahrgastbeirat/Sitzungen/30.11.2012/Qualitaetsmesssystem.pdf, Zugriff: 22.12.2017.

Schnieder, Dr. Lars (2014): Strategien für den ÖPNV der Zukunft; Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen, Ausgabe (66) 3/2014, S. 96 – 97.

Schreyer, Christian (2017): Erwartungen an Schienenfahrzeuge aus Sicht der Transdev Gruppe; Vortrag bei der VDB Fachgruppe Personenfahrzeuge am 4. April 2017, Foliensatz nicht öffentlich zugänglich.

Schulz, Tim (2014): Herzstück und Hauptbolzen; Beitrag erschienen in: Regionalverkehr, Ausgabe: 4/2014, S. 13 – 17.

Schumann, Tilo (2017): Erhöhung der Streckenkapazität des Shinkansens mit dynamischen Flügeln; Beitrag erschienen in: EI – Der Eisenbahningenieur, Ausgabe Januar 2017, S. 52 – 57.

Schuppe, Axel; Fleischmann, Ralf (2015): Die Zulassung von Schienenfahrzeugen – aktuelle Entwicklungen und Perspektiven; Vortrag beim Eisenbahnwesen-Seminar der Technischen Universität Berlin am 09.02.2015, URL: https://www.schienenfzg.tu-berlin.de/fileadmin/fg62/Dokumente/Downloads/ Zulassung_Bahntechnik_TU_Berlin_D_.pdf, Zugriff: 30.10.2017.

Schuppe, Axel; Weidner, Maxim (2015): Innovationen im Schienenverkehr – Wie kommen Technologien schneller auf die Schiene; Beitrag erschienen in EIK Ausgabe 2015, S. 329 – 342.

Schütte, Jörg (2017): Neue Übertragungstechniken für Bahnen; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe Oktober 2017, Nr. 10, S. 86.

Schwilling, Andreas; Bunge, Stephan (2014): 20 Jahre Bahnreform und Deutsche Bahn AG – Bilanz und Ausblick; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe Januar+Februar 2014, Nr. 1+2, S. 12 – 15.

Schwilling, Andreas; Bunge, Stephan; Roland Berger Strategy Consultants (2014): 20 Jahre Bahnreform und Deutsche Bahn AG – Erfolge und künftige Herausforderungen, Hamburg, DVV Media Group GmbH.

SCI, KCW (2012): Markteinführung von Innovationen im System Bahn – Ergebnisse einer Studie zum SPNV in Deutschland im Auftrag der ERI-Partner und der BAG-SPNV. Studie nicht öffentlich zugänglich.

Shift2Rail (2017): Annual activity report 2016; URL: https://shift2rail.org/wp-content/uploads/2017/10/Shift2rail-AAR2016.pdf, Zugriff: 26.10.2017.

Siemens (2012): Automatisierungssystem für Zugbildungsanlagen Trackguard Cargo MSR32, URL: https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/rail-automation/cargo/the-msr32-microcomputer-system-de.pdf, Zugriff: 10.10.2015.

Siemens (2013a): Trainguard Sirius CBTC,For efficient mass transit operation; URL: http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/rail-automation/train-control-systems/trainguard-sirius-cbtc-en.pdf, Zugriff: 25.10.2015.

Siemens (2013b): Siemens liefert Signaltechnik für die Erweiterung der Linie 1 in Algier, Pressemitteilung vom 13. August 2013; URL: http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2013/infrastructure-cities/mobility-logistics/ICMOL201308028d.pdf, Zugriff: 29.10.2015.

Siemens (2013c): São Paulo Metro's driverless Line 4-Yellow, Fact sheet vom 10. Juni 2013; URL: http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2013/corporate/2013-06-brazil/factsheet-line-4-yellow-e.pdf, Zugriff 21.12.2016.

Significance, GoudappelCoffeng und NEA (2012): Erfassung des Indikators Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs im Bewertungsverfahren des Bundesverkehrswegeplanung: Schlussbericht; URL: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/bvwp-2015-machbarkeitsstudie-zuverlaessigkeit.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff: 29.06.2015.

Sinner, Marc; Brawand, Sergio; Weidmann, Ulrich (2017): Große Chancen durch Automatisierung im ÖPNV; Beitrag erschienen in: Der Nahverkehr, Ausgabe 10/2017, S. 30 – 36.

Smith, Kevin (2017): Beyond GSM-R: the future of railway radio; Beitrag erschienen am 01.03.2017 im International Railway Journal, URL: http://www.railjournal.com/index.php/telecoms/beyond-gsm-r-the-future-of-railway-radio.html, Zugriff: 08.11.2017.

Sonntag, Alexander (2015): PROMIDIS Handlungsleitfaden, Instrument Paarweiser Vergleich; URL: https://www.inf.uni-hamburg.de/de/inst/ab/itmc/research/completed/promidis/instrumente/paarweiser-vergleich, Zugriff: 21.05.2017.

Stahlhut, Michail (2009): Analyse von Transportpreisbeeinflussung – Präsentation am Beispiel Trasse, Energie; Vortrag am DLR in Braunschweig am 02.07.2009, URL: http://www.dlr.de/fs/Portaldata/16/Resources/dokumente/vk/Vortrag_Stahlhut_090702.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

Statistisches Bundesamt (2017): Fachserie 8 Reihe 2.1, Verkehr – Eisenbahnverkehr – Betriebsdaten des Schienenverkehrs, URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/PersonenverkehrSchienenverkehr/BetriebsdatenSchienenverkehr2080210157004.pdf;jsessionid=844909B29DDA44FF467EB643111B6B59.InternetLive1?__blob=publicationFile, Zugriff: 12.10.2017.

Steinbacher, Christian (2017): Eisenbahn als kritische Infrastruktur und das IT-Sicherheitsgesetz; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 10/2017, S. 42 – 49.

Stebens, André (2001): Simulation von Eisenbahnverkehr auf der Basis von Zellularautomaten; Dissertation an der Universität Duisburg, URL: https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-5150/Stebens_Dissertation.pdf, Zugriff: 23.11.2017.

Striebich, Matthias (2016): Automatisierte U-Bahn Nürnberg – Erfahrungen aus Sicht des Betriebs und der Instandhaltung; Vortrag auf dem 16. Internationalen SIGNAL + DRAHT-Kongress 2016 am 10. und 11.11.2016 in Fulda.

Taïani, François (1998): Datenstruktur und Anwendung eines digitalen Streckenatlas für den Schienenverkehr; Diplomarbeit an der Universität Stuttgart, URL: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/1999/330/pdf/330.pdf, Zugriff: 24.02.2015.

Tanner, Anna (2012): Ausschreibungswettbewerb im Schienenpersonennahverkehr: Potenzial und Empfehlungen für die Schweiz anhand von Erfahrungen aus Deutschland; Bachelorarbeit an der Universität Bern, URL: https://www.voev.ch/de/Service/content_index.php?section=downloads&download=2952, Zugriff: 07.12.2017

Technische Universität Berlin (2005): Übung: Leittechniksysteme am Institut für Land- und Seeverkehr, Betriebssysteme elektrischer Bahnen; URL: http://www.itp.tu-berlin.de/fileadmin/a3533/uploads/UE_NwB1/Leittechniksysteme.pdf, Zugriff: 19.03.2015.

TEIV – Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung: Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems, Stand vom 12.05.2016; URL: http://www.gesetze-im-internet.de/teiv/TEIV.pdf, Zugriff: 01.01.2018.

TfV – Triebfahrzeugführerscheinverordnung: Verordnung über die Erteilung der Fahrberechtigung an Triebfahrzeugführer sowie Anerkennung von Personen und Stellen für Ausbildung und Prüfung, Stand vom 26.07.2017; URL: http://www.gesetze-im-internet.de/tfv/TfV.pdf, Zugriff: 01.01.2018.

Theis, Mario (2016): Marktentwicklung und Herausforderungen im SPNV; Vortrag auf dem Deutschen Nahverkehrstag 2016 am 03.06.2016, URL: https://www.deutschernahverkehrstag.de/fileadmin/vortraege/DNT2016_Theis_Marktentwicklung_Herausforderungen_SPNV.pdf, Zugriff: 03.10.2017.

Trinckauf, Jochen (2015): ETCS – das einheitliche Zugbeeinflussungssystem für Europa; URL: https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/vst/ressourcen/dateien /download/stud_generale/ETCS-Studium-Generale.pdf?lang=de, Zugriff: 22.10.2017.

Van Olfen, Uwe (2017): Digitalisierung des Triebzuges; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe Juni 2017, Nr. 6, S. 68 – 71.

VDB (2015): VDB-Leitfaden Quality Engineering in der Entwicklung von Schienenfahrzeugen und ihren Systemen; URL: http://bahnindustrie.info/file admin/Leitfaeden/VDB-QE-Leitfaden_inkl_Tools.zip, Zugriff: 03.03.2017

VDV (2016): VDV-Statistik 2015; URL: https://www.vdv.de/statistik-2015.pdfx ?forced=true, Zugriff: 30.10.2016.

VDV (2017): VDV-Statistik 2016; URL: https://www.vdv.de/statistik-2016.pdfx ?forced=true, Zugriff: 10.12.2017.

Vischer, Daniel; Bohun, Vladimir (1971): Die Beurteilung von Projekten anhand der Nutzen-Kosten-Analyse; Beitrag erschienen in: Schweizerische Bauzeitung, Ausgabe 89 (1971), Heft 52, S. 1309 – 1315, URL: https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=sbz-002:1971:89::956, Zugriff: 23.01.2018.

VO (EG) 1370/2007: Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2007 über öffentliche Personenverkehrsdienste auf Schiene und Straße und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 1191/69 und (EWG) Nr. 1107/70 des Rates; URL: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:315:0001: 0013:DE:PDF, Zugriff: 06.03.2014.

VO (EU) 402/2013: Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 der Kommission vom 30. April 2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 352/2009; URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/ PDF/?uri=CELEX:32013R0402&from=DE, Zugriff: 14.08.2017.

VO (EU) 1299/2014: Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union; URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF /?uri=CELEX:32014R1299&from=DE, Zugriff: 08.10.2017.

VO (EU) 1302/2014: Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union; URL: http://eur-lex.europa .eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1302&from=DE, Zugriff: 15.08.2017.

VO (EU) 2015/995: Verordnung (EU) 2015/995 der Kommission vom 8. Juni 2015 zur Änderung des Beschlusses 2012/757/EU über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union; URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri= CELEX:32015R0995&from=EN, Zugriff: 02.11.2017.

Voith Turbo (ohne Angabe): Scharfenberg Kupplungen; URL: http://www.voith.com/de/produkte-leistungen/antriebstechnik/scharfenberg-kupplungen-10318.html, Zugriff: 14.10.2017.

Voith Turbo Scharfenberg (2012): Verbinden und Schützen. Kupplungs- und Frontendsysteme; URL: http://resource.voith.com/vt/publications/downloads/1994_d_vts_212836_verbinden_u_schuetzen_280x210_rz_de_screen.pdf, Zugriff: 14.05.2014.

VBB – Verkehrsverbund Berlin-Brandenburg (2015): Grenzüberschreitender Verkehr nach Polen – Erfahrungen und Lösungsansätze; URL: http://www.mil.brandenburg.de/media_fast/4055/2015-10-21%20Vortrag%20Br%C3%BCssel%20VBB-Dill.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

VRR - Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (2013): Schaffung einer grenzüberschreitenden SPNV – Verbindung zwischen Arnhem und Emmerich; URL: http://mediencenter.vrr.de/asset/hintergruende_niederrheinnetz_13062013.pdf, Zugriff: 18.10.2017.

VVG – Versicherungsvertragsgesetz: Gesetz über den Versicherungsvertrag, Stand vom 23.05.2017; URL: https://www.gesetze-im-internet.de/vvg_2008/VVG.pdf, Zugriff: 23.08.2017.

Wagner, Bernardo (2017): 1. Kapitel. Technik autonomer Fahrzeuge; Beitrag erschienen in: Oppermann/Stender-Vorwachs (2017): Autonomes Fahren – Rechtsfolgen, Rechtsprobleme, technische Grundlagen; München, Verlag C.H. Beck, S. 1 - 32.

Wabtec Corporation (ohne Angabe): Type 330 Latch-Link; URL: https://www.wabtec.com/products/3439/type-330-latch-link, Zugriff: 19.10.2017.

Walther, Götz (2012): Das betrieblich-technisch Regelwerk; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 12/2012, S. 13 – 16.

Wendt, Henning (2012): Kapazitätsengpässe beim Netzzugang; Studien zum Regulierungsrecht 4, Tübingen, Mohr Siebeck.

Wendt, Rüdiger (2013): Bahntechnische Normung; Vortrag im Rahmen des DMG-Seminars E2-2013 „Marktwirtschaftliche Anwendungen der Bahnsysteme“, 11. bis 13. Juni 2013, BTU Cottbus.

Wilkens, Andreas (2016): Tesla Model S lässt sich von fern kapern; Beitrag erschienen auf heise online, veröffentlicht am 20.09.2016, 08.24 Uhr, URL: https://www.heise.de/newsticker/meldung/Tesla-Model-S-laesst-sich-von-fern-kapern-3327510.html, Zugriff: 25.08.2017.

Winter, Dr. Joachim (2011): Leise, sparsam, schnell – der Zug der Zukunft; Beitrag erschienen in: Internationales Verkehrswesen (63), Spezial Ausgabe, 4/2011, S. 2 – 3, URL: http://elib.dlr.de/70356/1/Der_Zug_der_Zukunft.pdf, Zugriff: 12.02.2017.

Winter, Dr. Joachim (2012a): Next Generation Train – Zug der Zukunft; Beitrag erschienen in: Deine Bahn, Ausgabe 9/2012, S. 11 – 14.

Winter, Dr. Joachim (2012b): Next Generation Train – Entwicklung eines Hochgeschwindigkeitszuges für die übernächste Generation; Beitrag erschienen in: EI-Eisenbahningenieur, Ausgabe April 2012, S. 32 – 36.

Wirsing, Erik (2016): Autonomes Fahren in der Logistik – Anwendungsszenarien im öffentlichen und nicht öffentlichen Raum, Vortrag auf der IAA am 29.09.2016 in Hannover.

Wolbert, Matthias; Weiß, Gerhard (2016): Train Communication Network: Neue Standards für die Zugvernetzung; Beitrag erschienen in: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Ausgabe Oktober 2016, Nr. 10, S. 49 – 51.

Woywod, Dan (2015): Zulassung von Schienenfahrzeugen; Vortrag am 24.06.2015 an der Fachhochschule Brandenburg, Foliensatz nicht öffentlich zugänglich.

Zander, Björn; Hempelmann, Klaus; Mängel, Christian (2015): Zulassung einer Mehrfachtraktion KISS und FLIRT3 (Mischtraktion unterschiedlicher Fahrzeuge); Vortrag auf dem VDE Symposium am 26.11.2015.

Zerban, Frank (2015): Die Aufgabenträger müssen alle möglichen Formen der Bestellung nutzen können; Interview erschienen in RegioAktuell, Ausgabe 2/2015, S. 4 – 5.

Zilch, Konrad; Diederichs, C.J.; Bernhard; Katzenbach, Rolf (2002): Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand; Springer-Verlag, Heidelberg Berlin.

Zlocki, Adrian (2012): KONVOI andinteractive, Truck Platooningand Crash Avoidance; Vortrag im Rahmen des Road Vehicle Automation Workshop Irvine, 25.07.2012, URL: http://www.interactive-ip.eu/index.dhtml/docs/Zlocki_IKA_RoadVehicleAutomationWorkshop_25072012.pdf, Zugriff: 20.03.2015.

10 Anhang

Anhang 1 Übersicht zu den Bewertungskriterien

Zur Erläuterung der zu vergleichenden Bewertungskriterien wurde den Teilnehmern Tabelle 10-1 zur Verfügung gestellt.

Tabelle 10-1 Kriterien zur Auswahl des chancenreichsten Lösungsansatzes
Quelle: eigene Darstellung

lfd. Nr.	Kriterium	Kurzerläuterung
1	betrieblich praktikabel	Der Lösungsansatz sollte zu keinen lösungsansatzbedingten betrieblichen Einschränkungen führen, welche mit erhöhter Wahrscheinlichkeit die Einhaltung des Fahrplans gefährden.
2	bewährt	Der Lösungsansatz sollte sein Potenzial in vergleichbaren Anwendungen bereits nachgewiesen haben.
3	europäisch interoperabel	Der Lösungsansatz sollte auch auf europäischer Ebene zur Anwendung kommen können.
4	fahrgastverträglich	Der Lösungsansatz sollte vom Fahrgast akzeptiert werden und zu dessen Zufriedenheit mit dem Verkehrsangebot beitragen.
5	herstellerunabhängig entwickelt	Der Lösungsansatz sollte herstellerunabhängig entwickelt werden können.
6	kapazitätssteigernd	Der Lösungsansatz sollte die Leistungsfähigkeit des Schienennetzes erhöhen, indem er die verfügbare Streckenkapazität steigert.
7	nachrüstbar	Der Lösungsansatz sollte sowohl für Neu- als auch für Bestandsfahrzeuge anwendbar sein.
8	stabil anwendbar	Der Lösungsansatz sollte nach der Umsetzung über einen langen Zeitraum nachhaltig stabil zur Anwendung kommen können, ohne dass größere technische Anpassungen notwendig werden.
9	technisch kompatibel	Der Lösungsansatz sollte die betriebliche Multikuppelbarkeit ermöglichen, gleichzeitig zu der in SPNV-Fahrzeugen etablierten Technik kompatibel sein und deren Funktionalität nicht einschränken.
10	wettbewerbsfördernd	Der Lösungsansatz sollte den Wettbewerb der Schienenfahrzeughersteller in der Fahrzeug-beschaffung der EVU und der Aufgabenträger unterstützen.

Zur Durchführung des paarweisen Vergleiches erhielten die Teilnehmer zudem das in Abbildung 10-1 dargestellte Formblatt.

Erläuterung zur Handhabung der Matrix:
Bitte vergleichen Sie alle Kriterien untereinander systematisch, indem Sie in jeder Zelle das zugehörige Kriterium der Spalte mit dem zugehörigen Kriterium der Zeile vergleichen und die Ziffer des Kriteriums notieren, welches Sie beim paarweisen Vergleich jeweils als wichtiger einschätzen. Bitte führen Sie den Vergleich nur in den gelbmarkierten Zellen durch.
Bitte stellen Sie sich bei jedem Vergleich die Frage, welches Kriterium aus ihrer Sicht für die erfolgreiche Markteinführung und -etablierung eines Lösungsansatzes zur Etablierung einer betrieblichen Multikuppelbarkeit im SPNV in Deutschland wichtiger ist. Vielen Dank.

	Kriterium	1 betrieblich praktikabel	2 bewährt	3 europäisch interoperabel	4 fahrgast-verträglich	5 herstellerunabh. entwickelt	6 kapazitäts-steigernd	7 nachrüstbar	8 stabil anwendbar	9 technisch kompatibel	10 wettbewerbs-fördernd
1	betrieblich praktikabel	X									
2	bewährt		X								
3	europäisch interoperabel			X							
4	fahrgastverträglich				X						
5	herstellerunabhängig entwickelt					X					
6	kapazitätssteigernd						X				
7	nachrüstbar							X			
8	stabil anwendbar								X		
9	technisch kompatibel									X	
10	wettbewerbsfördernd										X

Abbildung 10-1 Formblatt "Paarweiser Vergleich"
Quelle: eigene Darstellung

Anhang 2 Detaillierte Erläuterung zu vergleichbaren Anwendungs- und Forschungsbeispielen

Die nachfolgenden Ausführungen präzisieren die in Abschnitt 4.2 enthaltene Tabelle 4-1 und die Tabelle 4-2, welche Anwendungs- und Forschungsbeispiele enthalten, die mit der virtuellen Kupplung vergleichbar sind. Es erfolgt eine Gliederung nach den fünf Clustern:

A) Schienenpersonenverkehr (ab Seite XL),

B) Schienengüterverkehr (ab Seite XLV),

C) Rangierverkehr (ab Seite XLVIII),

D) Verfahren zur Zugfolgesicherung (ab Seite L) sowie

E) Personen- und Güterverkehr auf der Straße (ab Seite LV).

A) Schienenpersonenverkehr

Es werden zwei Praxisbeispiele aus dem Stadtbahnbereich sowie zwei Forschungsvorhaben vorgestellt. Ergänzend können beispielhaft für aktuelle Forschungsvorhaben die Aktivitäten im Rahmen von Shift2Rail[517] (IP2 – TD8 Virtually coupled train sets) sowie das ANTS-Projekt von Siemens genannt werden, bei dem der Einsatz von autonomen Fahrzeugen untersucht wird[518].

Fahrerlose Stadtbahnsysteme (Streckenorientiertes CBTC)

Stellvertretend für bereits existierende fahrerlose Stadtbahnsysteme mit streckenorientiertem Zugüberwachungssystem wird das von Siemens für hochfrequentierte Strecken entwickelte System „Trainguard Sirius Communication-Based Train Control“ (CBTC) vorgestellt.

Als eine der weltweit ersten computergesteuerten U-Bahnen verkehrt die U-Bahn in Nürnberg seit 2008 fahrerlos[519]. Danach folgten Anwendungen unter anderem bei der U-Bahnlinie 1 in Algier[520] und bei der Istanbul Linie 1[521].

[517] Vgl. Shift2Rail (2017), S. 15.
[518] Vgl. Buhl (2016a), S. 7.
[519] Vgl. Buhl (2016b), S. 20.
[520] Vgl. Siemens (2013b), S. 1.
[521] Weitere CBTC-Referenzen des Unternehmens Siemens können in Eickholt (2016), Folie 8 entnommen werden.

Weitere Beispiele für streckenseitige CBTC-Anwendungen sind vollautomatische Personentransportsysteme (People Mover), wie sie zum Beispiel am Flughafen in Frankfurt am Main[522] und in München[523] betrieben werden.

Das streckenorientierte CBTC ermöglicht eine fahrerlose und vollautomatisierte Zugsteuerung und -sicherung. Für den Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen und einem streckenseitig installierten Prozessor wird digitaler Datenfunk genutzt. Der Prozessor verwendet die von den Fahrzeugen zur Verfügung gestellten Positionsinformationen und die Informationen zum aktuellen Netzzustand, um daraus für jedes Fahrzeug Fahrberechtigungen (LMA – Limit of movement authority) abzuleiten, deren Einhaltung unter anderem über die fahrzeugseitige Geschwindigkeitsbeobachtung überwacht wird. Zusätzlich wird die absolute Position der Fahrzeuge über eine im Gleis verlegte Signalleitung abgeglichen. Dank dieser digitalen Funkübertragungstechnik verkehren die Fahrzeuge im virtuell beweglichen Blockabstand.[524].

Fahrerlose Stadtbahnsysteme (Zugorientiertes CBTC)

Das URBALIS Fluence-System der Firma Alstom, das bei der Metro Lille zur Anwendung kommt[525], ermöglicht, einen fahrerlosen Metrobetrieb, wie er auch im vorherigen Beispiel vorgestellt wurde. Im Unterschied zum Trainguard Sirius CBTC handelt es sich hierbei jedoch um eine zugorientierte CBTC-Lösung, die eine erhöhte fahrzeugseitige Intelligenz und eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation umfasst[526] (vgl. Abbildung 10-2).

[522] Vgl. Bombardier Transportation (ohne Angabe).
[523] Vgl. Bombardier Transportation (2016).
[524] Vgl. Siemens (2013a), S. 2f.
[525] Vgl. Alstom (2013a), S. 1.
[526] Vgl. Alstom (2016), S. 1.

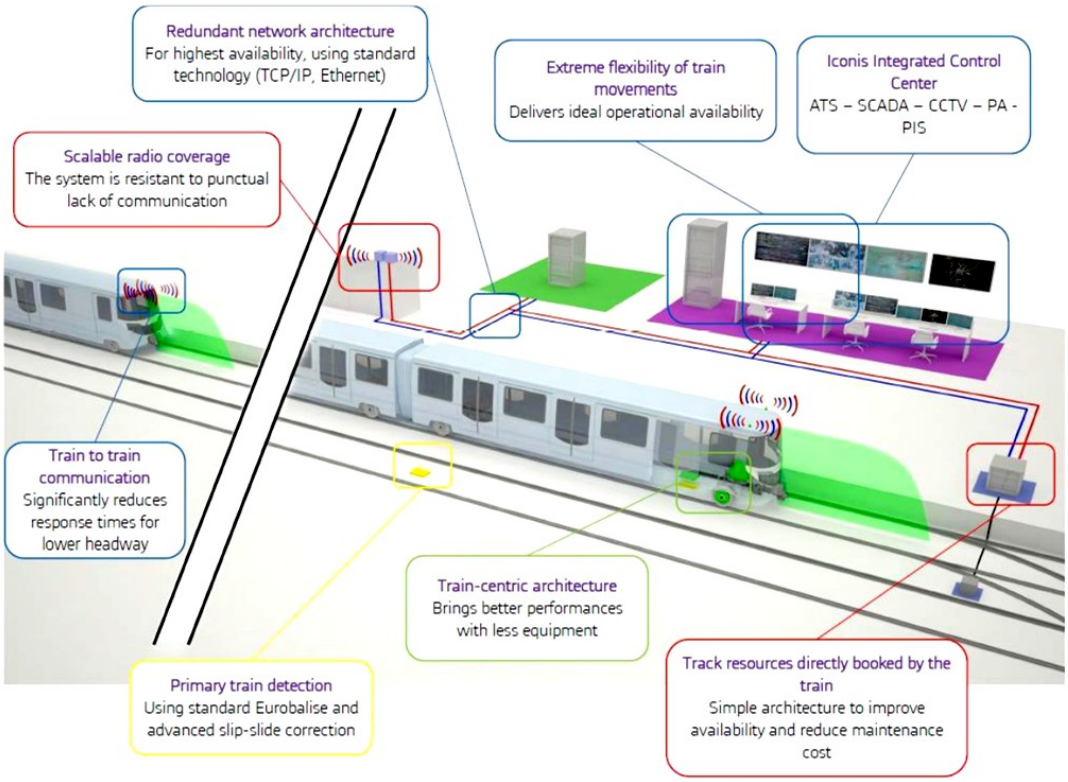


Abbildung 10-2 Überblick Urbalis Fluence
Quelle: Alstom (2016), S. 2

Über ein redundantes Funkkommunikationssystem[527] erhält der Zug die Fahrfreigabe von dem automatischen Zugbeeinflussungssystem (ATS) sowie Informationen zur aktuellen Streckenbelegung von anderen Zügen und zur Steuerungsinfrastruktur[528]. Hieraus berechnet der Zug das Ende seiner Fahrberechtigung sowie die benötigten Gleisressourcen, bucht diese bei der Steuerungsinfrastruktur und gibt sie wieder frei (vgl. Abbildung 10-3). Die Steuerungsinfrastruktur sperrt die mobilen Gleisressourcen und protokolliert die einzelnen Buchungen.[529] Durch Einbeziehung der verfügbaren Gleisressourcen und der Positionen anderer Züge kann der Zug seine Fahrberechtigung im Vergleich zu der vom ATS erhaltenen Fahrberechtigung erweitern[530]. Dadurch werden Zugintervalle von bis zu 60 Zügen pro Stunde möglich[531].

[527] Vgl. Alstom (2013b), S. 8.
[528] Vgl. Denis, Sanner (2015), Folie 7 und Folie 9.
[529] Vgl. Gralla (2016b), Folie 14.
[530] Vgl. Denis, Sanner (2015), Folie 13.
[531] Vgl. Gralla (2016b), Folie 10.

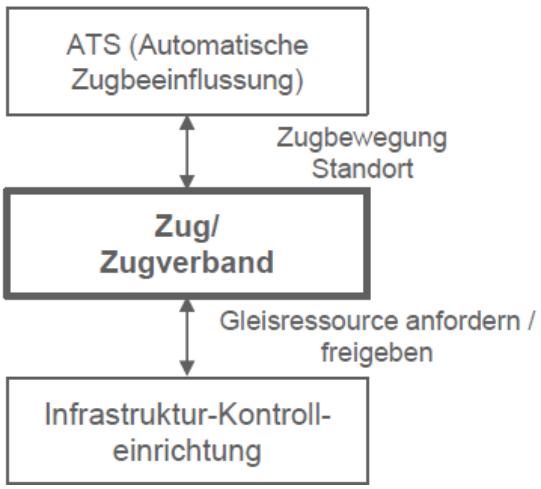


Abbildung 10-3 Zugorientiertes CBTC-System
Quelle: Gralla (2016b), Folie 11

Neue Bahntechnik Paderborn

Das Forschungsprojekt „Neue Bahntechnik Paderborn“ startete 1998 an der Universität Paderborn[532]. Basis bilden kleine autonom fahrende „RailCabs“, die Güter oder Personen zielrein, ohne Zwischenstropp, befördern[533]. Die ohne Fahrplan verkehrenden Fahrzeuge koppeln, zu jedem betrieblich möglichen Zeitpunkt untereinander berührungslos und ausschließlich informationstechnisch[534].

Die RailCabs erhalten keine Soll-Positionen, sondern regeln ihre Position direkt in Abhängigkeit zu anderen Konvoifahrzeugen (Vehicle-Follower-Prinzip). Ihre Steuerung erfolgt dezentral und umfasst die selbstständige Planung und Durchführung der Fahrt. Die benötigten Sollwertvorgaben werden an Bord der Fahrzeuge berechnet. Die Regelungsstrategie erlaubt Abstände von unter einem Meter. Der Antrieb der Fahrzeuge erfolgt über einen Linearantrieb, der zwischen den Schienen verlegt ist[535].

Die notwendige Betriebsleittechnik besteht aus vier Komponenten und ist in Abbildung 10-4 dargestellt.

[532] Vgl. Henke et al. (2008), S. 1
[533] Vgl. Sander, Richard (2004), S. 40
[534] Vgl. Henke et al. (2007), S. 1 bis S. 5.
[535] Vgl. ebd., S. 2 bis S. 7.

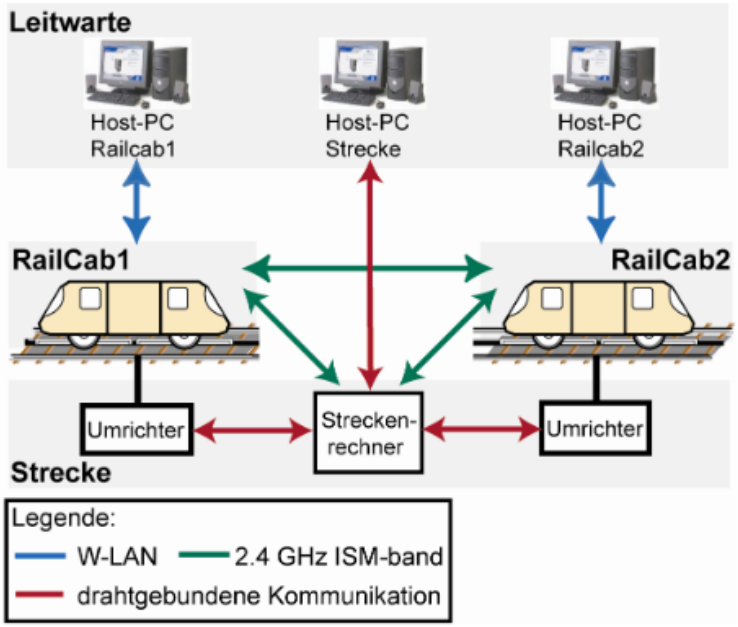


Abbildung 10-4 Betriebsleittechnik Neue Bahntechnik Paderborn
Quelle: Henke et al. (2007), S. 5

Das Sicherheitskonzept setzt sich aus einer zentralen Überwachung durch den Streckenrechner, einer dezentralen Überwachung in den einzelnen Fahrzeugen sowie aus den Messwerten einer Sensorik zur Umfelderkennung zusammen[536].

Die technische Realisierbarkeit der Systemkomponenten konnte 2003 auf einer 530 Meter langen Versuchsstrecke im Maßstab 1 zu 2,5[537] erfolgreich nachgewiesen werden[538]. Eine Markteinführung fand bisher unter anderem aufgrund der fehlenden Kompatibilität zum herkömmlichen Eisenbahnsystem nicht statt[539]. Mischverkehre mit vorhandenen Systemen sind aufgrund der von den RailCabs benötigten Energieversorgung und den vorgesehenen, passiven Weichen ausgeschlossen[540]. Inselbetriebe, wie Hafen- oder Flughafenverkehre, stellen daher die zu favorisierenden Anwendungsfelder dar[541].

[536] Vgl. Henke et al. (2007), S. 6.
[537] Vgl. Sander, Richard (2004), S. 40.
[538] Vgl. Henke et al. (2007), S. 3.
[539] Vgl. Schäfer (2007).
[540] Vgl. Dellmann, Berger (2006), S. 238.
[541] Vgl. Henke et al. (2007), S. 4.

Next Generation Train (NGT)

Das Forschungsprojekt Next Generation Train (NGT), das seit 2007 am DLR bearbeitet wird, hat zum Ziel, ein innovatives Triebwagenzugkonzept zu entwickeln, das vordergründig eine hohe betriebliche Flexibilität ermöglichen soll[542]. Ein wichtiger Baustein ist hierbei das „dynamische Flügeln", ein Verfahren bei dem die Züge während der Fahrt dynamisch gestärkt oder geschwächt werden können, ohne auf zusätzliche Streckeneinrichtungen zurückgreifen zu müssen[543]. Während der Fahrt als Zugverband sind die Triebfahrzeuge ausschließlich virtuell, informationstechnisch gekuppelt[544]. Die Fahrzeuge werden hierzu mit Sensorik zur Messung der absoluten und relativen Zustände ausgestattet. Zudem wird eine drahtlose Kommunikationsverbindung zwischen den zu kuppelnden Fahrzeugen aufgebaut, um fahrzeugspezifische Parameter auszutauschen, die nicht mit den Sensoren erfasst werden können, aber für die regelungstechnische Absicherung des Abstandes zwischen den Fahrzeugen notwendig sind.[545] Vorgesehen sind Fahrzeugabstände von wenigen Metern[546].

Über die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation werden die Fahrkommandos des Triebfahrzeugführers regelungstechnisch so vorgesteuert, dass das schwächste Fahrzeug maßgeblich für die Längsdynamik des Zugverbandes verantwortlich ist[547]. Für die Sicherung des Zuges soll das Prinzip des flexiblen Blockabstandes angewendet werden[548].

B) Schienengüterverkehr

Es werden ein, bereits in der Praxis zeitweise umgesetztes Beispiel aus dem Werksverkehr sowie ein Forschungsprojekt vorgestellt. Darüber hinaus stellen zum Beispiel das Projekt Cargo Sprinter sowie die Forschungsüberlegungen zum Traincoupling/Trainsharing-Konzept interessante Beispiele dar.

[542] Vgl. Winter (2011), S. 2.
[543] Vgl. Polisky (2016), S. 1.
[544] Vgl. Winter (2011), S. 2.
[545] Vgl. Polisky (2016), S. 1f.
[546] Vgl. Schumann (2017), S. 56.
[547] Vgl. Winter (2012a), S. 13.
[548] Vgl. Winter (2012b), S. 32.

Selbsttätig signalgesteuertes Triebfahrzeug (SST)

Im Rahmen des Projektes „Selbsttätig signalgesteuertes Triebfahrzeug (SST)“ wurde weltweit erstmalig das automatische Fahren bei Eisenbahnen erforscht[549]. Im Testbetrieb konnte hier die Tauglichkeit des automatischen Betriebs im SGV nachgewiesen werden[550]. Das entwickelte Triebfahrzeug fuhr vom September 1994 bis April 1996 im Versuchsbetrieb zwischen Aachen West und Aachen Hauptbahnhof[551] sowie 1996 im Inselbetrieb zwischen dem VW-Motorenwerk in Salzgitter und dem Montagewerk in Wolfsburg[552]. Die Fahrzeuge dienten den „just in time“-Transporten und wurden ohne Fahrplan und ohne zu rangieren, betrieben[553]. Die Fahrzeugführung erfolgte durch den Fahrzeugrechner, der aus der Verknüpfung von Fahrzeugposition, Rechnerfahrplan und erkannter Signalstellung die vom Fahrzeug einzuhaltende Sollgeschwindigkeit berechnete[554]. Die benötigten Informationen erhielt das Triebfahrzeug zunächst über den Bord-PC per Diskette, später über die Linienzugbeeinflussung und durch Funk[555]. Vorgesehen war ein „umgedrehtes Betriebsverfahren“, bei dem die Fahrzeuge an jedem Signal automatisch anhalten und nur bei der Signalstellung „Fahrt Frei“ den Bremsvorgang überbrücken[556].

Für den Informationsaustausch per Funk sollten die Fahrzeuge und Signale im Zielzustand mit Sender-Empfänger-Einrichtungen ausgerüstet werden. Da die Signalerkennung über Funk zum damaligen Zeitpunkt jedoch noch nicht zugelassen war, wurde im Gleis das induktive EUROLOOP-System zur Informationsübertragung verlegt. Zur Gewährleistung eines ausreichenden Sicherheitsniveaus wurden die Sollgeschwindigkeit und die Wegmessung doppelt übertragen und von zwei unabhängigen Rechnern der EUROLOOP-Fahrzeuggeräte ausgewertet, die bei Nichtübereinstimmung sofort eine Notbremsung auslösten.[557] Weiterhin konnte eine Notbremsung vom Fahrdienstleiter eingeleitet werden, indem er den streckenseitigen Sender-Empfänger-Einrichtungen eines Bereichs über einen

[549] Vgl. Polz, Beck (2000), S. 682.
[550] Vgl. Molle (1998), S. 446.
[551] Vgl. ebd., S. 445.
[552] Vgl. Grote (2000), S. 236.
[553] Vgl. Molle (1998), S. 443.
[554] Vgl. Dellmann, Berger (2006), S. 235.
[555] Vgl. Meisner, Werning (2016), S. 62.
[556] Vgl. Molle (1998), S. 443.
[557] Vgl. ebd., S. 443ff..

Schlüsselschalter den Strom entzog und so den ständigen Austausch der Telegramme zwischen Fahrzeug und Strecke unterbrach, was eine Notbremsung auslöste[558].

Der Versuchsbetrieb auf der genannten Teststrecke wurde erfolgreich durchgeführt und das behördliche Zulassungsverfahren für die SST-Streckenausrüstung und die SST-Fahrzeuge wurde im Frühjahr 1996 abgeschlossen. Das Zulassungsverfahren für den führerlosen SST-Betrieb wurde im Juni 1996 aufgenommen.[559] Die Sicherheitsnachweise und Risikoanalysen konnten jedoch nur ungenügend geführt werden[560], sodass keine Zulassung erteilt werden konnte[561] und der Feldversuch eingestellt wurde[562].

Verbundprojekt „FlexCargoRail“

Ziel des Projektes war es, den Einsatz von Güterwagen in Gleisanschlüssen deutlich zu flexibilisieren und damit die Herausforderung der letzten Meile zu lösen sowie die Leistungsfähigkeit des SGV zu verbessern[563]. Das Projekt baute unter anderem auf den Ergebnissen des „CargoMover“-Projektes auf[564], bei dem Güterwagen mittels eines eigenen Antriebs vollautomatisch[565] mit einer maximalen Geschwindigkeit von 80 km/h[566] für Werks-, Hafen- und Rangierverkehre eingesetzt werden sollten[567].

Das Verbundprojekt „FlexCargoRail“ sah eine Ausrüstung der Güterwagen mit einem elektrischen Antrieb, einem Energiespeicher und einem Empfänger für die Funksteuerung vor[568] (vgl. Abbildung 10-5).

[558] Vgl. Molle (1998), S. 445.
[559] Vgl. ebd., S. 445.
[560] Vgl. Meisner, Werning (2016), S. 62.
[561] Vgl. Grote (2000), S. 236.
[562] Vgl. Meisner, Werning (2016), S. 62.
[563] Vgl. Enning et al. (2009), S. 6 f.
[564] Vgl. Baier, Enning (2006), S. 29.
[565] Vgl. Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken (2003), S. 48.
[566] Vgl. Daniel (2007), S. 25.
[567] Vgl. Industrie- und Handelskammer Nürnberg für Mittelfranken (2003), S. 48.
[568] Vgl. Enning et al. (2009), S. 7.

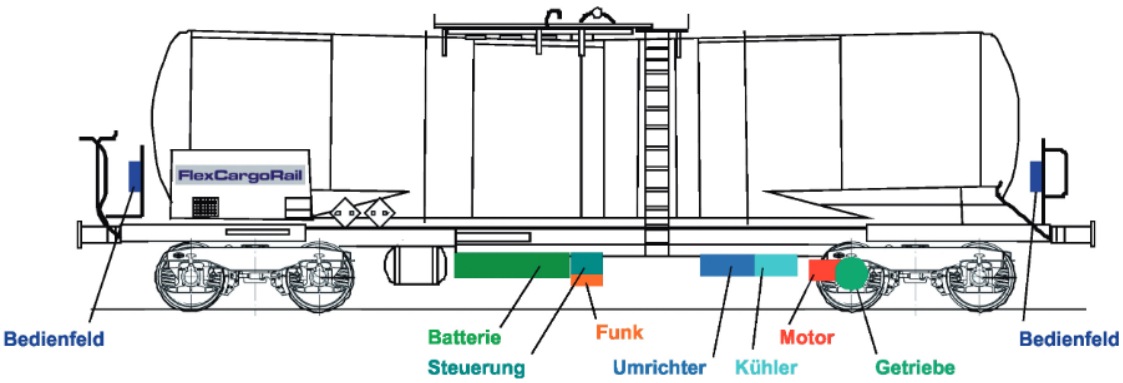


Abbildung 10-5 prinzipieller Aufbau eines FlexCargoRail-Nutzlastträgers
Quelle: Kochsiek (2009), S. 20

Während der Antrieb der Wagen im Hauptlauf die Traktionslokomotive stärken sollte, sollte er auf der letzten Meile genutzt werden, um die Wagen mittels Funkfernsteuerung manuell steuern zu können; entweder gruppenweise oder einzeln[569]. Die Höchstgeschwindigkeit bei Fernsteuerung sollte 25 km/h betragen. Als alternativer Kommunikationsweg wurde IWLAN (Industrial Wireless Local Area Network) in Betracht gezogen.[570] Die Technologie sollte auf Grundlage der nach EBO zugelassenen Lokomotiv-Funkfernsteuerung entwickelt werden[571], welche im Abschnitt C) vorgestellt wird. Im Rahmen des Projektes fand ausschließlich eine theoretische Betrachtung der grundsätzlichen Tauglichkeit statt, die durch Expertengespräche mit Komponentenherstelllern, Spediteuren und EVU ergänzt wurde[572]. Es konnte nachgewiesen werden, dass keine Grundlagenforschung und -entwicklung zur Automatisierung des SGV mehr notwendig ist, sondern die erforderlichen Komponenten bereits vorhanden sind und lediglich zu einem neuen innovativen Produkt neu konfiguriert werden müssen[573].

C) Rangierverkehr

Im Rangierverkehr sind funkbasierte Steuerungssysteme, die den Automatisierungsgrad des Betriebs erhöhen, getestet und teilweise bereits im täglichen Betrieb bewährt. Nachfolgend werden zwei Beispiele vorgestellt.

[569] Vgl. Enning et al. (2009), S. 7 und S. 10.
[570] Vgl. Kochsiek (2009), S. 22.
[571] Vgl. Enning et al. (2009), S. 42.
[572] Vgl. Kochsiek (2009), S. 21.
[573] Vgl. ebd., S. 26.

Automatisierter Abdrückbetrieb

Mit dem Ziel, einen fahrerlosen, ferngesteuerten Abdrückbetrieb zu ermöglichen, testete die Deutsche Bahn AG Anfang der 2000er Jahre auf dem Rangierbahnhof München-Nord eine rechner- und radargestützte Sensortechnik[574].

Die Funkfernsteuerung der Lokomotive war auf der gesamten Gleisanlage einsetzbar und wurde vom, im Stellwerk installierten Lokfunk-Fernsteuerungsrechner aus gesteuert[575]. Unter Berücksichtigung der Gleisparameter, der Laufwege und der Ablaufeigenschaften wurde zu Beginn des Ablaufbetriebs für jeden Ablaufvorgang die maximal zulässige Abdrückgeschwindigkeit berechnet, kontinuierlich an die Lokomotive übermittelt und von dieser automatisiert für die einzelnen Wagen umgesetzt[576]. Hierbei setzte die Rangierlokomotive ohne Fahrer automatisiert vor dem Ablaufberg an die Wagenzüge an. Der Abstandssensor, der unterhalb der Pufferbohle der Rangierlokomotive installiert wurde, sendete in Fahrtrichtung einen Radarstrahl, der von dem vor der Lok stehenden Güterwaggon reflektiert wurde. Der Bordrechner der Lok berechnete aus den empfangenen, reflektierten Daten die Geschwindigkeit, mit welcher weitergefahren werden konnte, um präzise am Waggon anzusetzen und diesen über den Ablaufberg zu schieben.[577]

Im Jahr 2016 griff die Deutsche Bahn das Projekt wieder auf und erprobt seit 2017 auf dem Rangierbahnhof München-Nord einen vollautomatischen Abdrückbetrieb inklusive Hinderniserkennung. Der Rollout in allen relevanten Zugbildungs-anlagen ist für 2019/2020 geplant.[578]

Lokomotiv-Funkfernsteuerung

Funkfernsteuerungen bei Lokomotiven haben sich in den vergangenen Jahren aus technischer und betrieblicher Sicht bewährt[579]. Bereits 2004 wurden etwa 90 Prozent der Rangierverkehre in den DB Cargo Zentren mit funkferngesteuerten Lokomotiven erbracht. Eingesetzt wird die Funkfernsteuerung bei Rangierverkehren mit Rangier- oder Kleinlokomotiven.[580] Der Lokrangierführer steuert die Lokomotiven über ein

[574] Vgl. Grote (2000), S. 233.
[575] Vgl. ebd., S. 233.
[576] Vgl. Siemens (2012), S. 7.
[577] Vgl. Grote (2000), S. 233.
[578] Vgl. Page (2016), Folie 12.
[579] Vgl. Kellmeyer, Homeyer (2013), S. 51.
[580] Vgl. Kellmeyer (2004), S. 103f.

Fernsteuerbediengerät von einem beliebigen Punkt des Rangiergeländes[581]. Hierzu wird zwischen dem Steuerbediengerät und der Funklokomotive eine Funkverbindung aufgebaut, über welche die erforderlichen Steuerbefehle übertragen werden – sofern notwendig, auch mehrere Befehle gleichzeitig. Eine Funkübertragung von der Lokomotive zum Bediengerät ist in der Regel nicht vorgesehen.[582] Die im Rahmen der Bremsprobe durchzuführenden Funktionen Füllen, Anlegen, Lösen und Angleichen können mit dem Bediengerät ausgelöst werden. Die Dichtheit der Bremse ist im Führerraum zu prüfen.[583] Das Bediengerät ist mit einem Neigungswinkel ausgerüstet: Bei Dienstunfähigkeit und Neigung des Gerätes von mehr als 50 Prozent aus der Vertikalen, wird eine Schnellbremsung ausgelöst und die Antriebsleistung unterbrochen[584].

Der Führerraum der Lokomotive bleibt während der gesamten Steuerung unbesetzt[585]. Bei rangierbetrieblichen Erfordernissen ist eine Steuerung mittels Bedienpult am Führertisch im Führerraum möglich[586]. Es ist zu gewährleisten, dass der Lokrangierführer den Fahrweg und die Signale während des Rangierens beobachten kann und sich zur Feststellung und Überwachung der ausgegebenen Fernsteuerungsbefehle in Sichtkontakt zur Lokomotive befindet[587] (optische Rückkopplung[588]). Zur Kennzeichnung, dass eine Lokomotive mittels Funk gesteuert wird, werden weiß leuchtende Sichtmelder an der Lokomotive verwendet[589].

D) Verfahren zur Zugfolgesicherung

Mit der Entwicklung von GSM-R wurden die technischen Voraussetzungen geschaffen, um die Zugfolgesicherung auf die neue Basis einer funkbasierten Abstandshaltung zu heben[590]. Nachfolgend werden zwei Beispiele sowie ein weiteres funkbasiertes Zugfolgesicherungssystem vorgestellt.

[581] Vgl. Kellmeyer (2004), S. 103.
[582] Vgl. Kellmeyer, Homeyer (2013), S. 52.
[583] Vgl. Kellmeyer (2004), S. 104.
[584] Vgl. George (2006), S. 72.
[585] Vgl. Kellmeyer (2004), S. 104.
[586] Vgl. Kellmeyer, Homeyer (2013), S. 51.
[587] Vgl. Kellmeyer (2004), S. 103f.
[588] Vgl. Kellmeyer, Homeyer (2013), S. 55.
[589] Vgl. ebd., S. 52.
[590] Vgl. Pachl (2008), S. 93.

ETCS, ab Level 2

Das ETCS (European Train Control System) ist Bestandteil des europäisch abgestimmten Betriebsleitsystems und besteht im Wesentlichen aus vier technischen Komponenten: Euroradio, Eurobalise, Euroloop und Eurocab. Das Euroradio bildet die Basis der Funkzugbeeinflussung und ist ein standardisiertes Übertragungsverfahren für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Streckenzentrale über GSM-R. Im Gleis installierte Eurobalisen dienen je nach Ausbaustufe der signalunabhängigen oder -abhängigen, punktförmigen Datenübertragung; sowohl vom Fahrzeug zur Infrastruktur als auch von der Streckeneinrichtung zum Fahrzeug. Zur Aufwertung dieser Daten können seitlich im Gleis Kabelantennen verlegt werden, die eine linienförmige Datenübertragung ermöglichen (Euroloop).[591] Der als Eurocab bezeichnete Bordcomputer vergleicht die gefahrene Geschwindigkeit mit der übermittelten zulässigen Höchstgeschwindigkeit und bremst den Zug gegebenenfalls automatisch ab.

Ab ETCS Level 2 werden die Daten zur kontinuierlichen Berechnung der maximalen Höchstgeschwindigkeit per GSM-R übermittelt.[592] Die Züge werden über Eurobalisen geortet und mittels einer Funkzugbeeinflussung geführt. Zur Gleisfreimeldung werden konventionelle Systeme (Gleisstromkreise, Achszähler) verwendet (vgl. Abbildung 10-6). [593]

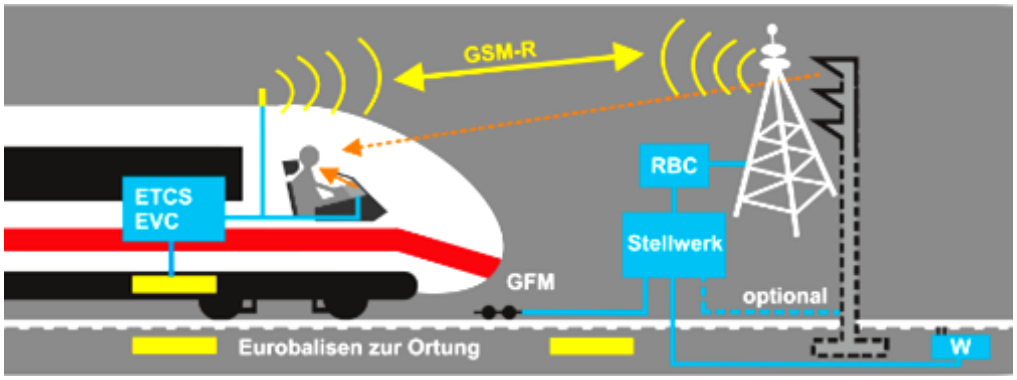


Abbildung 10-6 ETCS-Level 2
Quelle: Trinckauf (2015), Folie 36

ETCS Level 3 funktioniert analog zu Level 2, jedoch wird auf Streckensignale und ortsfeste Einrichtungen zur Gleisfreimeldung vollständig verzichtet. Für die

[591] Vgl. Pachl (2008), S. 89.
[592] Vgl. Europäische Kommission (2005a), S. 1.
[593] Vgl. Pachl (2008), S. 91.

Zugortung werden wie bei Level 2 Eurobalisen eingesetzt.[594] Die Feststellung der Zugintegrität erfolgt fahrzeugseitig über die ETCS-Fahrzeugeinrichtung[595] (vgl. Abbildung 10-7). Die Fahrzeuge fahren nicht mehr im festen Raumabstand, sondern im mobilen Blockabstand[596]. Die Einteilung der Strecke in feste Blockabschnitte ist dadurch nicht mehr nötig[597].

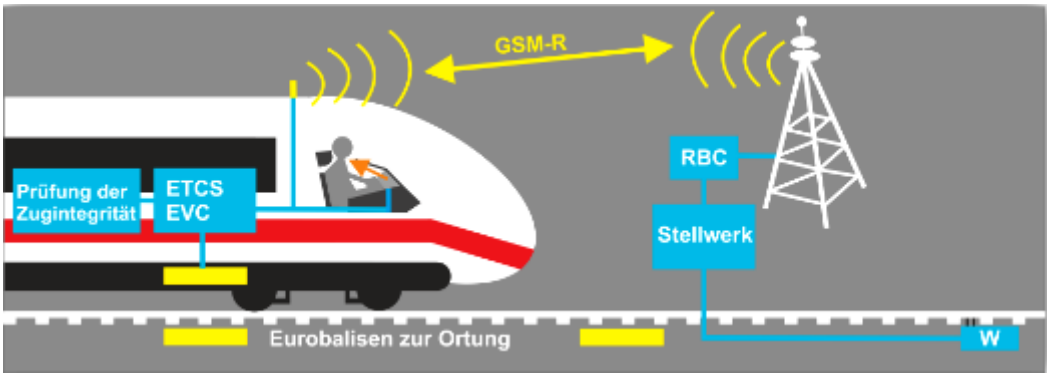


Abbildung 10-7 ETCS-Level 3
Quelle: Trinckauf (2016), Folie 37

Die Mitgliedstaaten der EU sind nach den Richtlinien 96/48/EG und 2001/16/EG dazu verpflichtet, ETCS auf dem transeuropäischen Eisenbahnnetz einzuführen[598]. In Deutschland werden hierbei die ETCS-Projekte VDE 8.1/8.2 und der Korridor A priorisiert behandelt[599]. Umgesetzt ist ETCS Level 2 durchgängig auf der Strecke Nürnberg-Erfurt-Leipzig/Halle (VDE 8.1/8.2) seit Dezember 2017[600].

ATO over ETCS

Eine erweitere Anwendung von ETCS stellt die Verbindung mit der, in vielen Metroanwendungen bewährten ATO-Funktionalität (Automatic Train Operation) dar[601], die 2018 erstmalig im Londoner Metrobetrieb (Projekt Thameslink) umgesetzt werden wird[602]. Im Kernbereich der Strecke, welche mit ETCS 2 ausgerüstet ist, wird hier zusätzlich ein automatisierter Bahnbetrieb realisiert[603]. Das ETCS arbeitet im Mode Full Supervision und gewährleistet die Sicherung der Zugbewegung und via GSM-R die Fahrzeug-Strecken-Kommunikation für das ETCS-System selbst und für

[594] Vgl. Pachl (2008), S. 91.
[595] Vgl. DB Netz (2014a), S. 8.
[596] Vgl. Technische Universität Berlin (2005), Folie 23.
[597] Vgl. DB Netz (2014a), S. 8.
[598] Vgl. ebd., S. 4.
[599] Vgl. ebd., S. 10.
[600] Vgl. DB Netz (2016), S. 3.
[601] Vgl. Pelz, Dickgießer (2015), S. 39.
[602] Vgl. Pelz (2016), Folie 16.
[603] Vgl. Pelz, Dickgießer (2015), S. 37.

die Kommunikation zwischen fahrzeugseitigem ATO und streckenseitigem ATS (Automatic Train Supervision). Für den automatisierten Betrieb sendet das ATO Nachrichten an das ATS, das mit allen für die Fahrt erforderlichen Informationen antwortet[604] (vgl. Abbildung 10-8).

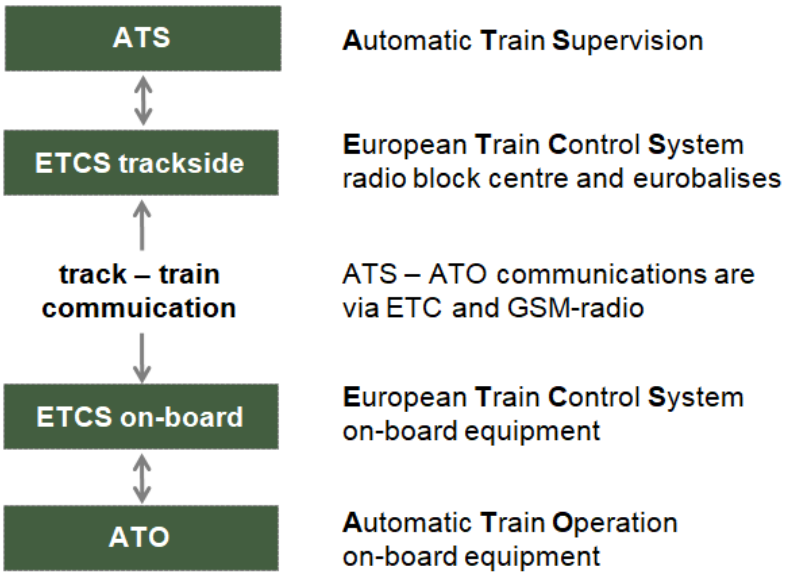


Abbildung 10-8 Systemaufbau ATO over ETCS
Quelle: eigene Darstelllung in Anlehnung an Pelz, Dickgießer (2015), S. 37

Das ATO-System übernimmt die Traktions- und Bremsteuerung des Fahrzeugs, steuert den Zug automatisiert zum nächsten betrieblich festgelegten Halt und öffnet nach dem Stillstand die Türen. Der Triebfahrzeugführer verantwortet die Abfertigung der Fahrgäste und das Türschließen.[605]

Funkbasierter Fahrbetrieb (FFB)

Der FFB ist ein funkbasiertes Zugüberwachungssystem, das im Auftrag der DB AG von DaimlerChrysler Rail Systems (Signal) ab Mitte der 1990er Jahre speziell für die Betriebsbedingungen von Regionalstrecken technisch erarbeitet wurde[606]. Pilotversuche wurden auf der Regionalstrecke zwischen Osnabrück und Brackwede (Projekt „Haller Willem“ zur Expo 2000) durchgeführt[607]. Geplant waren zudem Versuche zwischen Kaiserslautern und Lauterecken-Grumbach (Lautertalbahn),

[604] Vgl. Pelz, Dickgießer (2015), S. 37.
[605] Vgl. ebd., S. 37.
[606] Vgl. Schäfer, Pauli (2000), S. 23.
[607] Vgl. Kraftschik, Wiesenthal (2001), S. 2 f.

welche jedoch aufgrund von zu großen Verzögerungen und Problemen nicht umgesetzt wurden[608]. Eine Realisierung im täglichen Betrieb fand nicht statt[609].

Wesentlicher Unterschied zu ETCS ist, dass Fahrwegelemente, wie Weichen und Bahnübergänge, direkt vom Fahrzeug aus per Funk angesprochen und gesteuert werden[610]. Die FFB-Zentrale ist für die Netzverwaltung zuständig und verantwortet die Sicherung der Zugfolge, die Zuweisung des Fahrwegs und die Zugdisposition. Zudem erhält die FFB-Zentrale per Funk Informationen über den Status der Fahrwegelemente (vgl. Abbildung 10-9). [611]

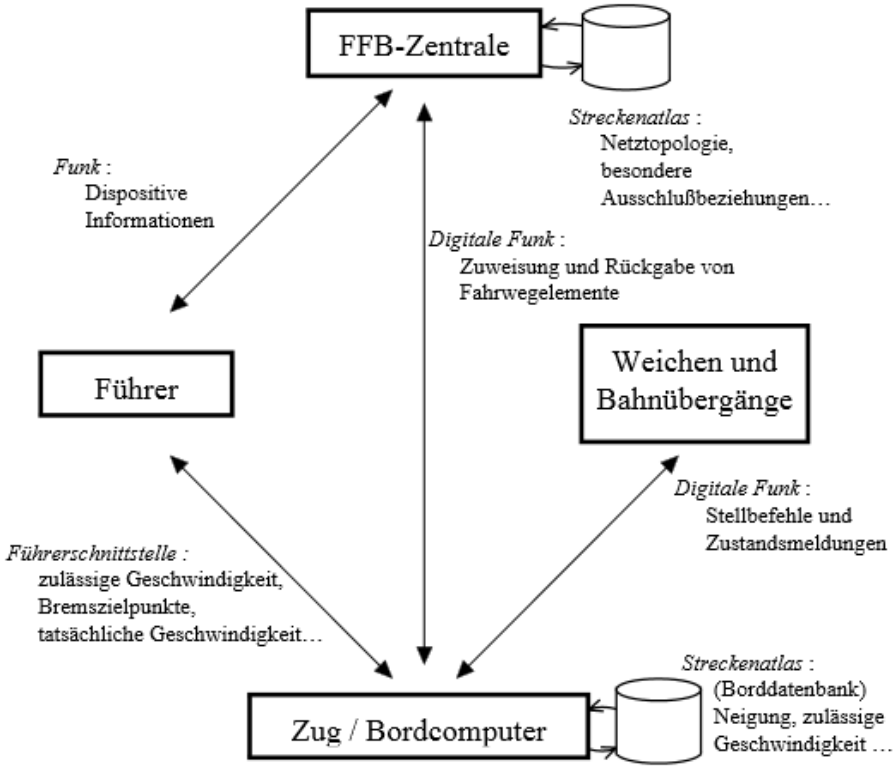


Abbildung 10-9 Datenflüsse innerhalb eines FFB-Systems
Quelle: Taïani (1998) S. 19

Die Züge stellen selbst sicher, dass sie den ihnen zugewiesenen Fahrweg nicht überschreiten. Die Bordrechner der Züge erhalten hierzu von der FFB-Zentrale per GSM-R Funktelegramme mit der Information, einen bestimmten Teil des Schienennetzes benutzen zu dürfen[612]. Kryptografische Verfahren ermöglichen eine abhör- und verfälschungssichere Verschlüsselung der Daten und gewährleisten damit

[608] Vgl. eurailpress (2001).
[609] Vgl. Pachl (2008), S. 93.
[610] Vgl. Bock (2001), S. 12.
[611] Vgl. Grimm et al. (2005), S. 5.
[612] Vgl. Taïani (1998) S. 17.

die signaltechnische Sicherheit[613]. Gewährleistet ist zudem, dass sich die Fahrzeuge eigenständig über Balisen oder GPS und in Verbindung mit dem Odometer orten können[614] und jeder auf der Strecke verkehrende Zug selbstständig seine Vollständigkeit (Integrität) überprüfen kann[615].

E) Personen- und Güterverkehr auf der Straße

1996 wurde das erste umfassende Beispiel eines autonom fahrenden Kraftfahrzeugs vorgestellt[616]. Seitdem fanden zahlreiche Forschungen zur Automatisierung des Straßenverkehrs statt. Nachfolgend werden zwei bereits abgeschlossene Forschungsprojekte sowie allgemein die aktuellen Entwicklungen automatisiert fahrender Personen- und Lastkraftwagen vorgestellt. Erwähnt sei zudem das von der Europäischen Union geförderte Projekt City Mobil 2, im Rahmen dessen Testbetriebe kleiner vollautonomer Fahrzeuge in verschiedenen Städten in ganz Europa durchgeführt werden[617].

Promote Chauffeur II (Elektronische Deichsel)

In Fortsetzung von CHAUFFEUR I, beschäftigte sich das von der Europäischen Union von 2000 bis 2003 geförderte Projekt mit der Kolonnenbildung von Lastkraftwagen (Lkw)[618], wobei der Fokus vorrangig auf die technische Machbarkeit gelegt wurde[619]. Betrachtet wurde ein führendes, konventionell fahrendes Fahrzeug, dem ein zweites Fahrzeug führerlos, automatisiert mit einem Abstand von sechs bis zwölf Metern direkt folgte[620]. Für die bidirektionale Kommunikation der Fahrzeuge wurde ein 5,8 GHz-Netz mit integriertem Fehlermanagement verwendet. Die Überprüfung des Abstands erfolgte anhand der Daten aus der Infrarot-Bildverarbeitung, den Sensordaten des Fahrzeugs zu dessen Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie auf Basis der Sensordaten des führenden Fahrzeugs.[621]. Die optische Kopplung der Lkw, welche sich hier auf eine Abstandsregelung beschränkt,

[613] Vgl. Zilch et al. (2002) S. 7-65.
[614] Vgl. Grimm et al. (2005), S. 5.
[615] Vgl. Bock (2001), S. 12.
[616] Vgl. Dellmann, Berger (2006), S. 234.
[617] Vgl. Sinner et al. (2017), S. 30.
[618] Vgl. Europäische Kommission (2005b).
[619] Vgl. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge (ohne Angabe).
[620] Vgl. Bonnet (2003), Folie 2.
[621] Vgl. ebd., Folie 13 und Folie 15.

wurde ausschließlich über die Daten der Infrarot-Bildverarbeitung zum vorausfahrenden Lkw gesteuert[622].

KONVOI

Das KONVOI-Projekt setzte unter anderem an den Ergebnissen des Projektes Promote Chauffeur II an und wurde im Zeitraum zwischen 2005 und 2009 bearbeitet. Im Fokus der Forschung lagen die Wirkungsanalyse (Fahrerakzeptanz, Verkehrsfluss, Umwelt) sowie rechtliche und ökonomische Implikationen eines Platoon Systems.[623] Auch hier war eine manuelle Bedienung des führenden LKW vorgesehen, während die hinteren bis zu drei Fahrzeuge mit einem Abstand von jeweils zehn Metern optisch gekuppelt automatisiert folgen[624].

Der wesentliche Unterschied der beiden Projekte liegt im Kommunikationskonzept: Während die Fahrzeuge beim Promote Chauffeur II-Projekt die Daten ausschließlich untereinander austauschen (Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation), sieht das KONVOI-Konzept einen zusätzlichen Datenaustausch per UMTS mit einem streckenseitigen zentralen KONVOI-Server vor[625] (Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation, vgl. Abbildung 10-10). Weiterhin wurden die Fahrzeuge mit einer Mono-Kamera sowie einem Lidar- und Radarsensor ausgestattet[626]. Die Kommunikation der LKW untereinander erfolgte mittels 2,4 Ghz Breitband-Technologie. Das System regulierte und steuerte die Längs- und Querausrichtung der Fahrzeuge untereinander.[627]

[622] Vgl. Bonnet (2003), Folie 17.
[623] Vgl. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge (ohne Angabe).
[624] Vgl. Zlocki (2012), Folie 8.
[625] Vgl. ebd., Folie 9.
[626] Vgl. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge (ohne Angabe).
[627] Vgl. Zlocki (2012), Folie 8f.

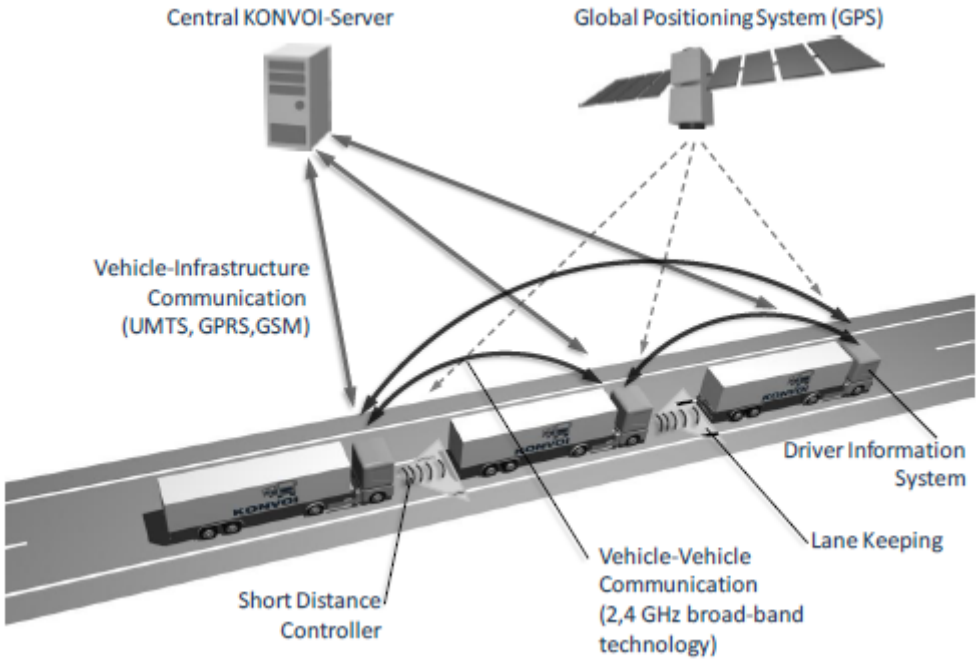


Abbildung 10-10 Prinzipdarstellung KONVOI
Quelle: Zlocki (2012), Folie 8

2009 konnte weltweit erstmals ein Platoon bestehend aus vier schweren LKW über 3.100 km erfolgreich im Realverkehr getestet und damit nachgewiesen werden, dass ein sicherer Verkehrsablauf mit Platoons grundsätzlich möglich ist[628].

Hochautomatisierte Personen- und Lastkraftwagen

Derzeit existieren im Straßenverkehr zahlreiche Aktivitäten zur Erhöhung der Verkehrsautomatisierung. Zunächst sind jedoch nur vereinzelte Anwendungsfälle im öffentlichen Straßenpersonenverkehr vorstellbar, wie zum Beispiel Depotanwendungen und Bus Rapid Transit Systeme mit einer Trassierung, die vom restlichen Straßenverkehr unabhängig ist[629]. Die technischen Voraussetzungen für das hochautomatisierte Fahren sind dabei weit vorangeschritten. In verschiedenen Ländern, darunter Deutschland und die USA wird das hochautomatisierte Fahren erfolgreich erprobt[630].

Hochautomatisierte Fahrzeuge erfassen über eigene Sensorik und IT-Dienste Daten zu ihrem Umfeld und wählen selbstständig Fahrtrouten und Fahrstile, die zum Beispiel ihre Energieeffizienz verbessern[631]. Voraussetzungen für die Einführung der

[628] Vgl. RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge (ohne Angabe).
[629] Vgl. Schnieder (2014), S. 97.
[630] Vgl. Meyer, Martin (2014), S. 2.
[631] Vgl. ebd., S. 1.

bereits verfügbaren Technologie sind unter anderem eine rechtlich bindende Klärung von Haftungsfragen, eine erhöhte gesellschaftliche Akzeptanz und das Anpassen relevanter Vorschriften[632]. In den USA wurden die gesetzlichen Rahmenbedingungen bereits weiterentwickelt, sodass in mehreren Bundesstaaten das hochautomatisierte Fahren seit 2015 möglich ist. In Japan wird mit der Markteinführung ab spätestens 2020 gerechnet.[633] In Europa wurden erste Schritte hin zum automatisierten Fahren insbesondere 2014 mit dem Vorschlag zur Ergänzung des Wiener Übereinkommens über den Straßenverkehr sichtbar[634]. Darauf reagierend stimmte der Deutsche Bundesrat im Mai 2017 dem Gesetz zum automatisierten Fahren (Änderung des Straßenverkehrsgesetzes) zu. Kern bildet die rechtliche Gleichstellung von menschlichem Fahrer und Computer, welche die Basis für hoch- und vollautomatisierte Fahrsysteme legt.[635]. Die deutsche Bundesregierung geht davon aus, dass das autonome, fahrerlose Fahren bis 2030 etabliert sein wird[636] und setzt sich dafür ein, hierfür notwendige Rahmenbedingungen und erforderliche Voraussetzungen zu schaffen. Die Initiierung des „Runden Tisch Automatisiertes Fahren“ im Jahr 2013, an dem Wirtschaft, Wissenschaft, Verbände und Verwaltung mitwirken, ist hierfür ein Beispiel.[637] Zwischenzeitlich wurden unter anderem ein umfassender Bericht über notwendige Forschungsbedarfe veröffentlicht[638] und strategische Eckpunkte für das weitere Vorgehen erarbeitet, welche für die Weiterentwicklung der nationalen Strategie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Etablierung des automatisierten Fahren verwendet werden[639].

[632] Vgl. Girardet et al. (2014), S. 18.
[633] Vgl. Meyer, Martin (2014), S. 2.
[634] Vgl. Bundesrat (2016), S. 1.
[635] Vgl. BMVI (2017).
[636] Vgl. Everding, Fürstenau (2016), S. 58.
[637] Vgl. BMVI (ohne Angabe).
[638] Vgl. BMVI (2015), S.2.
[639] Vgl. acatech (2015), S. 27.

Anhang 3 Eintrittswahrscheinlichkeiten im Beispielszenario

Nachfolgend werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Einflussparameter näher erläutert, welche im Beispielszenario zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit der virtuellen Kupplung mittels NOWS-Verfahren herangezogen werden und in Tabelle 6-9 zusammengefasst sind.

a) Beschaffungskosten des Moduls

Im Rahmen des NOWS-Verfahrens soll untersucht werden, ob die Einführung einer virtuellen Kupplung wirtschaftlich vertretbar ist. Dies impliziert, dass die Beschaffungskosten des Moduls eintreten werden.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Beschaffungskosten wird als hoch eingestuft.

b) Mehrkosten Neufahrzeug

Es ist davon auszugehen, dass mit der Einführung der virtuellen Kupplung für die Schienenfahrzeughersteller Aufwände entstehen, welche den Preis der Neufahrzeuge erhöhen (zum Beispiel Forschung und Entwicklung zur Anpassung vorhandener Fahrzeugkonzepte oder Umsetzung der Anpassung der Fahrzeugkonzepte).

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Mehrkosten für Neufahrzeuge wird als hoch eingestuft.

c) Umrüstungskosten für Bestandsfahrzeuge

Im deutschen SPNV existieren vornehmlich gemischte Fahrzeugflotten, bestehend aus Neu- und Bestandsfahrzeugen. Da der Nutzen der virtuellen Kupplung steigt, je mehr Fahrzeuge der Flotte mit ihr ausgerüstet sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch Bestandsfahrzeuge umgerüstet werden.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Umrüstungskosten wird als hoch eingestuft.

d) Schulungskosten

Die Einführung der virtuellen Kupplung stellt neue Anforderungen an das Personal, welches mit den virtuell zu kuppelnden Fahrzeugen in Berührung kommt (zum Beispiel Triebfahrzeugführer und Wartungsmitarbeiter). Es ist daher davon auszugehen, dass ein Teil des Personals im sachgerechten Umgang mit der virtuellen Kupplung zu schulen ist. Weiterhin entstehen aufgrund der höheren Flexibilität in

der Fahrzeugdisposition für die Triebfahrzeugführer Schulungskosten aufgrund zu vermittelnder Fahrzeug- und Streckenkunde.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Schulungskosten wird als hoch eingestuft.

e) Umrüstungskosten für EVU-Leitstelle

Wie in Abschnitt 4.7 dargestellt, sind für die Umsetzung der virtuellen Kupplung verschiedene Anpassungen an der EVU-Leitstelle vorzunehmen.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Umrüstungskosten für die EVU-Leitstelle wird als hoch eingestuft.

f) Erhöhte Instandhaltungskosten

Da die virtuelle Kupplung einen, für den Vollbahnbereich neuen technologischen Ansatz darstellt, ist davon auszugehen, dass die Wartungs- und Instandhaltungszyklen deutlich enger ausfallen als bei der konventionellen Kupplung. Entsprechend höher fallen die Instandhaltungskosten aus.

Zudem zeigen Erfahrungen aus der Vergangenheit, dass sich die Anforderungen an Schienenfahrzeuge stetig weiterentwickeln. Hierbei sind regulatorische Faktoren ebenso relevant, wie Datensicherheitsanforderungen und Kundenerwartungen. Um die nachhaltige Funktionsfähigkeit des Moduls aufrechtzuerhalten, ist es daher notwendig, im Rahmen der Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten regelmäßig Software-Aktualisierungen vorzunehmen.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit erhöhter Instandhaltungskosten wird als hoch eingestuft.

g) Erhöhte Versicherungsprämie

Betriebshaftpflichtversicherungen haben den Anspruch, die Beiträge möglichst gerecht zu erheben. Entsprechend werden Nutzer von etablierten, risikoärmeren Technologien gegenüber einen Nutzer neuer, risikoreicherer Technologien günstiger gestellt.

Dem steht entgegen, dass ein Fahrzeug nur dann in Betrieb genommen werden kann, wenn im Rahmen der Zulassung dessen sicherer Betrieb nachgewiesen, das von ihm ausgehende Risiko also als tolerierbar klein eingestuft wurde.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer erhöhten Versicherungsprämie wird als mittel eingestuft.

h) Verringerung der Fahrzeugbeschaffungskosten

Die mit der virtuellen Kupplung ermöglichte Durchtauschbarkeit der Fahrzeuge führt zu einer Verkleinerung der betrieblichen Reserveflotte, da nicht mehr baureihenspezifisch, sondern über die gesamte Fahrzeugflotte geplant werden kann. Es werden weniger Fahrzeuge für den Betrieb der gleichen Verkehrsleistung benötigt.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Verringerung der Fahrzeugbeschaffungskosten wird als hoch eingestuft.

i) Entfallene Kosten der konventionellen Kupplung

Wie oben dargestellt, wird angenommen, dass die virtuelle Kupplung die konventionelle Kupplung ersetzen soll. Entsprechend fallen für neue und mit der virtuellen Kupplung ausgestattete Triebfahrzeuge keine Kosten für die konventionelle Kupplung an. Vom Vorhandensein einer Notkupplung zum Abschleppen der Fahrzeuge wird ausgegangen.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die entfallenen Kosten der konventionellen Kupplung wird als hoch eingestuft.

j) Verringerung der Personal- und Energiekosten (Betriebskosten)

Die Durchtauschbarkeit der Flotte ermöglicht anstelle einer baureihenoptimierten, eine fahrzeugflottenoptimierte Umlaufplanung. Es ist damit davon auszugehen, dass die Produktivität der Fahrzeugflotte grundsätzlich erhöht werden kann, da weniger Fahrzeuge und damit auch weniger Personal für die Erbringung der gleichen Betriebsleistung benötigt werden. Da jedoch davon ausgegangen wird, dass mittels der Optimierung die Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge reduziert werden kann, ist unklar, inwieweit darüber hinaus noch Einsparungen möglich sind.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die Verringerung der Personal- und Energiekosten (Betriebskosten) wird als mittel eingestuft.

k) Fahrgelderlöse aus Fahrzeugdisposition

Dieser Nutzen tritt insbesondere in Regionen auf, in denen die Fahrzeuge an ihren Auslastungsgrenzen betrieben werden. Dank der virtuellen Kupplung kann bei kurz-, mittel- oder längerfristig anhaltendem erhöhtem Fahrgastaufkommen EVU-seitig mit zusätzlichen Fahrzeugen reagiert, woraus erhöhte Fahrgelderlöse resultieren. Es ist davon auszugehen, dass während der Vertragslaufzeit betriebliche Situationen auftreten, die bei Beauftragung der Verkehre nicht eingeplant waren. Vorstellbar sind zum Beispiel saisonbedingte Änderungen (Ski- oder Radverkehre) und Großveranstaltungen (Messen, Sportveranstaltungen, Konzerte).

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Fahrgelderlösen aus verbesserter Fahrzeugdisposition wird als hoch eingestuft.

l) Erlöse aus Fahrzeugverleih

Die Betrachtung der Vergangenheit zeigt, dass im SPNV häufiger Situationen eintraten, in denen EVU über einen bestimmten Zeitraum Fahrzeugengpässe auflösen mussten. Sind Fahrzeugflotten dank der virtuellen Kupplung beliebig betrieblich kuppelbar, besteht die Möglichkeit, Fahrzeuge EVU-übergreifend einzusetzen und dafür als vermietendes EVU ein Entgelt zu erheben.

Da die Größe der Reserveflotte jedoch in erster Linie an den Anforderungen des eigenen Bedarfes zur Erfüllung der bestellten Verkehrsleistung ausgelegt wird, ist davon auszugehen, dass Triebfahrzeuge nur im Einzelfall zeitweise verliehen werden können. Außerdem ist die netzübergreifende, infrastrukturelle Kompatibilität und die Kompatibilität in Bezug auf die Anforderungen der Aufgabenträger nur sehr begrenzt gegeben[640]. Deshalb werden die EVU-übergreifende Einsatzmöglichkeit und damit auch die Nachfrage nach Fahrzeugen vergleichsweise gering ausfallen.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Erlösen aus Fahrzeugverleih wird als gering eingestuft.

[640] Vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2.

m) Fahrgelderlöse aus Imagegewinn

Untersuchungen haben gezeigt, dass Fahrzeugänderungen, welche für den Fahrgast direkt positiv erlebbar sind, zu einer Erhöhung des Fahrgastaufkommens führen[641]. Die Einführung der virtuellen Kupplung stellt solch eine direkt erlebbare Änderung dar, da für die Fahrgäste die Anzahl an notwendigen Umstiegen zur Erreichung ihres Reiseziels sinkt.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Fahrgelderlösen aus Imagegewinn wird als hoch eingestuft.

n) Einsparungen bei der Fahrzeugfinanzierung

Dank der virtuellen Kupplung besteht für die Triebfahrzeuge nach Ablauf des ersten Verkehrsvertrages für dessen Erfüllung sie beschafft wurden, eine erhöhte Wahrscheinlichkeit auf Wiedereinsatz. Diese erhöhte Flexibilität in der Fahrzeugdisposition stabilisiert die Fahrzeugrestwerte mit positiven Effekten auf die Finanzierungsbedingungen. Gleichzeitig gibt es jedoch eine große Marktmacht der Finanzierungsgeber. Darüber hinaus bestehen Einschränkungen bei den Fahrzeugeinsatzmöglichkeiten, die auf die eingeschränkte infrastrukturelle Kompatibilität und eingeschränkte Kompatibilität in Bezug auf die Anforderungen der Aufgabenträger zurückzuführen sind[642].

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit von verbesserten Finanzierungsbedingungen wird als mittel eingestuft.

o) Erhöhte Gewinne beim Fahrzeugverkauf

Wie auch beim Nutzenparameter zuvor, steht hier die, durch die virtuelle Kupplung erhöhte technische Kompatibilität zweier Fahrzeuge den vorhandenen infrastrukturellen und aufgabenträgerspezifischen Einschränkungen gegenüber.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit erhöhter Gewinne beim Fahrzeugverkauf wird als mittel eingestuft.

[641] Vgl. BAG-SPNV (ohne Angabe).
[642] Vgl. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2.

p) Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen

Die virtuelle Kupplung kann dazu beitragen, den Fahrplan zu stabilisieren und mittelfristige Fahrzeugausfälle zu reduzieren. Aufgrund der zahlreichen möglichen Störgrößen im Fahrzeugbetrieb ist jedoch schwer abschätzbar, ob es allein dadurch insgesamt tatsächlich zu einem pünktlicheren Betrieb kommt.

→ Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Senkung des Pünktlichkeits-Malus und der Fahrgast-Entschädigungen wird als mittel eingestuft.