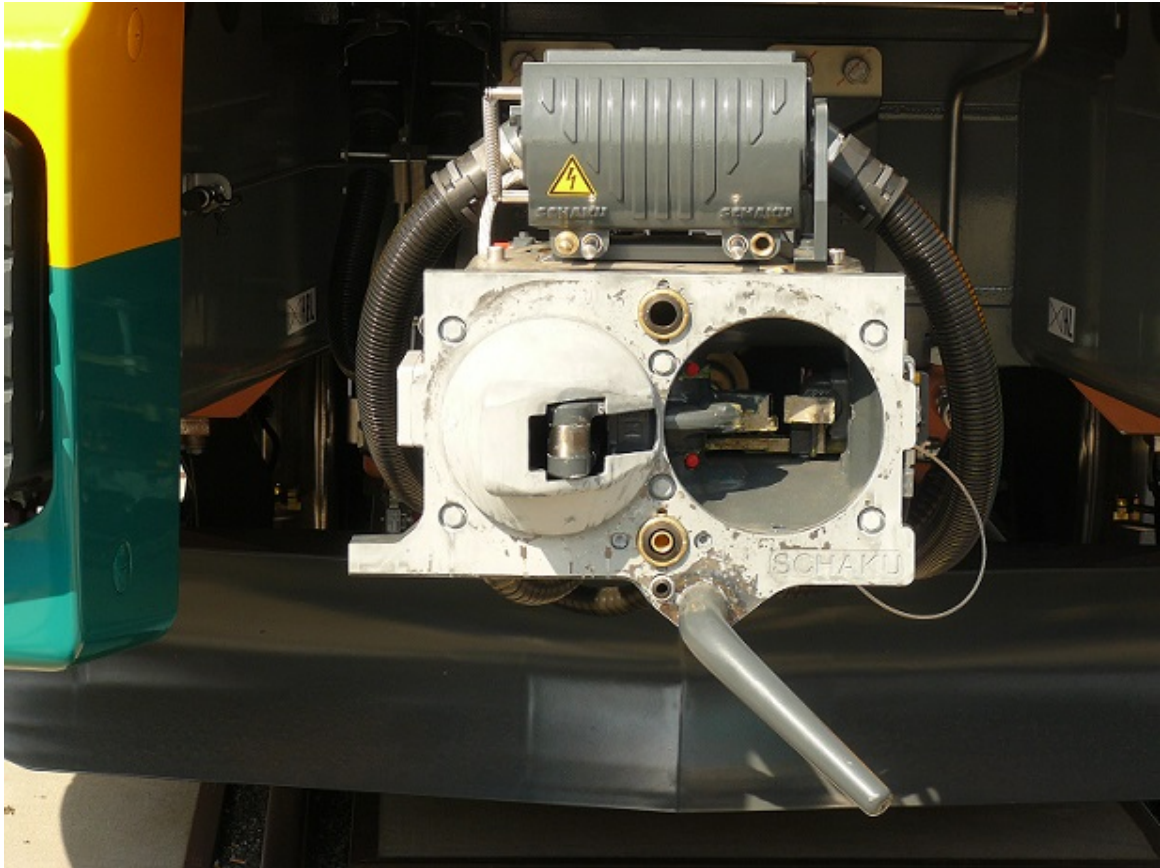




Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 34 (2022)

Kuppelbarkeit von Nahverkehrstriebwagen und -zügen



Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Bericht 34 (2022)
Projektnummer 2021-18-S-1202

Kuppelbarkeit von Nahverkehrstriebwagen und -zügen

von

Dipl.-Ing. Sebastian Skorsetz
Professur für Schienenfahrzeugtechnik (IMA), Universität Stuttgart

Michael Mönsters, M. Sc., Dr.-Ing. Christian Meirich
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrssystemtechnik,
Braunschweig

im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Universität Stuttgart
Professur für Schienenfahrzeugtechnik am Institut für Maschinenelemente
Pfaffenwaldring 9
70569 Stuttgart

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Verkehrssystemtechnik – Design und Bewertung von Mobilitätssystemen: Bahnbetrieb
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig

J. M. Voith SE & Co. KG | VTA (Assoziierter Partner)
Gottfried-Linke-Straße 205
38239 Salzgitter

ABSCHLUSS DER STUDIE

März 2022

REDAKTION

DZSF

Dr.-Ing. Martin Kache, Forschungsbereich Wirtschaftlichkeit
Zaki Kebdani, Forschungsbereich Sicherheit

BILDNACHWEIS

Universität Stuttgart, Professur für Schienenfahrzeugtechnik / S. 16, 17, 22, 23, 24, 26, 43
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) / S. 30, 33, 52, 55, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 75
J. M. Voith SE & Co. KG | VTA / S. 11, 12, 14
Deutsche Bahn AG / S. 11

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

[doi: 10.48755/dzsf.230002.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.230002.01)

Dresden, Januar 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	7
Kurzbeschreibung	9
1 Einleitung	11
2 Vergleichende Betrachtung von Fahrzeugkupplungen	12
2.1 Vorbemerkungen.....	12
2.2 Regelwerke und Normen.....	12
2.3 Wissenschaftliche Arbeiten.....	13
2.4 Recherche zu Fahrzeugkupplungen.....	14
2.5 Aufbau der Scharfenbergkupplungen Typ 10.....	15
2.6 Gründe für Diversitäten.....	18
3 Kombinationsmöglichkeiten und Kupplungskompatibilität des heutigen Fahrzeugbestands	22
3.1 Kupplungskompatibilität	22
3.2 Betriebliche Randbedingungen für eine Multikuppelbarkeit.....	27
4 Betriebliche Gesichtspunkte und Fahrzeugeinsatz	29
4.1 Einführung.....	29
4.2 Betriebliche Nachteile ohne Multikuppelbarkeit.....	29
4.3 Betriebliche Potenziale der Multikuppelbarkeit	31
4.4 Herausforderungen für die Nutzung der Multikuppelbarkeit	33
5 Handlungsempfehlungen für die Beseitigung von Defiziten	37
5.1 Beseitigung administrativer Hemmnisse	37
5.1.1 Analyse von Verkehrsausschreibungen.....	37
5.1.2 Lösungsvorschläge	40
5.2 Beseitigung technischer Hemmnisse.....	41
5.2.1 Kategorisierung der Funktionen	41
5.2.2 Vorschlag für die Gestaltung der Schnittstelle E-Kupplung	42
5.3 Allgemeine Handlungsempfehlungen.....	45
6 Auswirkungen einer universalen Kuppelbarkeit auf Einsatz und Betrieb	47
6.1 Vorbemerkungen.....	47
6.2 Methodik.....	47
6.2.1 Vorgehensweise	47

6.2.2	Auswahl geeigneter Parameter zur Untersuchung der betrieblichen Auswirkungen.....	48
6.2.3	Konstruktiver Ansatz.....	50
6.2.4	Analytischer Ansatz.....	50
6.3	Definition und Beschreibung des Untersuchungsraums.....	52
6.4	Auswirkungen einer MKB auf den Betrieb	55
6.4.1	Untersuchung von definierten Anwendungsfällen	55
6.4.2	Linienbündelung/Durchbindung im Knoten (Szenario 1).....	56
6.4.3	Vereinigung vor dem Knoten (Szenario 2).....	61
6.4.4	Kupplung BEMU mit EMU (Szenario 3).....	68
6.4.5	Kupplung BEMU mit EMU (Szenario 4).....	73
6.5	Auswirkungen einer MKB auf Fahrzeugeinsatz und Umlaufplanung.....	74
7	Zusammenfassung.....	77
7.1	Zusammenfassung zu technischen Aspekten.....	77
7.2	Zusammenfassung zu betrieblichen Aspekten.....	79
7.3	Fazit zur Einführung einer MKB.....	81
	Abbildungsverzeichnis.....	82
	Tabellenverzeichnis	83
	Schlüssel der zitierten Experteninterviews.....	84
	Quellenverzeichnis.....	85
	Anhang.....	90

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselspannung)
AP	Arbeitspaket
BEG	Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH, München
BEMU	Battery Electric Multiple Unit (Batterieelektrischer Triebzug)
BR	Baureihe
BSB	Breisgau-S-Bahn GmbH
bspw.	beispielsweise
CAN	Controller Area Network
CFL	Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois (staatliche Eisenbahngesellschaft Luxemburgs)
DAK	Digitale Automatische Kupplung
DB	Deutsche Bahn AG, Berlin
DC	Direct Current (Gleichspannung)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMU	Diesel Multiple Unit (Dieseltriebzug)
D-Takt	Deutschlandtakt 2030
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EBW	Eisenbahnbetriebswissenschaft
ECTS	European Train Control System (Europäisches Zugsicherungssystem)
EMU	Electric Multiple Unit (Elektrotriebzug)
EN	Europäische Norm
ERA	Europäische Eisenbahnagentur
ERATV	European Register of Authorised Types of Vehicles (Europäisches Eisenbahnfahrzeugregister)
etc.	et cetera
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FIS	Fahrgastinformationssystem
FLIRT	Flinker Leichter Intercity- und Regional-Triebzug (Produktname einer Bauart von Elektrotriebzügen der Firma Stadler)
FMZ	Frequenz-Multiplexe Zugsteuerung
ggf.	gegebenenfalls
Hbf	Hauptbahnhof
HL	Hauptluftleitung
HBL	Hauptluftbehälterleitung
HGV	Hochgeschwindigkeitsverkehr
HVZ	Hauptverkehrszeit
IBIS	Integriertes Bordinformationssystem
i. d. R.	in der Regel
IEC	International Electrotechnical Commission

inkl.	inklusive
KISS	Komfortabler Innovativer Spurtstarker S-Bahn-Zug (Produktname einer Bauart von Elektrotriebzügen der Firma Stadler)
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LINT	Leichter Innovativer Nahverkehrs-Triebwagen (Markenname einer Bauart von Triebzügen der Firma Alstom)
LoS	Level of Service (Leistungsniveau)
LUKS	Leistungsuntersuchungen für Knoten und Strecken
MKB	Multikuppelbarkeit
NBÜ	Notbremsüberbrückung
o. g.	oben genannt / oben genannte / oben genannter / oben genanntes / oben genannten / oben genanntem
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen-Holding AG, Wien
OSB	Ortenau-S-Bahn
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RB	Regionalbahn
RE	Regional-Express
RMV	Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH, Hofheim am Taunus
SchaKu	Scharfenbergkupplung
SFBW	Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg (Anstalt öffentlichen Rechts), Stuttgart
SGV	Schienengüterverkehr
SIL	Safety Integrity Level (Sicherheitsanforderungsstufe)
SO	Schienenoberkante
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
STRELE	STREckenLEistungsfähigkeit - Formel zur analytischen Berechnung der Streckenleistungsfähigkeit
TCN	Train Communication Network
TSI	Technische Spezifikation für Interoperabilität
u. a.	unter anderem
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer (Internationaler Eisenbahnverband), Paris
usw.	und so weiter
v_{\max}	Höchstgeschwindigkeit in km/h
WEG	Württembergische Eisenbahn-Gesellschaft mbH
WTB	Wire Train Bus
XEMU	X-Electric Multiple Unit (Elektrischer Triebwagen mit lokal emissionsfreiem Antrieb)
z. B.	zum Beispiel
ZDS	Zeitmultiplexe Doppelsteuerung
ZMS	Zeitmultiplexe Mehrfachtraktionssteuerung
ZWS	Zeitmultiplexe Wendezugsteuerung

Kurzbeschreibung

In diesem Projekt wurde die Kuppelbarkeit von Nahverkehrstriebzügen hinsichtlich technischer und betrieblicher Aspekte untersucht. Die technischen Aspekte wurden anhand einer durchgeführten Recherche zu den bundesweit betriebenen Triebzügen betrachtet. Dabei wurden die verbauten Kupplungen, sie betreffende Standards und wissenschaftliche Arbeiten analysiert. Es existiert nur eine geringe Anzahl an Literatur, die sich mit dieser Thematik auseinandersetzt, daher wurden ergänzende Interviews mit Expertinnen und Experten durchgeführt und die Diversitäten herausgearbeitet. Es zeigte sich, dass der aktuelle Fahrzeugbestand hinsichtlich der verbauten Kupplungen sehr inhomogen ist. Zwar besitzt ein Großteil der Fahrzeuge die Scharfenbergkupplung (SchaKu) Typ 10 zur mechanischen und pneumatischen Kupplung, aber die E-Kupplungen und die Leittechnik sind durch die fehlende Normung deutlich verschieden aufgebaut, sodass die Fahrzeuge baureihenübergreifend i. d. R. nicht kuppelbar sind. Hierzu wurden auch Detailanalysen von ausgewählten Stromlaufplänen durchgeführt.

Die technischen Gründe für die Diversitäten können im Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit, Technik und Administration verortet werden. Wirtschaftliche Aspekte betreffen eine kostspielige Herstellung einer (herstellerübergreifenden) universellen Kuppelbarkeit, technische Aspekte die fehlende Normung der Schnittstelle sowie administrative Aspekte die derzeitige Fahrzeugbeschaffungspraxis.

Ferner wurde analysiert, welche Fahrzeuge des heutigen Bestands miteinander in welchem Grade kuppelbar sind. Es zeigte sich, dass nur ein Bruchteil der Fahrzeuge betrieblich kuppelbar ist, zumeist innerhalb einer Baureihe eines EVU. Die Mehrzahl der Fahrzeuge ist mechanisch und pneumatisch kuppelbar, was zumindest im Abschleppfall hilfreich ist. Auch wurde betrachtet, welche Fahrzeuge hinsichtlich gegebener Infrastruktur miteinander sinnvoll betrieblich kuppelbar wären.

Aufbauend auf der Analyse der Defizite wurden aktuelle Fahrzeugausschreibungen recherchiert und analysiert. Es zeigte sich, dass je nach Ausschreibung nur sehr wenige Mindestanforderungen an die Fahrzeuge gestellt werden, die Freiraum bei der Ausgestaltung lassen. Hinzu kommt, dass es bundesweit kein einheitliches Lastenheft für die Fahrzeuggestaltung gibt. Es gibt lediglich Empfehlungen ohne bindenden Charakter.

Abschließend wurde eine Handlungsempfehlung erarbeitet, um die herausgestellten Defizite beseitigen zu können. Die Handlungsempfehlung umfasst die Beseitigung administrativer sowie technischer Hemmnisse und schließt mit einer allgemeinen Empfehlung. Die Beseitigung administrativer Hemmnisse umfasst u. a. die mangelnde Einheitlichkeit bei der Fahrzeugbeschaffung, die standardisiert erfolgen sollte. Zudem könnten Fahrzeuge losübergreifend beschafft werden, um einen kuppelbaren Fahrzeugpool zu bilden. Die Beseitigung technischer Hemmnisse umfasst u. a. die Erarbeitung eines Standards für die E-Kupplung und der zu übertragenden Funktionen. Die meisten Funktionen könnten über ausreichend sichere digitale Bussysteme zusammengefasst werden. Komfortfunktionen wie das FIS sollten lokal auf dem Fahrzeug ausgeführt werden und direkt mit der Zentrale kommunizieren. So ließe sich die Zahl der Kupplungskontakte reduzieren. Die Datenprotokolle sollten standardisiert werden, damit eine einheitliche Übertragung gewährleistet werden kann. Hierzu könnten Gateways die Schnittstelle zur Fahrzeugleittechnik bilden, um die Informationen zu übersetzen. Grundsätzlich sollte diese Thematik in Nachfolgeprojekten weiterverfolgt werden.

Für die Bewertung der betrieblichen Auswirkungen, Potenziale und zu überwindenden Hürden einer MKB wurden bahnbetriebliche Analysen auf Basis von fahrdynamischen Simulationen durchgeführt und durch die Anwendung von Fahrplankonstruktionsansätzen sowie durch die Anwendung der Analytik zur Ermittlung der Kapazitätsauswirkungen unterfüttert. Durch die Identifizierung eines geeigneten Untersuchungsgebiets sowie betrieblicher Anwendungsbeispiele konnten Auswirkungen primär auf die generelle Machbarkeit innerhalb des geplanten Deutschlandtaktes 2030 identifiziert werden. Zur Bemessung

der Auswirkungen wurden betriebliche Parameter z. B. in Form von Trassenauswirkungen und -verfügbarkeiten, Gleisbelegungen, theoretischen Leistungsfähigkeiten und zugehörigen Restleistungsfähigkeiten sowie des Fahrzeugbedarfs durch Umlaufverknüpfungen herangezogen.

Identifizierte betriebliche Nutzenaspekte bei Einführung einer MKB sind die Erhöhung der Zahl von Direktverbindungen aufgrund der Durchbindung einzelner Linien. Durch die MKB entsteht eine Erhöhung der Fahrgastkapazitäten, da mehrere Zugteile im Verbund verkehren und die zugehörigen Umstiege für die Reisenden entfallen. Ein großer betrieblicher Nutzen der MKB ist der Aspekt, dass unterschiedliche Fahrzeuge einander ersetzen können. In den Szenarien wurde das Augenmerk auf die Einsparung von möglichen Fahrplantrassen durch das Bündeln von Linien gelegt. Durch die untersuchte Fahrtenbündelung anstelle von zwei separaten SPNV-Zugfolgen unmittelbar hintereinander konnte eine Trasseneinsparung von einer Trasse pro Stunde und Richtung erreicht werden.

Bei der Bewertung des Fahrzeugbedarfs konnte durch eine exemplarische Berechnung der Reservefahrzeuge gezeigt werden, dass Einsparungen erreicht werden können, wenn die Fahrzeuge nicht nur linien-scharf vorgehalten, sondern universell in größeren Teilnetzbereichen eingesetzt werden können. Je nach Größe des Teilnetzes liegt die Einsparung zwischen einem und 4,8 Prozent.

Die größte identifizierte betriebliche Herausforderung stellt die Kuppelzeit innerhalb der Bahnhöfe und die damit verbundene Gleisbelegungszeit dar. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein Kupplungsvorgang an einem Bahnsteig des durchgehenden Hauptgleises durchgeführt werden muss. Die verlängerte Haltezeit hat eine unmittelbare negative Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit der anknüpfenden Strecke. Daher sind zusätzliche Bahnsteige oder Nebengleise für den Kupplungsvorgang vorzusehen, um eine Möglichkeit der Umfahrung und Überholung der Züge zu gewährleisten. Durch die verlängerte Haltezeit durch den Kupplungsvorgang ist daher zu überprüfen, ob insbesondere im Deutschlandtakt 2030 noch Fahrzeitreserven zwischen zwei Halten eingeplant werden können, um diese verlängerte Reisezeit auszugleichen.

1 Einleitung

Die Fahrzeugflotte des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) ist, deutschlandweit betrachtet, sehr inhomogen. Neben einer Vielzahl an lokbespannten Zügen verschiedenster Varianten werden heutzutage immer mehr Zugleistungen durch Triebzüge erbracht. Diese Triebzüge stammen von verschiedenen Herstellern und weisen unterschiedliche Baujahre auf. Durch die Regionalisierung sind die Länder und Regionen die Aufgabenträger, die die Schienenverkehrsleistungen in Netzen und Teillosen ausschreiben. In diesen Netzen und Teillosen fahren zumeist identische Fahrzeugtypen desselben Herstellers und Bauloses, die miteinander kuppelbar sind, um auf Nachfrageschwankungen reagieren zu können.

Sollen nun Fahrzeuge unterschiedlicher Netze oder Teillöse miteinander gekuppelt werden, um bspw. einen gemeinsamen Zulauf auf einen Knoten bzw. andere Flügelungskonzepte zu realisieren, scheitert das häufig an einer fehlenden Kompatibilität der Fahrzeuge untereinander. Zwar ist ein mechanisches Kuppeln oft noch möglich, da die meisten Triebzüge die Scharfenbergkupplung (SchaKu) Typ 10¹ mit ähnlicher Einbauhöhe besitzen. Bei der Übertragung der Druckluft können aber schon Unterschiede auftreten, da nicht alle Triebzüge eine Hauptluftleitung (HL) oder eine Hauptluftbehälterleitung (HBL) haben. Eine elektrische Verbindung scheidet in den meisten Fällen aus, da Triebzüge unterschiedlicher Hersteller, Baujahre und gar Baulose verschiedene Pinbelegungen an der Elektrokupplung oder Unterschiede in der Leittechnik (Software) aufweisen. Ein gekuppelter Betrieb dieser Fahrzeuge ist nicht möglich. Verkehrt bspw. in dem einen Netz ein Stadler FLIRT 3 und in dem anderen ein Bombardier Talent 2, so sind diese nicht kompatibel. Aber auch FLIRT-Triebzüge unterschiedlicher Baulose sind wegen verschiedener Softwarestände ggf. nicht betrieblich kuppelbar.

Bei der aktuellen energie- und klimapolitischen Diskussion mit dem Ziel einer Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene müssen mehr Kapazitäten geschaffen werden. Der Eisenbahninfrastruktur sind kapazitive Grenzen gesetzt, daher sollte die vorhandene Infrastruktur besser ausgenutzt werden. Hierfür bietet die Multikuppelbarkeit viele betriebliche, technische und organisatorische Vorteile, da die einzelnen Schienenfahrzeuge, die einen Knoten anfahren, u. a. auf gemeinsamen Streckenabschnitten gekuppelt fahren könnten und so Trassenkapazität für andere Züge schaffen.

Ziel dieses Projekts ist es, den aktuellen Stand von Kupplungen bei Nahverkehrstriebzügen strukturiert zu erfassen und die Ursachen und Defizite für eine nicht vorhandene Multikuppelbarkeit zu erarbeiten. Daraus sollen Handlungsempfehlungen erarbeitet werden, um eine Multikuppelbarkeit bei zukünftigen Fahrzeugen erzielen zu können. Ferner sollen anhand von Simulationsrechnungen die Potenziale einer Multikuppelbarkeit für den Eisenbahnbetrieb analysiert werden. Hierbei dienen unterschiedliche Szenarien als Ausgangslage der Beurteilung.

¹ Eine Beschreibung der Scharfenbergkupplung Typ 10 findet sich in Abschnitt 2.5 Aufbau der Scharfenbergkupplungen Typ 10.

2 Vergleichende Betrachtung von Fahrzeugkupplungen

2.1 Vorbemerkungen

Kapitel 2 befasst sich zunächst mit dem Status quo vorhandener Fahrzeugkupplungen. Dazu wurde eine Recherche zu eingesetzten Kupplungsarten, -typen, -unterbaugruppen sowie deren Derivaten und Einsatzzweck bei aktuell im Betrieb befindlichen Fahrzeugen durchgeführt. Ferner wurden bestehende Regelwerke, Normen und Vorschriften mit Bezug zu Fahrzeugkupplungen recherchiert und hinsichtlich Normungsdefiziten gesichtet. Schließlich wurden aus diesen Ergebnissen die Gründe für die Diversitäten im Kupplungsbereich analysiert.

2.2 Regelwerke und Normen

Beginnend mit einer Recherche zu Normen im Kupplungsbereich wurden die folgenden Datenbanken und Regelwerke bemüht:

- (1) Über Perinorm lassen sich nahezu alle Normen finden und sichten [1],
- (2) Auf den Seiten der UIC lassen sich UIC-Merkblätter auflisten [2],
- (3) Über die Europäische Eisenbahnagentur (ERA) bzw. das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) können die Technischen Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) abgerufen werden [3].

Von den recherchierten Normen und Regelwerken im Eisenbahnbereich behandeln die folgenden Regelwerke Themen mit Bezug zur Zug- und Stoßeinrichtung von Eisenbahnfahrzeugen:

- DIN EN 15020: Abschleppkupplung [4]
- DIN EN 15551: Puffer [5]
- DIN EN 15566: Zugeinrichtung und Schraubekupplung [6]
- DIN EN 16019: Automatische Mittelpufferkupplung [7] (genormt nur Scharfenbergkupplung Typ 10)
- TSI LOC&PAS [8]
- UIC 558: UIC-Kabel (13-polig) [9]
- UIC 568: UIC-Kabel (18-polig) [10]
- IRS 50558: UIC-Kabel (24-polig) [11]

Von diesen betreffen die Normen DIN EN 15020, DIN EN 15551, DIN EN 15566, DIN EN 16019 und die TSI LOC&PAS mechanische und pneumatische und die letztgenannten UIC-Merkblätter elektrische Vorgaben. Zusätzlich behandeln die folgenden Normen die Software(-Architektur) an Fahrzeugen:

- IEC 61375: Zug-Kommunikations-Netzwerk (TCN) / WTB [12] (vgl. UIC 556)
- DIN EN 50128: Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme [13]

Von diesen Regelwerken wurden die folgenden als für die Aufgabenstellung besonders relevant eingestuft und näher analysiert:

EN 16019: Genormt sind die Abmessungen des Kupplungskopfes der Scharfenbergkupplung (SchaKu) Typ 10 sowie die Einbauposition und die Dimensionen der Anschlüsse der Luftleitungen (Hauptluftleitung, HL und Hauptluftbehälterleitung, HBL). Nicht genormt ist die Einbauhöhe der Kupplung selbst, sodass hier Variationen möglich sind.²

TSI LOC&PAS: Vorgegeben ist, dass im Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) eine SchaKu Typ 10 als Fahrzeugkupplung zu verwenden ist. Die Einbauhöhe ist auf 1025 mm + 15 mm / – 5 mm festgelegt. Nicht genormt ist jedoch eine Verwendung von Mittelpufferkupplungen im Schienenpersonennahverkehr (SPNV).

UIC 558 / UIC 568 / IRS 50558: Die Aderbelegungen der UIC-Kabel sind definiert. Allerdings finden sich national unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten, die über die definierten Aderbelegungen hinausgehen.

IEC 61375: Diese Norm definiert die Datenkommunikation innerhalb der Züge und zwischen den Wagen hinsichtlich einer Softwarearchitektur. Allerdings ist die Kommunikation von Zug zu Zug nicht eindeutig vorgegeben und auch die eigentliche Programmierung der Leittechnik ist nicht genormt.

EN 50128: Hier werden Rahmenanforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Software gestellt. Es werden aber keine Datenprotokolle oder eine Softwarearchitektur vorgegeben.

Es kann zusammengefasst werden, dass die Schnittstelle zwischen den Fahrzeugen **nur ansatzweise mechanisch und pneumatisch** genormt ist. Es ergeben sich hinsichtlich einer freien Kuppelbarkeit folgende **Defizite bei der Normung:**

- Einbauhöhe der SchaKu ist für SPNV nicht genormt.
- Aufbau und Bestückung der E-Kupplung der SchaKu sind nicht genormt.
- Aderbelegung der UIC-Kabel ist international nicht einheitlich.
- Auf Leittechnikenebene ist die genaue Ausführung der Fahrzeugsteuerung nicht genormt.

2.3 Wissenschaftliche Arbeiten

Eine Recherche zur tiefergehenden Thematik der Kuppelbarkeit ergab, dass dieses Thema sehr selten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen ist. Es finden sich nur wenige Veröffentlichungen zu Kupplungen im Nahverkehrsbereich und zur Kuppelbarkeit von Zügen. Lediglich die Dissertation von F. Rüsç [15] bietet einen guten Überblick über die Problematik einer nicht vorhandenen Kuppelbarkeit. Das Hauptproblem sei ihrer Ansicht nach die fehlende elektrische Kompatibilität der Fahrzeuge untereinander. Sie bietet als Lösungsansatz die virtuelle Kupplung an, also eine rein funkbasierte Kommunikation der Fahrzeuge untereinander ohne mechanische Verbindung [15]. Weitere Arbeiten betreffen ebenfalls die virtuelle Kupplung [16] oder die automatische Mittelpufferkupplung im Schienengüterverkehr (SGV) [17]. Im Rahmen der EU-Förderrichtlinie Shift2Rail liefen bereits Projekte unter dem Namen „CONNECTA“, die sich mit der Multikuppelbarkeit im Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV) befassen, da hier eine ähnliche Problematik hinsichtlich herstellerübergreifend nicht kuppelbarer Fahrzeuge besteht. Als Lösung werden eine mechanische Kupplung der Fahrzeuge und eine Kommunikation per Funk angestrebt [18].

² In der Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO) [14] sind zwar der „Berner Raum“ und die Einbauhöhe der Schraubenkupplung vorgegeben, allerdings nicht die der SchaKu. Deren Anbauhöhe liegt aber bei den betrachteten Fahrzeugen stets im zulässigen Bereich der Schraubenkupplung.

2.4 Recherche zu Fahrzeugkupplungen

Parallel zu der Recherche zu Normen und wissenschaftlichen Arbeiten wurden technische Daten, Kupplungsbauarten, Stückzahlen und Verbreitungsgebiete von Triebzügen in Deutschland recherchiert. Eine sehr gute Übersicht über die eingesetzten Fahrzeugtypen je Streckennetz in Deutschland bietet die SPNV-Karte des Bahn-Reports [19]. Damit lassen sich die pro Netz eingesetzten Fahrzeuge bestimmen, allerdings nicht deren Anzahl und ggf. Unterbauart. Ferner wurde für die Recherche eine Liste mit verschiedenen Rechercheportalen und Internetseiten erstellt, anhand der die meisten Fahrzeuge, Baureihen (BR) und gar Nummernbereiche ermittelt werden konnten. Diese Liste mit den enthaltenen Quellen wird als Anhang 2 dem Bericht beigelegt.

Eine sehr gute Datenquelle stellt die Eisenbahn-Community dar, die Änderungen im Fahrzeugbestand inkl. Fahrzeugnummern akribisch pflegt: Bei dem Internetportal drehzscheibe-online.de werden Neufahrzeuge nach EVU und Netz aktuell aufgelistet [20–22]. Anhand dieser Daten lassen sich Fahrzeuge, ihre Anzahl und Nummernbereiche für einzelne Vergabelose eindeutig zuordnen. Unter revisionsdaten.de findet sich der Lebenslauf praktisch jedes Fahrzeugs [23]. Technische Daten zu einzelnen Fahrzeugen bieten die Hersteller, aber auch die Internetpräsenzen von Schienenfahrzeugbetreibern. Quellenangaben dazu finden sich in der Tabelle zu technischen Daten der Fahrzeuge, die als Anhang 3 zu diesem Bericht dient.

Eine Gesamtübersicht mit den recherchierten Fahrzeugen je Streckennetz ist diesem Bericht beigelegt (Anlage 3). Diese enthält die Betreiber des Netzes, die betreffende Region (Bundesland), den Namen des Vergabernetzes, den dort (primär) eingesetzten Fahrzeugtyp sowie dessen (Unter-)Baureihe, ggf. spezielle Eigenschaften sowie – sofern in der Kürze der Zeit ermittelbar – die genaue Anzahl der dort verkehrenden Fahrzeuge. Letzteres war nicht für alle Netze ersichtlich, da einige Betreiber nur ihren Gesamtbestand an Fahrzeugen angeben, andere weisen die im jeweiligen Netz verkehrenden Fahrzeuge detailliert aus. Andere Betreiber wie die DB Regio AG geben keine Anzahl an, hier muss auf die o. g. Datenbanken bzw. auf Nr. [24] verwiesen werden. Anhand der Baureihe bzw. des Fahrzeugtyps kann dann auf die dort verbaute Kupplung rückgeschlossen werden.

Die Recherche ergab, dass aktuell deutschlandweit ca. 4.200 Triebzüge im SPNV unterwegs sind, siehe Anlage 3. Für manche Fahrzeuge, vornehmlich ältere Fahrzeuge wie die BR 628, konnte die genaue Stückzahl der sich noch in Betrieb befindlichen Fahrzeuge, die nicht die DB Regio AG betreibt, in der Kürze der Zeit nicht ermittelt werden. In der genannten Aufstellung nicht enthalten und von der weiteren Untersuchung ausgeklammert sind Hochflurfahrzeuge reiner S-Bahn-Netze wie in Berlin und Hamburg, aber auch Rhein-Ruhr, Stuttgart und München (BR 420, 422, 423, 430) sowie Regionalstadtbahnen (Karlsruhe, Kassel).

Von den recherchierten 4.200 Fahrzeugen besitzt die Mehrzahl (knapp 90 %) eine SchaKu Typ 10 gemäß DIN EN 16019 (Abbildung 1). Der zweithäufigste Kupplungstyp ist die Schraubekupplung, mit der mindestens 398 Fahrzeuge ausgestattet sind, vornehmlich die BR 628 und ein Großteil der Regio-Shuttle (BR 650). Diese sind mit Mittelpufferkupplungen nicht kuppelbar. Die aktuell ca. 200 Fahrzeuge der BR 612 (Neigetechkzüge) besitzen eine SchaKu vom Typ 330, die mit Typ 10 nicht kompatibel ist. Ebenso inkompatibel mit den genannten Kupplungstypen sind die 103 Regio-Shuttle der Südwestdeutschen Landesverkehrs-GmbH (SWEG) (Ortenau-S-Bahn, Hohenzollerische Landesbahn), die mit einer BSI-Kompaktkupplung ausgestattet sind.

Diese Fülle an vorhandenen Fahrzeugen mit ihrer Variantenvielfalt konnte im vorgegebenen Zeitrahmen nicht vollständig tiefergehend untersucht werden. Daher wurden im Folgenden ausgewählte Netze mit repräsentativem Charakter näher betrachtet und für die dort verkehrenden Fahrzeuge Detailinformatio-

nen hinsichtlich der Kupplungen ermittelt. Wegen des dichten Streckennetzes sowie vieler unterschiedlicher Betreiber und Fahrzeuge wurden die Großraumnetze Rhein/Ruhr und Rhein/Main mit dem Knoten Frankfurt Hauptbahnhof ausgewählt.

Die dort eingesetzten Fahrzeuge wurden entsprechend ihrer Nummernbereiche recherchiert und die Liste an die J. M. Voith SE & Co. KG, Salzgitter bzw. Kiel, übergeben. Voith konnte interne Unterlagen hinsichtlich der Bestückung der Elektrokupplung sichten und diese entsprechend angeben, sofern diese Daten vorhanden und nicht geheim sind. Diese Übersicht ist dem Bericht als Anhang 5 angehängt.

2.5 Aufbau der Scharfenbergkupplungen Typ 10

Der häufigste und damit wichtigste Kupplungstyp ist die Scharfenbergkupplung (SchaKu) Typ 10, die knapp 90 Prozent der Bestandsflotte von SPNV-Triebzügen inkl. sämtlicher Neubaufahrzeuge besitzen (siehe Anlage 3). Sie ist in der DIN EN 16019 bezüglich ihrer Abmessungen genormt. Abbildung 1 (links) zeigt diesen Kupplungstyp als komplettes Einbauteil in das Fahrzeug [25]. Zu sehen sind der Kupplungskopf mit der darüber befindlichen Elektrokupplung. Beide sind auf dem Kupplungsrohr montiert, das zugleich als Energieverzeherelement dient. Dieses mündet in die Aufhängung, die am Fahrzeugrahmen befestigt wird. Rechts ist in Abbildung 1 eine SchaKu Typ 10 im eingebauten Zustand zu sehen [26]. Zusätzlich sind die Funktionalitäten beschrieben. In der Mitte befindet sich der Kupplungskopf zur mechanischen Verbindung der Fahrzeuge. Der Kuppelvorgang wird bei Annäherung eines zweiten Fahrzeugs durch die kalottenförmig ausgeführte Feinzentriereinrichtung vorbereitet. Die beiden zu verbindenden Kupplungen werden mithilfe dieser zentriert und können danach verbunden werden. Die in beiden Kupplungen vorhandene Kuppel- und Feinzentriereinrichtung verriegelt dabei mit dem Gegenüber, die Fahrzeuge sind mechanisch verbunden. Zug- und Stoßkräfte können übertragen werden. Gleichzeitig wird die Luftkupplung hergestellt. Diese erfolgt automatisch mit dem mechanischen Kuppelvorgang. Der HL-Anschluss befindet sich stets oberhalb und der der HBL unterhalb der Kuppel- und Zentriereinrichtung. Ebenso werden parallel zu den mechanischen und pneumatischen die elektrischen Kupplungen verbunden. Die E-Kupplungen (Kontaktkupplungen) können oberhalb oder seitlich der mechanischen Kupplung angeordnet sein (siehe Abbildung 1) und enthalten elektrische Kontakte (Pins) zur Übertragung der für den Betrieb notwendigen Signale. Diese Kupplungen selbst und ihre Platzierung sind nicht genormt und von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp verschieden. Unterhalb des Kupplungskopfes ist noch ein Greifer vorhanden, um die Kupplung manuell ausrichten zu können.

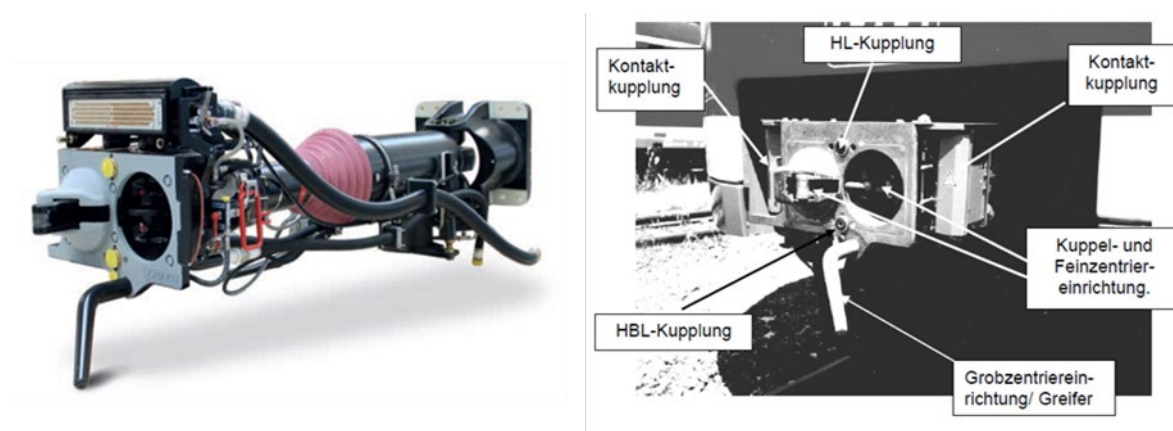


Abbildung 1: Scharfenbergkupplung Typ 10

Die Ausführung der Elektrokupplung (E-Kupplung) ist nicht standardisiert. Sie variiert hinsichtlich

- des Anbauortes (oberhalb oder seitlich des Kupplungskopfes),
- der Baugröße (Dimension),
- der Bestückung mit Pinkkontakten sowie
- der softwareseitigen Pinbelegung mit Funktionen (Leittechnik).

Die Ausführung ist i. d. R. von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp (herstellerübergreifend) verschieden: Die Definition der Platzierung der Elektrokupplung sowie der Anforderungen an zu übertragende Funktionen erfolgt im Rahmen des Lastenheftes für den jeweiligen Fahrzeugtyp [25]. So sind die E-Kupplungen innerhalb eines Fahrzeugtyps meist identisch aufgebaut und bestückt. Bspw. besitzt ein LINT-Triebzug von DB Regio dieselbe Pinbelegung wie ein LINT eines anderen EVU mit identisch dimensionierter E-Kupplung. Ein weiteres Beispiel stellen die FLIRT-Triebzüge der Landesanstalt Schienenfahrzeuge Baden-Württemberg (SFBW) und von DB Regio NRW dar, wo eine identische Pinbelegung explizit gefordert worden ist [25]. Da diese beiden Fahrzeugtypen (Alstom LINT und Stadler FLIRT) aber geometrisch unterschiedlich ausgeführte E-Kupplungen besitzen, sind sie nicht kompatibel (vgl. Abbildung 2). Zudem können verschiedene Fahrzeugplattformvarianten (z. B. verschiedene Flirts anderer EVU) unterschiedlich ausgeführte Pinbelegungen besitzen, wenn z. B. zusätzliche Funktionen übertragen werden. Dann sind zwar die Baugrößen der E-Kupplungen identisch, aber die Belegung der Pinkkontakte unterschiedlich, sodass kein betriebliches Kuppeln möglich ist.

Hinzu kommt, dass in der überwiegenden Anzahl der Fälle die Belegung der Pinkkontakte mit zu übertragenden Funktionen unterschiedlich ausgeführt ist, wie im Zuge der Recherchen durchgeführte Analysen von Schaltplänen ausgewählter Fahrzeuge belegen. Das bedeutet, dass über die Pinkkontakte selbst bei identischer Ausführung bei verschiedenen Fahrzeugtypen unterschiedliche Funktionen der Leittechnik übertragen werden. Bspw. wird über Pin 1 einmal die Funktion A und einmal die Funktion B übermittelt. Eine identische Ausführung der Pinbestückung der E-Kupplung bedeutet also nicht zwingend eine funktionelle Kompatibilität auch aufseiten der Leittechnik. Ein betriebliches Kuppeln der o. g. Triebzüge verschiedener EVU ist zumeist deswegen nicht möglich, weil die Software inkompatibel ist, obwohl die E-Kupplung vermeintlich identisch aufgebaut ist [25]. Dies bringt eine weitere Dimension in diese Problematik.

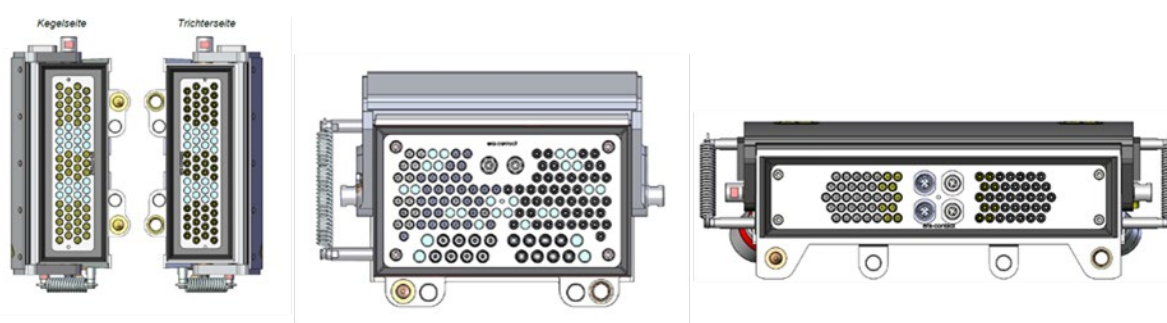


Abbildung 2: Beispiele ausgeführter E-Kupplungen: v. l. n. r.: H01, era2, era4

Abbildung 2 zeigt Beispiele ausgeführter E-Kupplungen [25]. Die Kupplungen H01 werden seitlich an den SchaKu-Kopf, die beiden „era“-Typen oberhalb von diesem angebracht. Die E-Kupplung H01 wird bspw. bei den Alstom-LINT-54/81-Triebzügen im Kölner Netz, die Version era2 beim Stadler FLIRT im Stuttgarter Netz und die Version era4 beim Siemens Desiro HC im Rhein-Ruhr-Express verwendet. Daneben gibt es weitere Ausführungen elektrischer Kupplungen, z. B. die Typen era1 und era3 der era-contact GmbH, Bretten, einem der führenden Hersteller von E-Kupplungs-Aufsätzen [27].

Wie sich in Form und Aufbau der abgebildeten E-Kupplungen erkennen lässt, sind diese nicht kompatibel. Hinzu kommt, dass die E-Kontakte (Pins) je nach Ausführung innerhalb einer Bauform variieren können. In Abbildung 2 sind die Pins, die in der dargestellten Ausführung mit einer Funktion belegt sind, goldfarben bzw. dunkel und diejenigen, die in dieser Ausführung nicht belegt sind (Leerkontakte), hellblau gefärbt. Je nach Fahrzeugkonfiguration, -ausstattung und notwendiger Signalübertragung kann die Pinbelegung variieren. Die maximal mögliche Pinanzahl ist durch die Konfiguration der E-Kupplung definiert; bei der Version era2 sind bspw. maximal 176 Kontakte möglich, bei der Version era4 können es max. 2×76 Kontakte sein [27]. Dadurch ergeben sich entsprechend viele Kombinationsmöglichkeiten bei der Pinbelegung.

An die Pinkontakte angeschlossen ist jeweils ein Kabel, das die übertragenen Funktionssignale und Informationen an die Leittechnik im Fahrzeug weitergibt. Die Kabel können einadrig, mehradrig oder als Buskabel mit unterschiedlicher Querschnittsfläche ausgeführt sein.

TABELLE 1: SIGNALE UND ELEKTRISCHE SPANNUNGSEBENEN, DIE ÜBER DIE KUPPLUNG ÜBERTRAGEN WERDEN, GEORDNET NACH IHREN KATEGORIEN

Fahrzeugsteuerung	Fahrgast-/Komfortfunktionen	Spannungsversorgung	Kupplungsheizung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ CAN-Bus („CAN Powerline“) ▪ Ethernet ▪ WTB (Wired Train Bus) ▪ UIC-Leitungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beleuchtung ein/aus ▪ Beschallung innen/außen ▪ Fahrgastinformationssystem (FIS) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DC-Sammelschiene mit 24 oder 36 V ▪ Erdung ▪ Batteriestatus 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 24 V AC oder DC für Eigenversorgung oder ▪ 110 V DC oder ▪ 230 V AC
Sicherheitsrelevante Signale			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grünschleife ▪ Türfreigabe links/rechts ▪ Türen schließen ▪ Fahrtrichtung ▪ Notfahrt bzw. Hilfsfahrt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Traktionssperre ▪ Schnellbremse ▪ Störung Bremse ▪ Kupplungskontrolle elektrisch/mechanisch ▪ Parkbremse anlegen/lösen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Notbremse ▪ Notbremsüberbrückung ▪ Federüberwachung ▪ Feuer-/Brandalarm ▪ Zug-besetzt-Meldung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zugidentifikationskontrolle ▪ IBIS-System

Die Signale, die übertragen werden, betreffen sämtliche Zugsteuersignale im Niederspannungsbereich bis 36 V Gleichspannung (DC), aber auch eine 110-V-DC bzw. 230-V-Wechselspannung (AC) kann an der Kupplung anliegen. Grundsätzlich gilt, dass bei modernen Fahrzeugen die relevanten Signale der Fahrzeugsteuerung über einen CAN-Bus (ältere Baujahre der Fahrzeuge) oder Ethernet (neue Baujahre) übertragen werden. Sicherheitsrelevante Funktionen werden allerdings über ein separates Kabel geführt. Folgende Signale werden über die E-Kupplungen übertragen:

- Fahrzeugsteuersignale (Sollwertgeberstellung zum Antreiben und Bremsen: Traktionssteuerung (Zugkraftregelung, Anzahl verfügbare Fahrmotoren, insbesondere Mehrfachtraktionssteuerung (Zeitmultiplexe Wendezugsteuerung (ZWS), Frequenz-Multiplexe Zugsteuerung (FMZ), Zeitmultiplexe Doppel- und Mehrfachtraktionssteuerung (ZDS/ZMS)))
- Sicherheitsrelevante Signale über separate Leitungen
- Fahrgast-/Komfortfunktionen
- Spannungsversorgung
- Kupplungsheizung (E-Kupplung besitzt eine eigene Heizung)

Die zu den jeweiligen Signalkategorien zugehörigen Informationen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Ferner sei auf Abschnitt 5.2.1 verwiesen, in dem die von der Kupplung zu übertragenden Funktionen kategorisiert werden.

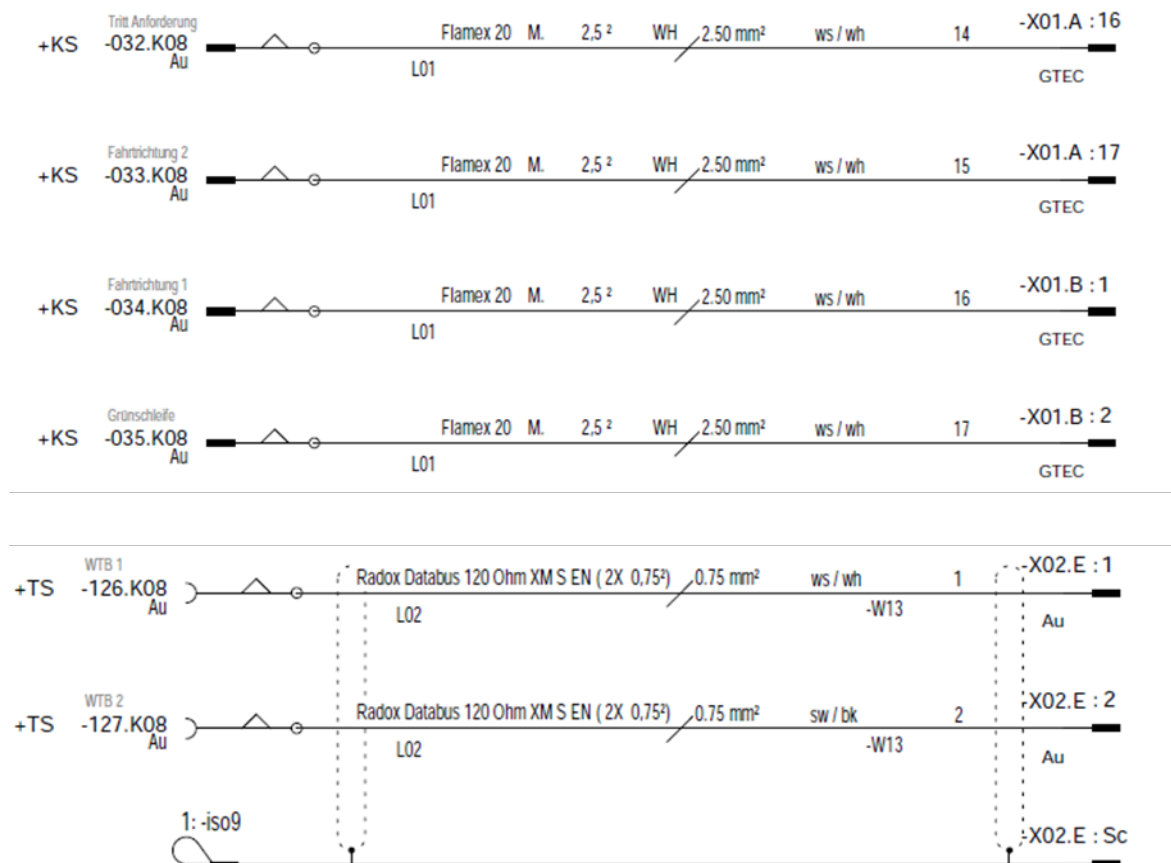


Abbildung 3: Beispiele für übertragene Signale und die entsprechende Pinbelegung

Abbildung 3 stellt einen kleinen Ausschnitt aus einem beispielhaften Stromlaufplan dar [25]. Es sind beispielhafte Funktionen zu sehen wie Trittanforderung oder Grünschleife, die auf den entsprechenden Pins der Kupplung, z. B. - 032.K08 für die Trittanforderung, liegen. Dieser Pin ist mit einem Flamex-20-Kabel mit 2,5 mm² Querschnittsfläche fahrerseitig mit dem Kontakt - X01.A:16 verbunden. Hier können digitale Signale übertragen werden. Der Wired Train Bus (WTB 1 bzw. WTB 2 in Abbildung 3) wird hingegen über ein Datenbuskabel übertragen.

Wie bereits erwähnt sind die Fahrzeuge heute mechanisch häufig kuppelbar, elektrisch und softwaretechnisch jedoch nicht baureihenübergreifend kompatibel. Dies wird in Abschnitt 3 noch näher betrachtet.

2.6 Gründe für Diversitäten

Die Ergebnisse der Recherche aus Abschnitt 2.4 zeigen, dass eine sehr große Bandbreite an unterschiedlichen Fahrzeugkupplungen im SPNV verbaut und im Betrieb ist. Zwar ist die Mehrzahl der Triebzüge mit einer SchaKu Typ 10 (siehe Abschnitt 2.5) ausgerüstet, aber bei den E-Kupplungen und aufseiten der Leittechnik ist eine Vielzahl an Kombinationen vorhanden, was einer freien Kuppelbarkeit entgegen-

steht. Um die Gründe hierfür näher beleuchten zu können, wurden zum einen die vorhandenen Rechercheergebnisse in Zusammenarbeit mit Voith erörtert, zum anderen wurden Experten- und Expertinneninterviews mit Personen aus dem Eisenbahnsektor geführt. Hier konnten Bahnbetreiber (EVU) [E1–2, E6, E8–10, E12 – siehe S. 94], Experten für Fahrzeugtechnik (Lastenheftdefinition) [E3] und Aufgabenträger als Besteller von Verkehrsleistungen bzw. Fahrzeugen [E4] interviewt werden. Ebenso wurden Interviews mit Fahrzeugherstellern geführt [E5, E7] sowie mit einer Expertin in Zulassungsfragen [E11].

Grundsätzlich kann die Problematik im Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit, Technik und Administration verortet werden (Abbildung 4).

- **Wirtschaftliche Aspekte** betreffen zum einen die Hersteller und zum anderen die Besteller³ der Fahrzeuge.
- **Technische Aspekte** betreffen eine fehlende Normung der Schnittstelle zwischen den Fahrzeugen, primär auf elektrischer Seite.
- **Administrative Aspekte** umfassen das System Bahn als solches mit der Regionalisierung der Verkehrsleistungen im SPNV und der damit verbundenen Vielzahl an Akteuren und Bestellern.

Ein Ergebnis der Gespräche war, dass seitens der Fahrzeughersteller ein gewisses Geheimhaltungsbedürfnis bezüglich des technischen Wissens besteht, was einer Offenlegung durch Normung zum Teil entgegensteht (Wirtschaftlichkeitsaspekt). Dies betrifft etwa die Pinbelegung der E-Kupplung, die bisher nicht standardisiert ist (Technikaspekt). Die Hersteller sind also frei in der Wahl der Pinbelegung, wobei laut Voith die E-Kupplungen von verschiedenen Fahrzeugplattformen eines Herstellers ähnlich bis identisch bestückt werden. Dies gilt zum Teil auch für verschiedene Fahrzeuggenerationen (z. B. die unterschiedlichen Alstom-LINT-Typen). Funktionen, die nachfolgende Generationen zusätzlich besitzen, werden entweder über Bus oder über freie Pins übertragen [25].

Ein größeres Hemmnis für eine freie Kuppelbarkeit stellt die Leittechnik der Fahrzeuge dar. Zwar ist der grundsätzliche Softwarearchitekturaufbau genormt, aber die konkrete softwaremäßige Umsetzung der gewünschten Funktionen erfolgt fahrzeug- bzw. projektspezifisch. Dadurch sind Unterschiede in den Protokollen der Leittechnik nicht zu vermeiden, sodass an der Schnittstelle (E-Kupplung) keine Kommunikation der Fahrzeuge möglich ist. Derartige Probleme wären technisch lösbar, aber sehr aufwendig in der Umsetzung [E5, E7]. Auf Anwenderseite bzw. öffentlich zugänglich werden praktisch keine Informationen preisgegeben, sondern als Firmengeheimnisse behandelt [E1, E3, E4, E8]. Die Hersteller scheinen sich dadurch ein gewisses Alleinstellungsmerkmal zu schaffen und damit bei der Instandhaltung ihrer Fahrzeuge eine Art Monopolstellung zu etablieren, da nur sie den genauen Aufbau und die Programmierung der Software kennen. Ein standardisiertes Protokoll zur Übertragung der Fahrzeugfunktionen, bei dem diese Aspekte berücksichtigt würden und eine Kuppelbarkeit dennoch möglich wäre, könnte ein Lösungsweg sein. Dass es technisch machbar ist, zeigen Lokwagenzüge, bei denen Alt- und Neufahrzeuge im Nahverkehr miteinander gekuppelt werden können, weil die UIC-Leitung genormt ist [E9, E10].

Ferner wird eine freie Kuppelbarkeit vermutlich deshalb gescheut, weil in diesem Fall ein deutlicher Mehraufwand für die Zulassung notwendig ist. Dazu müssen sämtliche Aspekte der zu kuppelnden Fahrzeugkonfigurationen berücksichtigt werden.

³ Die Besteller sind i. d. R. die Aufgabenträger, die die Verkehre bestellen und dafür zugeschnittene Fahrzeuge wünschen. Die EVU, die den Zuschlag für ein Netz erhalten, beschaffen meist die Fahrzeuge selbst, aber gemäß den Ausstattungswünschen der Ausschreibung, die wiederum vom Aufgabenträger stammt.

Dies betrifft u. a. folgende wichtige Aspekte:

- eine einheitliche Datenübertragung auch sicherheitsrelevanter Informationen
- Wechselwirkungen zwischen Stromabnehmern in bestimmten Abständen (damit sich die Fahrleitung nicht aufschwingt)
- Sicherheit gegen Entgleisen unterschiedlich gekuppelter Fahrzeugkonzepte
- unterschiedliche Zugkraft-/Bremskraftkennlinien, die nicht zu einer mechanischen Überbelastung der Kupplungen oder unerwünschten längsdynamischen Effekten im Zugverband führen dürfen, sofern diese unterschiedlich stark ausgeprägt sind (bspw. eine Kombination von DMU+EMU bzw. Fahrzeugen mit und ohne Magnetschienenbremse)



Abbildung 4: Spannungsfeld der Ursachen für nicht freie Kuppelbarkeit

Aktuell erhalten Fahrzeuge eine Zulassung (Typgenehmigung) für die Fahrzeugkombinationen, die im Antrag für die Zulassung aufgeführt sind und für die ein Sicherheitsnachweis vorliegt. Diese Fahrzeuge sind dann im European Register of Authorised Types of Vehicles (ERATV) mit ihren Spezifikationen aufgeführt. Ein in Nr. [28] aufgeführtes Beispiel zeigt auf, dass ein bestimmter Fahrzeugtyp für bestimmte Mischtraktionen zugelassen ist. Eine Erweiterung um weitere Fahrzeugkombinationen würde eine Änderung der Einsatzbedingungen mit sich bringen. Hier müsste geprüft werden, ob dies eine signifikante Änderung am Fahrzeug darstellt und ob dann gemäß Artikel 4 der Sicherheitsrichtlinie [29] ein neuer Sicherheitsnachweis mit Neuzulassung erforderlich wäre [E11]. Dies betrifft auch Fahrzeuge verschiedener Fahrzeuggenerationen, die auf unterschiedlichen Zulassungskriterien beruhen. Sie können nicht ohne weitere Neuzulassung für die gewünschte Fahrzeugkombination gekuppelt werden [E2, E11]. Inwieweit eine Multikuppelbarkeit, basierend auf einem Standard, ohne stetige Neuzulassungen aller Fahrzeugkombinationen möglich ist, müsste explizit untersucht werden [E11].

Neben diesen Aspekten spielen die Ausstattungs- bzw. Sonderwünsche oder individualisierte Funktionen der Besteller eine Rolle, die Fahrzeuge zugeschnitten auf ihr jeweils ausgeschriebenes Netz beschaffen möchten (Administrationsaspekt). Zwar gibt es „Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren“ [30] zur einheitlichen Gestaltung und Ausstattung zu beschaffender Fahrzeuge, die seitens des Bundesverbands SchienenNahverkehr e. V. herausgegeben worden sind. Da es sich aber nur um Empfehlungen handelt, die nicht bindend für Ausschreibungen sind, werden Fahrzeuge individuell

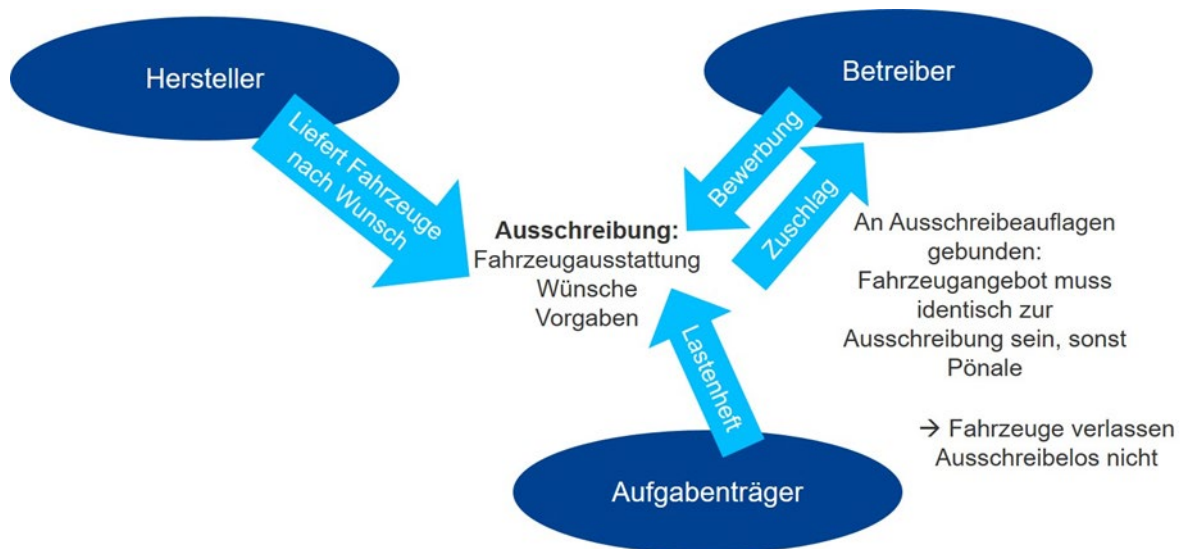


Abbildung 5: Beispiel für ausschreibungsgebundene Fahrzeuge

bestellt [E4]. Derartige Spezifikationen führen zu unterschiedlichen Ausstattungen und Funktionen. Diese Funktionen können dabei innerhalb der Leittechnik verschiedene Datenkanäle besetzen bzw. unterschiedliche Protokolle verwenden und dabei eine Kommunikation zwischen verschiedenen Fahrzeugen verhindern [E4].

In diesem Zusammenhang kann auch die netz- bzw. losweise Beschaffung der Fahrzeuge gesehen werden, die dann explizit für diese Strecken vorgesehen sind. Eine Mischung der Fahrzeuge unterschiedlicher Streckennetze ist in den Ausschreibungen bisher nicht vorgesehen und zum Teil auch nicht erwünscht, da die Fahrzeugbestände inkl. Reservefahrzeugen explizit auf die ausgeschriebenen Netze zugeschnitten sein müssen (Abbildung 5). Daher ist aktuell aus Sicht der Besteller eine Kuppelbarkeit der Fahrzeuge nicht nötig. Eine Mischung bzw. netzübergreifende Kuppelbarkeit würde einen dispositiven Mehraufwand bedeuten, böte aber z. B. das Potenzial einer Reduktion von Reservefahrzeugen, siehe auch Abschnitt 6.5 [E1].

Somit kann zusammenfassend folgendes Fazit zu den Defiziten aus den im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Interviews gezogen werden:

- Die fehlende Normung der Schnittstellen E-Kupplung und Leittechnik bieten Freiraum bei der Gestaltung der elektronischen Fahrzeugarchitektur, die einer baureihenübergreifenden Kuppelbarkeit entgegenstehen.
- Eine Standardisierung der Schnittstelle bedeutet einen deutlichen Mehraufwand hinsichtlich des Aufbaus der Leittechnikarchitektur und insbesondere für die Zulassung der Fahrzeuge, was aktuell aus wirtschaftlichen Gründen nicht verfolgt wird. Technisch umsetzbar wäre es.
- Eine Multikuppelbarkeit wird für aktuelle Fahrzeugbeschaffungen nicht benötigt, da diese losweise erfolgen und die Fahrzeuge die Netze, für die sie beschafft worden sind, vor Ablauf der Verkehrsverträge i. d. R. nicht verlassen. Ein Kuppeln mit artfremden Fahrzeugen ist somit nicht vorgesehen.

Allerdings, so wurde es durchweg von den befragten Expertinnen und Experten gesehen, wäre es betrieblich wünschenswert, zumindest einzelne Fahrzeuge, die im selben Teilnetz verkehren, frei miteinander kuppeln zu können, um die Fahrzeugreserve reduzieren, auf Nachfrageschwankungen adäquat reagieren und Ausfälle kompensieren zu können [E1–4, E6, E8–11]. Ein erster wesentlicher Schritt hierzu wäre die Festschreibung des Kupplungstyps und der Einbauhöhe für die Beschaffung der Fahrzeuge im Lastenheft [E4, 30, 31].

3 Kombinationsmöglichkeiten und Kupplungskompatibilität des heutigen Fahrzeugbestands

3.1 Kupplungskompatibilität

Wie sich aus den Erkenntnissen aus Kapitel 2 ableiten lässt und durch Experteninterviews bestätigt worden ist, können folgende Randbedingungen bei Kombinationsmöglichkeiten zur Kupplungskompatibilität des heutigen Fahrzeugbestands zusammengefasst werden:

- Fahrzeuge mit Schraubenkupplung, Scharfenbergkupplung (im Folgenden: SchaKu) und Kompaktkupplung sind nicht miteinander kuppelbar.
- Fahrzeuge mit einer SchaKu Typ 10 sind mit Fahrzeugen mit einer SchaKu Typ 330 nicht kuppelbar.
- Fahrzeuge mit einer SchaKu Typ 10 sind mit anderen Fahrzeugen mit einer SchaKu Typ 10 nur unter bestimmten Bedingungen kuppelbar.

Daher müssen diese Fahrzeuggruppen getrennt voneinander betrachtet werden. Für Fahrzeuge mit Schraubenkupplung gilt, dass diese nicht baureihenübergreifend kuppelbar sind. Eine Ausnahme bilden Regio-Shuttle und NE 81 der WEG, deren Fahrzeugtechnik so angepasst worden ist, dass sie kuppelbar sind. Abschleppen ist bei allen Fahrzeugen klassisch über die Schrauben- und Luftkupplung möglich, wobei die Antriebe der Regio-Shuttle nicht auf ein Schleppen von anderen Fahrzeugen ausgelegt sind [E1].

Fahrzeuge, die mit der SchaKu Typ 10 ausgestattet sind, lassen sich mechanisch kuppeln, wenn die Einbauhöhe der Kupplung an beiden Fahrzeugen dies zulässt. Dann ist auch ein pneumatisches Kuppeln möglich, da Neufahrzeuge i. d. R. eine Hauptluftleitung (HL) und eine Hauptluftbehälterleitung (HBL) besitzen und diese Anschlüsse nach DIN EN 16019 genormt sind. Somit wäre der Abschleppfall sichergestellt. Ein elektrisches Kuppeln ist im Allgemeinen baureihenübergreifend nicht möglich.

Zusätzlich muss hier noch unterschieden werden zwischen elektromechanischer Kuppelbarkeit (passende E-Kupplung mit identischer Pinbelegung) und softwareseitiger Kompatibilität. Neben der nicht einheitlichen Pinbelegung spielt die Leittechnik eine Rolle, da hier fallweise verschiedene Softwarestände nicht kompatibel sein können. Dies kann dazu führen, dass bei Softwareupdates während der Umrüstphase aufgrund eines je nach Fahrzeug neuen bzw. alten Softwarestands eine zeitweilige Inkompatibilität zwischen Exemplaren derselben Baureihe auftreten kann [E2].

In einem nächsten Schritt wurde eine Kuppelbarkeitsmatrix erstellt. Als erste Beispiele für die eingangs genannten Aspekte für eine geplante, aber nicht umgesetzte herstellerübergreifende Kuppelbarkeit werden Fahrzeuge der (schon älteren) BR 64x und BR 42x genannt. Für diese Baureihen wurde ursprünglich eine Kuppelbarkeit innerhalb der Baureihenfamilien vorgesehen, jedoch nie vollumfänglich umgesetzt, da die Fahrzeuge softwareseitig inkompatibel sind [32, E3]. Die Folge ist, dass die Fahrzeuge heute nur mechanisch und pneumatisch innerhalb der Baureihenfamilien kuppelbar sind, aber nicht elektrisch, und damit nicht mehrfachtraktionsfähig sind. Ausnahmen bilden die BR 640 und 648 sowie die BR 424–426, die jeweils kompatibel sind.

Diese Problematik betrifft auch Fahrzeuge desselben Herstellers und derselben Plattform, wenn unterschiedliche Besteller oder Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) Fahrzeuge ordern bzw. wenn verschiedene Baulose eines Fahrzeugs gekuppelt werden sollen. Ein Beispiel sind hier Triebzüge der Bauart Bombardier Talent 2, die sich wegen unterschiedlicher Softwarestände bei verschiedenen Baulosen nicht elektrisch kuppeln lassen [E6]. Auch hier können unterschiedliche Pinbelegungen der E-Kupplung vorliegen. Sofern diese dennoch identisch sind, können verschiedene Softwareversionen einer Kuppelbarkeit entgegenstehen [25]. Das Problem mangelnder Kompatibilität ist also primär auf der elektrotechnischen bzw. elektronischen Seite zu finden und zu lösen.

Um einen Überblick über diesen Sachverhalt zu geben, wurde eine Kuppelbarkeitsmatrix zu aktuell im Betrieb befindlichen Fahrzeugen erstellt und der Grad der Kuppelbarkeit bewertet (Abbildung 6). In dieser Matrix sind nur Fahrzeuge enthalten, die eine SchaKu Typ 10 besitzen. Die Fahrzeuge werden verglichen und der Grad der Kuppelbarkeit farblich eingetragen: Fahrzeugkombinationen, die mechanisch miteinander kuppeln können, erhalten die rote Farbe des überlappenden Kästchens. Fahrzeuge, deren Luftkupplungen kompatibel sind und damit ein mechanisch-pneumatisches Kuppeln ermöglichen, erhalten eine orange Färbung. Sind zudem die Pins der E-Kupplungen gleich belegt, erhält das Kästchen eine gelbe Farbe. Stimmt letztendlich auch die Leittechnik (Software) der Fahrzeuge überein und ein gekuppelter Betrieb ist uneingeschränkt möglich, ist das Kästchen grün gefärbt.

Es wurde bei Erstellung der Matrix darauf Wert gelegt, allgemeingültige Aussagen zu treffen. Durch die Vielzahl an Fahrzeugtypen und Betreibern können einzelne Kombinationen zusätzlich möglich sein. Ist es innerhalb eines EVU bspw. möglich, einzelne Fahrzeuge zu kuppeln, werden diese Kästchen schraffiert dargestellt (z. B., wenn ein EVU verschieden lange FLIRT-Triebzüge (Baureihen 426–1430) einsetzt und diese kuppelbar sind). Diese Kästchen wären für diesen Fall grün zu färben. Für manche Felder konnten keine konkreten Informationen beschafft werden. Diese sind mit einem Fragezeichen markiert und für die Färbung wurden Annahmen getroffen.

Um trotzdem beispielhafte EVU und deren spezielle Fahrzeuge betrachten zu können, wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber zwei exemplarische Netzknoten ausgewählt. Für diese Knoten kann mit begrenzter Fahrzeug- und Betreiberanzahl die Kuppelbarkeit bewertet werden. Es wurden das Netz Rhein-Ruhr (Abbildung 7) und das Netz Rhein-Main mit dem Knoten Frankfurt (M) (Abbildung 8) ausgewählt und die dort eingesetzten Fahrzeuge analysiert. Es gilt bezüglich der Kuppelbarkeit dieselbe Darstellung wie oben beschrieben. Zusätzlich taucht hier dunkelrote Farbe auf. Dies sind Fahrzeuge mit Schraubenkupplung, die nicht mit Fahrzeugen mit Scharfenbergkupplung kompatibel sind.

Die gesamte Matrix und die der Netzknoten dienen als Orientierung. Sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Es zeigt sich bei der Betrachtung der Matrizen (siehe Abbildungen 6–8), dass nur wenige der betrachteten Fahrzeuge miteinander mehrfachtraktionsfähig kuppelbar sind (grüne Felder). Dies beschränkt sich hauptsächlich auf identische Baureihen. Eine baureihenübergreifende Kuppelbarkeit ist nur vereinzelt und nur bei Fahrzeugen derselben Plattform, wie z. B. verschieden lange LINT-Varianten (Baureihen 620 und 622) möglich. Dies beschränkt sich aber wiederum vornehmlich auf Fahrzeuge innerhalb eines EVU, da dann die Leittechnik identisch ausgeführt ist. Interessant ist, dass zum Erzielen der um die Jahrtausendwende verfolgten Kuppelbarkeit der 64x-Baureihen diese identische E-Kupplungen besitzen, aber seitens der Leittechnik nicht kompatibel sind. Positiv ist jedoch anzumerken, dass durch denselben Kupplungstyp fast alle Fahrzeuge miteinander mechanisch und pneumatisch kuppelbar sind, sodass zumindest im Abschleppfall ein Räumen der Strecke mit fast allen Fahrzeugtypen möglich ist.

Fahrzeugtyp, Baureihe	VT (120-140 km/h)													H2 (140)	ET (160 km/h)																											
	LINT 27 BR 640	LINT 41 BR 648	LINT 41H BR 648	LINT 54 BR 622	LINT 54 H BR 622	LINT 81 BR 620	TALENT BR 643.2	TALENT BR 643	TALENT BR 644	Desiro BR 642	Coradia A TER BR 641	PESA LINK II BR 632	PESA LINK III BR 633	RS1 mit Schaku BR 650	GTW2/6 BR 646	iLINT BR 654	TALENT 2 BR x442.0	TALENT 2 BR x442.1	TALENT 2 BR x442.2	TALENT 2 BR x442.3	TALENT 3 BR x442	Desiro HC BR 462	Desiro ML II BR 460	FLIRT BR 426	FLIRT BR 427	FLIRT BR 428	FLIRT BR 429	FLIRT BR 1430	Coradia Cont. BR 440.0	Coradia Cont. BR 440.1	Coradia Cont. BR 440.2	Coradia Cont. BR 440.3	Coradia Cont. BR 1440.0	Coradia Cont. BR 1440.1	Coradia Cont. BR 1440.2	Coradia Cont. BR 1440.3	BR 424	BR 425	BR 426			
LINT 27 BR 640	■	■	■							?			■																													
LINT 41 BR 648	■	■	■							?				■																												
LINT 41H BR 648	■	■	■							?				■																												
LINT 54 BR 622				■	■	■										■																										
LINT 54 H BR 622				■	■	■										■																										
LINT 81 BR 620				■	■	■										■																										
TALENT BR 643.2							■	■	■																																	
TALENT BR 643							■	■	■																																	
TALENT BR 644							■	■	■																																	
Desiro BR 642									■																																	
Coradia A TER BR 641	?	?	?							■																																
PESA LINK II BR 632											■	■																														
PESA LINK III BR 633												■	■																													
RS1 mit Schaku BR 650	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
GTW2/6 BR 646														■																												
iLINT BR 654				?	?	?								■																												
TALENT 2 BR x442.0																	■	■	■	■																						
TALENT 2 BR x442.1																	■	■	■	■																						
TALENT 2 BR x442.2																	■	■	■	■																						
TALENT 2 BR x442.3																	■	■	■	■																						
TALENT 3 BR x442																				■																						
Desiro HC BR 462																					■																					
Desiro ML II BR 460																						■																				
FLIRT BR 426																							■																			
FLIRT BR 427																								■																		
FLIRT BR 428																									■																	
FLIRT BR 429																										■																
FLIRT BR 1430																											■															
Coradia Cont. BR 440.0																												■														
Coradia Cont. BR 440.1																													■													
Coradia Cont. BR 440.2																														■												
Coradia Cont. BR 440.3																															■											
Coradia Cont. BR 1440.0																																■										
Coradia Cont. BR 1440.1																																	■									
Coradia Cont. BR 1440.2																																		■								
Coradia Cont. BR 1440.3																																			■							
BR 424																																						■	■	■		
BR 425																																							■	■	■	
BR 426																																								■	■	■

Legende	■	mechanisch	■	mechanisch und pneumatisch	■	mechanisch, pneumatisch und elektrisch	■	vollumfänglich	■	innerhalb EVU kuppelbar	?	vermutlich
Grad der Kuppelbarkeit:	■		■		■				■			

Abbildung 6: Kuppelbarkeitsmatrix (gesamt)

	Fahrzeugtyp, Baureihe	DB Regio											Euregio- bahn (DB)	Abellio							National Ex.	eurobahn				NordWestBahn			Rurtalbahn	VIAS Rail		trans- regio						
		TALENT BR 643	TALENT BR 644	PESA LINK BR 632	PESA LINK BR 633	Lint 54 BR 622	Lint 81 BR 620	TALENT 2 BR 442.2	TALENT 2 BR 442.3	FLIRT BR 1428	Coradia Cont. BR 1440.2	Coradia Cont. BR 1440.3	BR 425	TALENT BR 643	Desiro HC BR 0462	Lint 41 BR 1648	FLIRT BR 0426	FLIRT BR 0427	FLIRT BR 1429	FLIRT BR 2429	FLIRT BR 3427	FLIRT BR 3429	Desiro HC BR 0462	TALENT 2 BR 9442	FLIRT BR 0427	FLIRT BR 0428	FLIRT BR 0429	FLIRT BR 2429	TALENT BR 643	Lint 41 BR 648	Lint 41 BR 1648	Lint 54 BR 622	RS 1 BR 650	Lint 41 BR 648	Lint 54 BR 622	Desiro ML II BR 460		
DB Regio	TALENT BR 643	?	?										?																									
	TALENT BR 644	?	?										?																									
	PESA LINK BR 632			?	?																																	
	PESA LINK BR 633			?	?																																	
	Lint 54 BR 622					?	?																															
	Lint 81 BR 620					?	?																															
	TALENT 2 BR 442.2							?	?															?														
	TALENT 2 BR 442.3							?	?															?														
	FLIRT BR 1428								?																													
	Coradia Cont. BR 1440.2									?	?																											
Coradia Cont. BR 1440.3										?	?																											
BR 425											?																											
Euregiobahn (DB)	TALENT BR 643	?	?										?															?										
	Desiro HC BR 0462													?									?															
	Lint 41 BR 1648														?														?									
	FLIRT BR 0426															?	?	?	?	?	?					?	?	?	?									
	FLIRT BR 0427																?	?	?	?	?					?	?	?	?									
	FLIRT BR 1429																?	?	?	?	?					?	?	?	?									
	FLIRT BR 2429																?	?	?	?	?					?	?	?	?									
	FLIRT BR 3427																?	?	?	?	?					?	?	?	?									
	FLIRT BR 3429																?	?	?	?	?					?	?	?	?									
National Ex.	Desiro HC BR 0462													?																								
	TALENT 2 BR 9442							?	?																													
eurobahn	FLIRT BR 0427																																					
	FLIRT BR 0428																																					
	FLIRT BR 0429																																					
	FLIRT BR 2429																																					
NordWestBahn	TALENT BR 643	?	?										?																									
	Lint 41 BR 648																																					
	Lint 41 BR 1648																																					
Rurtalbahn	Lint 54 BR 622					?	?																															
	RS 1 BR 650																																					
VIAS Rail	Lint 41 BR 648																																					
	Lint 54 BR 622					?	?																															
transregio	Desiro ML II BR 460																																					

Legende					
Grad der Kuppelbarkeit:	rot	nicht kuppelbar	orange	mechanisch und pneumatisch	gelb
				mechanisch, pneumatisch und elektrisch	grün
				vollumfänglich	?
					vermutlich

Abbildung 7: Kuppelbarkeitsmatrix, Netz Rhein-Ruhr

	Fahrzeugtyp, Baureihe	DB Regio Mitte									DB Regio Mitte	West- franken- bahn (DB)	Hess. Landesbahn								VIAS Rail			vlexx		
		Lint 41 BR 623	Lint 54 BR 622	PESA LINK BR 632	PESA LINK BR 633	Desiro BR 642	TALENT 2 BR 442.1	TALENT 2 BR 442.2	Twindexx BR 446	BR 425	Twindexx BR 445	Desiro BR 642	VT 2E	Lint 41 BR 648	Lint 41 BR 1648	GTW 2/6 BR 646	Desiro BR 642	FLIRT BR 427	FLIRT BR 429	Cordadia Cont. BR 1440.1	Cordadia Cont. BR 1440.3	Itino BR 615	FLIRT BR 427	FLIRT BR 428	Lint 54 BR 622	Lint 81 BR 620
DB Regio Mitte	Lint 41 BR 623	■	■			■					■		■												?	?
	Lint 54 BR 622	■	■			■					■		■												?	?
	PESA LINK BR 632			■	■																					
	PESA LINK BR 633			■	■																					
	Desiro BR 642	■	■			■					■		■				?									
	TALENT 2 BR 442.1						■	■																		
	TALENT 2 BR 442.2						■	■																		
	Twindexx BR 446								■		?															
BR 425									■																	
DB Regio Bayern	Twindexx BR 445									■																
Westfrankenbahn (DB)	Desiro BR 642	■	■			■					■		■			?										
Hess. Landesbahn	VT 2E											■														
	Lint 41 BR 648												■	?												
	Lint 41 BR 1648												■	■												
	GTW 2/6 BR 646														■											
	Desiro BR 642	■	■			?						■		■												
	FLIRT BR 427																	■	■				?	?		
	FLIRT BR 429																	■	■				?	?		
	Cordadia Cont. BR 1440.1																		■	■			?	?		
Cordadia Cont. BR 1440.3																		■	■			?	?			
VIAS Rail	Itino BR 615																			■	■					
	FLIRT BR 427																	■	■				■	■		
	FLIRT BR 428																	■	■				■	■		
vlexx	Lint 54 BR 622	?	?			■							■												■	■
	Lint 81 BR 620	?	?			■							■												■	■

Legende	■	mechanisch und pneumatisch	■	mechanisch, pneumatisch und elektrisch	■	vollumfänglich	?	vermutlich
Grad der Kuppelbarkeit:	■		■		■		?	

Abbildung 8: Kuppelbarkeitsmatrix, Netz Rhein-Main

3.2 Betriebliche Randbedingungen für eine Multikuppelbarkeit

Abgesehen von der technischen Möglichkeit, Fahrzeuge kuppeln zu können, sind auch einige betriebliche Rahmenbedingungen bei der Bewertung des Ist-Zustandes zu berücksichtigen, die die praktische Nutzbarkeit einer bestehenden Kuppelbarkeit einschränken können:

- Die geografische Überschneidung des Einsatzbereichs zweier Fahrzeuge muss gegeben sein, um diese sinnvoll kuppeln zu können.
- Die Besitz- und Vertragsverhältnisse müssen geklärt sein, die einen gemeinsamen Verkehr aus juristischen Gründen verbieten könnten.
- Eine passende Fahrplanlage der Züge muss vorhanden sein, um die Kupplung nutzen zu können.
- Die Verfügbarkeit von Gleisen und die sicherungstechnische Ausstattung zum Kuppeln zweier Züge muss gegeben sein.
- Die Bahnsteiglängen entlang der gekuppelt gefahrenen Strecke müssen ausreichend lang sein. Ein Beispiel wäre das Kuppeln von zwei fünf- oder sechsteiligen Triebzügen mit je über 100 Metern Länge über Kupplung, was an einem 210-Meter-Bahnsteig nur bedingt sinnvoll ist (siehe Abbildung 9).
- Die Bahnsteighöhen und die Fußboden- bzw. Einstiegshöhen der Fahrzeuge müssen kompatibel sein. Ein Kuppeln von bspw. Hochflur-(S-Bahn)-Fahrzeugen mit Niederflurfahrzeugen ist nicht sinnvoll.
- Stark unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten, die eine Fahrplaneinhaltung im gekuppelten Zustand nicht erlauben, bzw. stark unterschiedliche Beschleunigungs- bzw. Verzögerungswerte müssen berücksichtigt werden.
- Unterschiedliche Zugsicherungssysteme bzw. Softwarestände (z. B. ETCS-Baselines) könnten ein Hindernis sein.
- Unterschiedliche Vorschriften für Zug- und Druckkräfte (unterschiedliche Baujahre und daraus resultierend abweichende zugrunde liegende Normenstände) sowie unterschiedliche Anforderungen an Fahrgastwechselzeiten, die durch die Anzahl an Türspuren pro Wagenlänge beeinflusst werden, könnten einer sinnvollen Kupplung entgegenstehen.

Bei einer konkreten Untersuchung eines Anwendungsfalles für die Kupplung von Bestandsfahrzeugen sind diese Punkte ebenso einzubeziehen wie die technische Kuppelbarkeit. Beispielhaft sind in Abbildung 9 die Fahrzeuge der Kuppelbarkeitsmatrix hinsichtlich einer betrieblichen Kuppelbarkeit dargestellt. Alle Fahrzeuge weisen eine Einstiegshöhe auf, die ein Halten an Bahnsteigen zwischen 0,38 und 0,76 Metern ermöglicht. Fast alle Fahrzeuge sind kürzer als 100 Meter, lediglich die langen FLIRT-Varianten und der Desiro HC sind über 100 Meter lang (grau). Diese Fahrzeuge sind an einem beispielhaft betrachteten 210 Meter langen Bahnsteig nur bedingt sinnvoll kuppelbar (orange schraffierte Felder in der Matrix). Alle anderen Diesel- und Elektrotriebzüge könnten trotz unterschiedlicher Höchstgeschwindigkeiten jeweils gekuppelt werden (grün). Lediglich die Kombination aus Diesel- und Elektrotriebzug bedingt möglicherweise Probleme wegen unterschiedlich starkem Beschleunigungsverhalten (gelb).

4 Betriebliche Gesichtspunkte und Fahrzeugeinsatz

4.1 Einführung

Die Multikuppelbarkeit (MKB) wird in diesem Projekt definiert als eine universale Kuppelbarkeit von Fahrzeugen des Schienenpersonennahverkehrs (SPNV) in Deutschland. Dabei können sämtliche Fahrzeuge universell miteinander gekuppelt und gemeinsam im Zugverband im Fahrgastbetrieb verwendet werden ohne Beachtung bisheriger einschränkender Randbedingungen wie Abweichungen bei Baureihe, Antriebsart oder Netzzugehörigkeit. Des Weiteren beinhaltet eine MKB im Sinne dieses Projekts eine gekuppelte Verbindung zwischen zwei Triebwagen bzw. -zügen mit Informationsaustausch und gegenseitiger Steuerungsmöglichkeit (Daten- und Informationsübertragung). Bei modernen Triebzügen werden zahlreiche Daten und Informationen zwischen den Zügen ausgetauscht, um die Grundfunktionen des Fahrens und Bremsens sicherzustellen sowie einen sicheren Betrieb zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 2.4). Dazu gehören Aspekte wie die Steuerung und Regelung der Antriebe und Bremsen, Notbefehle sowie Informationen zur Zugvollständigkeit. Beim Betrieb in Mehrfachtraktion dient die Kupplung dabei als zentrale Schnittstelle zwischen den Fahrzeugen. Die Sicherheit steht im Bahnverkehr traditionell an erster Stelle. Die jeweiligen Systeme sind deshalb stets so ausgelegt, dass sie zur sicheren Seite hin reagieren müssen. Dementsprechend werden hohe Anforderungen an moderne automatische Kupplungen im Schienenverkehr gestellt. Dies hat auch Auswirkungen auf eine angedachte MKB, da das aktuelle Sicherheitsniveau bei der Kupplung von Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller und Baureihen nicht unterschritten werden darf. Die bereits in Abschnitt 2.5 aufgeführte Auflistung der übertragenen Signale bietet einen Überblick über die grundlegenden Funktionen, die während des Fahrbetriebs zwischen den Fahrzeugen harmonisiert bzw. ausgetauscht werden müssen.

In der aktuellen Situation ist die Nutzung einer MKB nur sehr eingeschränkt möglich. Bei aktueller minimaler Ausprägung können Fahrzeuge i. d. R. innerhalb derselben Baureihe und mit demselben Softwarestand kuppeln. Bei aktueller maximaler Ausprägung können zwei Fahrzeuge unterschiedlicher Baureihen vom selben Hersteller und aus ähnlichem Jahrgang bzw. Modelljahr, aber von unterschiedlichen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), miteinander kuppeln (z. B. gemeinsame Traktion der luxemburgischen Eisenbahnen (CFL) und DB Regio zwischen Trier und Koblenz [33–35]). Ziel dieser Studie ist es, wesentliche technische und betriebliche Hindernisse aufzuzeigen, die der Einführung einer MKB bei SPNV-Fahrzeugen im deutschen Markt entgegenstehen würden. Gleichzeitig soll dargelegt werden, wie diesen begegnet werden kann.

Für die Bewertung der Dringlichkeit einer verbesserten MKB sind sowohl die Nachteile einer nicht vorhandenen MKB im aktuellen Betriebsgeschehen als auch die Potenziale eines Betriebs mit vollständiger MKB und den dadurch ermöglichten Veränderungen der Betriebsverfahren zu analysieren. Zusätzlich werden in diesem Kapitel Herausforderungen und Parameter erfasst, die aus betrieblicher Sicht die Einführung einer MKB erschweren oder begünstigen.

4.2 Betriebliche Nachteile ohne Multikuppelbarkeit

In der aktuellen Fahrzeugbeschaffungs- bzw. -herstellungspolitik ist eine MKB nicht generell vorgesehen und kann daher betrieblich nicht vorausgesetzt werden. Im Extremfall ist eine Kuppelbarkeit nicht

einmal zwischen Zügen derselben Produktfamilie eines Herstellers aus unterschiedlichen Baujahren gegeben oder nur mit großen Aufwänden herstellbar (vgl. Abschnitt 3). Die Gründe hierfür sind vielfältig:

- Es fehlt ein einheitlicher Standard für die Fahrzeugleittechnik bzw. die Grundfunktionen der Fahrzeugleittechnik (u. a. Fahren, Bremsen, Notruf, Beleuchtung, elektrische Energieversorgung, Fahrgastinformation) und die dafür zu übertragenden Informationen.
- Es fehlt ein einheitlicher Standard für die Pinbelegung an der im Regionalverkehr weitestgehend etablierten Scharfenbergkupplung Typ 10.
- Die Aufgabenträger fordern eine MKB und die damit einhergehende Einhaltung von Standards bislang nicht ein. Es existiert bis heute auch kein Stufenplan hin zu einem einheitlichen Standard für die MKB.
- Die Fahrzeughersteller können durch Verschluss, Anpassung bzw. Ausgestaltung ihrer proprietären Kupplungssysteme einen Lock-in-Effekt erzeugen. Das bedeutet, dass Kunden (z. B. Aufgabenträger) gezwungen sind, Folgebestellungen bei demselben Hersteller aufzugeben, wenn eine MKB der neuen Züge mit der Bestandsflotte gewünscht ist.

Für die Fahrzeugbeschaffung ergeben sich daher Nachteile auf mehreren Ebenen. Mangels Standardisierung ist die Herstellung einer teilweisen MKB für eine neue Fahrzeugfamilie mit Zusatzkosten durch das notwendige Engineering verbunden. Mangels konkreter Migrationsvorgaben können Hersteller, Zulassungsbehörden und EVU keine Pläne für eine Umstellung bestehender Fahrzeuge und für Neuvergaben erstellen.⁴ Vor allem aber schränkt die fehlende MKB die Möglichkeiten von Aufgabenträgern und EVU bei der Erweiterung ihres Fuhrparks stark ein, da eine MKB mit Fahrzeugen anderer Hersteller als demjenigen der Bestandsflotte kaum realisierbar ist. Im drastischsten Fall tritt der oben beschriebene Lock-in-Effekt ein, bei dem eine Ausschreibung mit geforderter MKB nur durch den Hersteller der Bestandsflotte erfüllt werden kann, sodass die erhofften positiven Effekte eines Wettbewerbs ausbleiben. Selbst bei Fahrzeugen eines Herstellers kann die nachträgliche Herstellung einer MKB mit Bestandsfahrzeugen mit so großen Aufwänden verbunden sein, dass aus Kostengründen darauf verzichtet wird (z. B. angestrebte Kuppelbarkeit der DB-BR 407 und 408 [37, 38]).

Zusätzlich wird die Etablierung eines nachhaltigen Gebrauchtfahrzeugmarktes durch eine fehlende MKB erschwert, weil ältere Fahrzeuge nicht zusammen mit Nachbestellungen einsetzbar sind.

Auch für den Fahrzeugeinsatz im täglichen Betrieb ergeben sich aus der fehlenden MKB erhebliche Nachteile. Eine Stärkung von Zügen im Fall unvorhergesehener Nachfragespitzen, bspw. bei Großveranstaltungen oder als Folge von Bautätigkeiten bzw. Baufahrplankonzepten, ist nur mit identischen oder entsprechend kompatiblen Einheiten möglich. Dasselbe gilt bei Fahrzeugausfällen oder im Falle von Ersatzverkehren für Fahrzeuge, die nach Streckensperrungen eingeschlossen sind (vgl. eingeschlossene Triebwagen der DB-BR 620/622 aus dem Vareo-Netz aufgrund der Flutkatastrophe in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz im Juli 2021 [39]). Selbst wenn Fahrzeuge eines anderen Teilnetzes desselben EVU verfügbar sind, können diese daher oftmals nicht genutzt werden. Somit müssen für jedes Teilnetz eigene Fahrzeugreserven vorgehalten werden, was zum einen unnötige (und nicht nutzbare) Redundanzen erzeugt und zum anderen angesichts knapper Kostenrahmen nicht immer in ausreichendem Maß umgesetzt werden kann. Umgekehrt hat dies auch wieder eine Auswirkung auf die Fahrzeugbeschaffung, die durch eine unnötig vergrößerte Fahrzeugreserve verteuert wird.

Sowohl im Zulauf auf größere Bahnhöfe als auch beim Verlassen dieser, insbesondere bei Taktknoten des geplanten Deutschlandtaktes 2030, aber auch an sonstigen Streckenengpässen, kommt es häufig zu

⁴ Bspw. wurde zur Minderung des Schienenverkehrslärms ab Dezember 2020 durch den Bund bzw. im Auftrag des BMDV (bis 2021 BMVI) ein (faktisches) Fahrverbot für zu laute Güterwagen im deutschen Schienennetz erlassen [36]. In ähnlicher Form könnte im Sinne der Einführung einer MKB eine Verpflichtung für Fahrzeughalter bzw. EVU stehen, eine MKB für Neufahrzeuge sowie aktuell eingesetzte Bestandsfahrzeuge umzusetzen.

Kapazitätsreduktionen aufgrund dichter Zugfolgen. Diese Beanspruchung wird auch hervorgerufen, wenn mehrere kurze Züge unterschiedlicher Linien mangels MKB separate Trassen belegen, statt unter Ausnutzung der insbesondere in großen Bahnhöfen oft größeren Bahnsteiglängen als ein gekuppelter Zugverband zu verkehren. Weiterhin sind die Möglichkeiten für Liniendurchbindungen und -verknüpfungen bei der Neugestaltung von ausgeschriebenen Teilnetzen oft stark eingeschränkt, da Bestandsfahrzeuge aus vorangegangenen Ausschreibungen nicht miteinander kuppelbar sind.

4.3 Betriebliche Potenziale der Multikuppelbarkeit

Durch eine vollständig umgesetzte MKB ergeben sich unterschiedliche Potenziale, je nachdem, auf welche Art die Betriebsdurchführung die neuen Möglichkeiten nutzt. Die direkte Folge ist ein freizügigerer Fahrzeugeinsatz: Sowohl im Planbetrieb als auch bei Abweichungen von diesem können Fahrzeuge unterschiedlicher Baujahre und Hersteller miteinander kombiniert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass unterschiedliche Fahrzeuge einander ersetzen können (z. B. strecken-, netz- oder auch bundesländerübergreifend). Gerade im Fall von Unfallfahrzeugen ist ein schneller Ersatz durch ein beliebiges Alternativfahrzeug selten möglich, ohne bspw. fahrplanmäßig vorgesehene Doppeltraktionen aufzulösen. Auch bei wirtschaftlichen Schwierigkeiten von EVU (mit plötzlicher Einstellung kompletter SPNV-Linien [40, 41]) kann eine MKB den Vorteil bieten, Ersatzverkehre schneller und reibungsloser zu organisieren, anstatt aufwendige und kostenintensive Ersatzzugkonzepte umsetzen zu müssen.

Andere Potenziale erhöhen die Flexibilität bei der Betriebsplanung und schaffen erst dadurch konkrete Vorteile. Durch die MKB können trassensparende Linienführungen durch die Kombination mehrerer Linienäste zu einem gemeinsamen Zugverband auf den hochbelasteten Kernstrecken und im Zulauf auf große Knoten realisiert werden, die die Kapazität einer Strecke bei gleichem Sitzplatzangebot erhöhen (siehe Abbildung 10). Bei vielen hochbelasteten Korridoren kann es der Fall sein, dass ein Angebotszuwachs erst durch eine MKB umsetzbar wird, weil sonst keine weiteren Trassen für den SPNV vorhanden sind.

Zwei unterschiedliche Zugfahrten von zwei verschiedenen Zulaufstrecken können miteinander kuppeln und in Richtung Großknoten starten, anstatt wie üblich auf einen Zug aus gleichem Netz bzw. von gleicher Bauart warten zu müssen bzw. separat in Einzeltraktion trassenbelastend starten zu müssen. Mehrere SPNV-Linien können sich bereits im Zulauf auf große Knoten an kleineren Bahnhöfen treffen und ihre Fahrt in Richtung Taktknoten anschließend gekuppelt fortsetzen. Während dies heutzutage nur selten im Rahmen von koordinierten Flügelzugkonzepten geschieht, ist es mit einer vollständigen MKB auch zwischen Zügen unterschiedlicher Teilnetze, unterschiedlicher Zuggattungen und sogar unterschiedlicher Traktionsarten denkbar (z. B. traktionsübergreifende Kupplung von EMU + DMU oder EMU + BEMU/XEMU).

Abbildung 10 zeigt die Möglichkeiten zur Führung zweier Linien im Zulauf auf einen Taktknoten.

Damit auch Fahrgäste der Nebenstrecke (hier: RB) den Taktknoten erreichen, ist es notwendig, dass beide Linien in ähnlicher Zeitlage verkehren. Option 1 beschreibt den Fall, bei dem die RB an dem Bahnhof endet, an dem sie auf die Hauptstrecke trifft. Die Reisenden müssen in den Zug der Hauptstrecke (hier: RE) umsteigen, was in einem nachgelagerten Schritt den Komfort verringert und die Möglichkeit von Anschlussverlusten birgt. Alternativ kann die RB zeitlich kurz vor dem RE verkehren, um ebenfalls rechtzeitig am Taktknoten anzukommen. Hierdurch wird eine zweite Trasse beansprucht, ohne dass ein deutlicher Mehrwert auf der Hauptstrecke entsteht, da keine signifikante Taktverdichtung entsteht (Abbildung 10, Option 2). Schließlich ergibt sich mit einer MKB die Möglichkeit, auch artfremde Fahrzeuge, also z. B. kleine BEMU auf der RB und große EMU auf der RE, miteinander zu kuppeln, wodurch beide

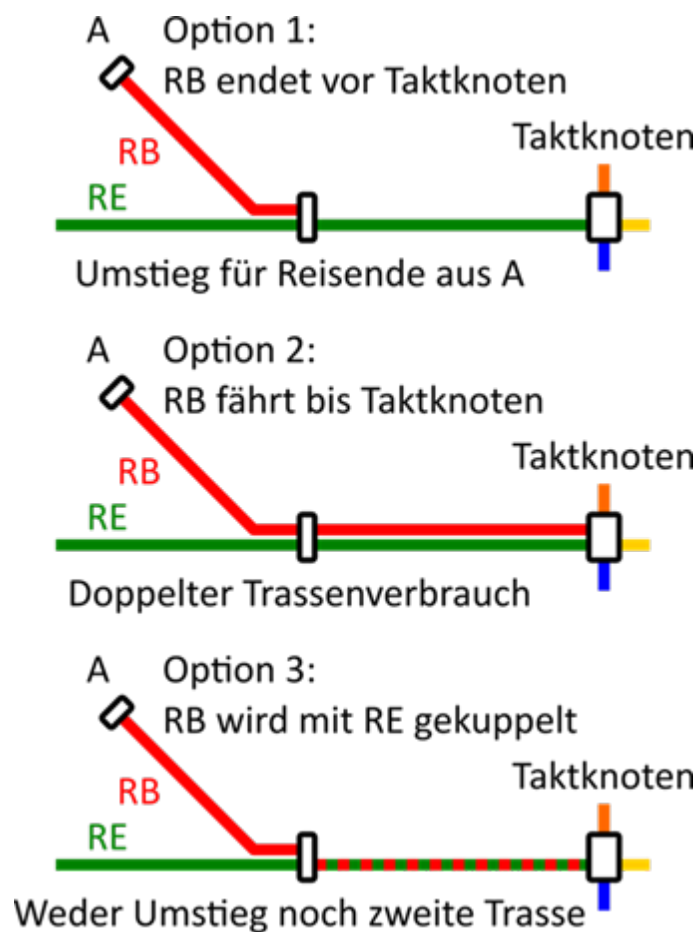


Abbildung 10: Führungsmöglichkeiten zweier Linien im Zulauf auf einen Taktknoten

Züge gemeinsam in den Knoten geführt werden können. Somit werden weder der Umstieg nötig noch zusätzliche Trassen verbraucht (Abbildung 10, Option 3). Allerdings müssen die Auswirkungen auf die Standzeit beim Kuppelvorgang und die Pünktlichkeit betrachtet werden (siehe Kapitel 6). Des Weiteren gibt es auch Streckenabschnitte, auf denen die RB-Linie generell bis in den Knoten durchgebunden ist. In diesen Fällen wird sich die Umsteigesituation zwar nicht weiter verbessern lassen, allerdings kann durch Anwendung der MKB die Trassenbelegung des Streckenabschnitts verringert werden (Abbildung 10: Option 2 ohne MKB, Option 3 mit MKB). Ähnlich gelagerte Szenarien werden in Abschnitt 6 näher untersucht.

Die MKB bietet daher die Möglichkeit, Streckenäste mit geringerem Fahrgastaufkommen umsteigefrei bis in die Knoten durchzubinden, wo heute oft ein Umstieg in einen Zug der Hauptstrecke notwendig ist. Des Weiteren ist denkbar, dass zwei in Konflikt stehende Trassenanfragen zweier Nahverkehrslinien auf dem betreffenden Engpassabschnitt gemeinsam geführt werden können. Ebenfalls kann im Fall von Verspätungen (ausreichende Bahnsteiglängen und Fahrzeitpuffer vorausgesetzt, siehe Abschnitt 4.4) ein Zugteil spontan an einen anderen Zug gekuppelt werden, der bis zum nächsten Bahnhof auf demselben Linienweg verkehrt. Dies spart neben Streckenkapazität auch die Belegung einer Bahnsteigkante an den gemeinsam befahrenen Stationen ein, was bei überlasteten Knoten in größeren Agglomerationsräumen ohne einfache Ausbaumöglichkeit von besonderer Bedeutung ist. Diese Effekte werden in Kapitel 6 quantitativ untersucht.

Durch die Führung zweier Einzelzüge als Zugverband wird unter Umständen je nach den örtlichen Gegebenheiten zusätzlich Fahrpersonal eingespart, was angesichts der aktuell angespannten Arbeitsmarktsituation in der Branche Kosten und Ausfälle reduzieren kann. Durchbindungen von in Knoten endenden Linien können vereinfacht werden, da Fahrzeuge unterschiedlicher Teilnetze in einem gemeinsamen Fahrzeugpool betrieben werden können. Durch unterschiedliche Nachfrageprofile tritt der Spitzenbedarf an Fahrzeugen nicht zwingend auf allen Linien gleichzeitig ein, was es im Fall einer MKB ermöglicht, Verstärkerleistungen auf mehreren Linien mit denselben Verstärkerfahrzeugen zu erbringen, die an Taktzüge der entsprechenden Linien angekuppelt werden.

4.4 Herausforderungen für die Nutzung der Multikuppelbarkeit

Angesichts der qualitativ beschriebenen Potenziale (vgl. Abschnitt 4.3) und vermiedenen Nachteile (vgl. Abschnitt 4.2), die eine MKB mit sich bringt, drängt sich die Frage nach möglichen Herausforderungen auf, die eine MKB bisher verhindert haben. Diese sind technisch, regulatorisch oder betrieblich zu lösen, bevor die beschriebenen Potenziale vollständig genutzt und die in Abschnitt 4.2 angeführten Nachteile einer fehlenden MKB vermieden werden können.

Bisher gibt es wenige positive Beispiele einer baureihen- und EVU-übergreifenden Kuppelbarkeit, von denen konkrete Erfahrungen zur MKB abgeleitet werden könnten. Zu nennen ist hier der gemeinsame Betrieb von unterschiedlichen Fahrzeugen des Herstellers Stadler (CFL-KISS 1, Baureihe (BR) 23xx und DB-FLIRT 3, BR 0429) durch die Luxemburgischen Eisenbahnen (CFL) und DB Regio Rheinland-Pfalz zwischen Trier und Koblenz [33–35]. Entscheidend für die Umsetzbarkeit vereinigter Zugläufe ist das Vorhandensein ausreichender Bahnsteig- und Gleislängen sowie der für die Vereinigung von zwei Zügen nötigen Ausrüstung. Dies betrifft sowohl die Sicherungstechnik (bspw. Fahrstraßen, Signalisierung, Durchrutschwege) als auch die Reisendenlenkung und -information.

Falls ein entsprechendes Kupplungsgleis existiert, müssen die durch den Kupplungsvorgang verlängerten Haltezeiten in der Fahrplankonstruktion und (im Fall dispositiver Eingriffe) in der Betriebsdurchführung berücksichtigt werden. Zusätzlich ist die Einfahrgeschwindigkeit des zweiten Zugteils in ein besetztes Gleis je nach genutztem Zugsicherungssystem mehr oder weniger eingeschränkt, was die Fahrzeit weiter erhöht (Einfahrt in Gleis mit Zwischensignal ohne Durchrutschweg, siehe Abbildung 11). Der freizuhaltende Durchrutschweg (D-Weg) hinter einem Ausfahr- bzw. Zwischensignal ist abhängig von der Einfahrgeschwindigkeit in das Gleis, an dem sich das betreffende Signal befindet [42–44]. Für die Schaffung einer erhöhten Kapazität auf hochbelasteten Strecken ist es daher nötig, dass die verringerte Einfahrgeschwindigkeit keine negativen Folgen für die Mindestzugfolgezeit im Streckenabschnitt vor dem Kupplungsbahnhof hat. Zudem ist die Dauer der Gleisbelegung des Bahnhofs in Form von Haltezeiten zu begrenzen.

Es ist aus dem aktuellen Betriebsgeschehen [45] bekannt, dass die fahrplanmäßige Vereinigung zweier Zugläufe die Verspätungen beider Züge aufeinander überträgt. Da für gewöhnlich nur eine triebfahrzeugführende Person für die Weiterfahrt verfügbar ist und somit zwingend auf den zweiten Zug gewartet werden muss, wird die Zuverlässigkeit solcher Konzepte beeinträchtigt. Alternativ ist eine Dienstbereitschaft von triebfahrzeugführenden Personen an betrieblich relevanten Knotenpunkten denkbar, und zwar dort, wo ein Stärken und Schwächen von Triebzügen durchgeführt wird. Allerdings ist das Vorhalten einer solchen Personalbereitschaft sehr kostenintensiv bei nur seltenem Nutzen und wirtschaftlich daher kaum darstellbar. Neben Maßnahmen zur Steigerung der Pünktlichkeit im Zulauf auf den Kuppungspunkt kann diesem Effekt dadurch entgegengewirkt werden, dass es eine MKB (wie in Abschnitt

4.3 beschrieben) ermöglicht, einen verspäteten Zugteil an einen später folgenden anderen Zug zu kuppeln, statt den ersten Zugteil warten zu lassen. Bspw. kann eine verspätete RB an einen folgenden RE gekuppelt werden, solange die Bahnsteige an den Haltestationen ausreichend lang sind.

Darüber hinaus werden an die Bahnstufinfrastruktur im Bereich des Bahnsteiggleises weitere Anforderungen gestellt, damit eine MKB ermöglicht werden kann. Dazu gehört zunächst die Bahnsteighöhe. Unterschiedliche Einstiegshöhen erfordern ggf. ein exaktes Halten an extra dafür modifizierten Bahnsteigen mit unterschiedlichen Höhen. Dadurch kommt es zu einer Einschränkung der universellen Nutzbarkeit des Kuppelbahnsteigs für herkömmliche Züge. Der Bogenradius des Bahnsteiggleises muss ausreichend groß sein, sodass ein Kuppeln in allen notwendigen Abschnitten möglich ist. Ferner muss die Neigung des Bahnsteiggleises ausreichend klein sein, sodass ein Kuppeln in allen erforderlichen Abschnitten umsetzbar ist. Die Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) spezifizieren hierfür im europäischen Anwendungsbereich eine Neigung von maximal 2,5 Promille an Bahnsteiggleisen, an denen regelmäßig Fahrzeuge angehängt oder abgekuppelt werden [46]. Größere Neigungen können zu Problemen führen, wenn Zug 2 sich zwecks Kuppelvorgang langsam von hinten nähert und in Richtung des stehenden Zuges 1 fährt. Falls Zug 1 sich nun unbeabsichtigt rückwärts in Richtung von Zug 2 in Bewegung setzt (aufgrund Gefälle in Richtung von Zug 2, sogenannter „Entroll-Vorfall“), kann es beim Zusammenstoß bzw. Zusammenkuppeln der beiden Triebwagen aufgrund der erhöhten Kuppelgeschwindigkeit zu Beschädigungen an den beiden Kupplungen und ggf. zu weiteren (Personen-)Schäden kommen. Schließlich soll die Länge des Bahnsteiggleises ausreichend dimensioniert sein, sodass das Kuppeln zweier längerer Einheiten problemlos möglich ist.

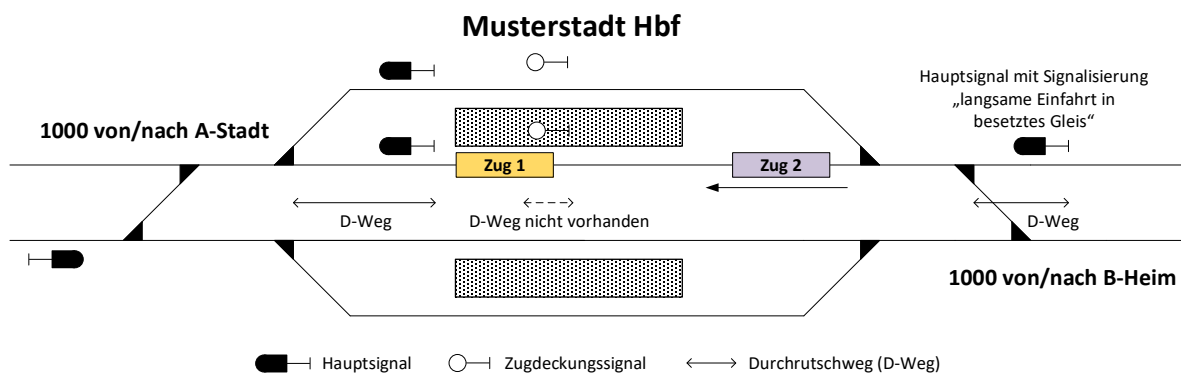


Abbildung 11: Spurplanskizze zur Einfahrt in ein besetztes Gleis (reduziertes Format, eigene Darstellung in Anlehnung an Nr. [42–44])

Das Halten von mehreren SPNV-Zügen hintereinander an einem Bahnsteig würde bei konsequenter Anwendung der MKB vermutlich zum Regelfall werden. Dies hätte u. a. den Vorteil, dass Fahrgäste für einen Umstieg in andere Richtungen ggf. den Bahnsteig nicht wechseln müssen. Des Weiteren ist es begünstigend für die Etablierung des Deutschlandtaktes, da so weniger Bahnsteiggleise in einem Taktknoten zur Taktzeit belegt werden. Allerdings kann es bei den Fahrgästen auf dem Bahnsteig zu Unsicherheiten bei der Wahl des korrekten Einstiegs führen. Hier sind zum einen eine optimierte Haltegenauigkeit und zum anderen verbesserte Anzeigeconzepte erforderlich, um die Fahrgäste an die korrekte Halteposition ihres Zuges zu leiten.

Ein Standard für die MKB sollte außer den Grundfunktionen des Fahrbetriebs (wie Antrieb, Bremsen, Notbefehle, Zugschluss, siehe auch Abschnitt 2.5) zudem elektronische Komfortfunktionen wie die Innenbeleuchtung oder das Fahrgastinformationssystem ansteuern können, um nicht nur einen notfallmäßigen, sondern einen vollwertigen Einsatz der MKB zu ermöglichen. Dies stellt durch die schwere

Vorhersehbarkeit zukünftiger Entwicklungen in diesem Bereich hohe Anforderungen an die Formulierung eines zu etablierenden Standards. Neben der informationstechnischen Standardisierung der Pinbelegung einer MKB-fähigen Kupplung müssen weitere Randbedingungen wie die Kupplungshöhe und die Auslenkung in engen Bögen definiert werden.

Es ist ferner zu untersuchen, wie sich die Kupplung unterschiedlicher Fahrzeugtypen auf das Fahrverhalten des Zugverbandes auswirkt. Dies betrifft vorrangig Fahrzeuge mit unterschiedlichem Antriebstyp, aber auch stark unterschiedlich motorisierte Fahrzeuge desselben Antriebstyps. Ggf. kann hier auf bestehende Standards für die Fahrzeugsteuerung zurückgegriffen werden, die bereits zwischen gleichartigen Fahrzeugen die Abstimmung von Antrieb und Bremsen sowie die Aufteilung von steuernder und folgender Einheit („Primary“ und „Secondary“) koordiniert.

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit eines Zugverbandes bemisst sich gleichwohl an der jeweils minimalen Höchstgeschwindigkeit der vereinigten Zugteile, weshalb es vorkommen kann, dass durch die kapazitätssteigernde Kupplung die Fahrplangeschwindigkeit eines vormals schnellen Zuges sinkt, was Effekte auf die Zugfolgezeiten im weiteren Verlauf haben kann. Die Höchstgeschwindigkeit moderner Nahverkehrszüge ist relativ homogen. Dennoch kann im Falle der Kupplung eines 120 km/h schnellen Zuges (z. B. BEMU) an einen 160 km/h schnellen Zug zusammen mit unterschiedlichen Beschleunigungs- und Bremsleistungen der Nutzen einer MKB bei längerer gemeinsamer Fahrt mit geringerer Geschwindigkeit (hier 120 km/h) reduziert werden.

Um die Investitionen in eine MKB seitens Behörden, Herstellern, Aufgabenträgern und EVU zu rechtfertigen, muss ein zeitnaher wirtschaftlicher Vorteil entstehen. Dies wird durch eine Möglichkeit, Bestandsfahrzeuge in die MKB einzubeziehen, stark erleichtert. Hierfür sind Adapter bzw. Konverter denkbar, die aus der individuellen Kupplungssystematik der Fahrzeuge eine standardisierte Kupplung gemäß der MKB erzeugt. Allerdings sind die damit verbundenen technischen Aspekte und Fragen des Zulassungsaufwands zu klären.

Neben technischen Herausforderungen sind organisatorische Hürden zu überwinden. So müssen die betrieblichen Abläufe für die Aufgabe „Kupplungsvorgang durchführen“ zwischen den Baureihen harmonisiert werden, damit eine MKB auch einen flexiblen Personaleinsatz ermöglicht. Andernfalls wird die notwendige Qualifikation zur Durchführung des Kupplungsvorgangs einen Wechsel der Fahrzeuge je nach Personal einschränken. Die Bedienung des Kupplungsvorgangs auf dem Führerstand kann je nach Baureihe variieren. Zudem haben viele Triebfahrzeugführende nur begrenzte Baureihenberechtigungen.

Ebenso ist für eine Nutzung der Potenziale zu diskutieren, ob der Kupplungsvorgang insgesamt vereinfacht werden kann, sodass er durch eine einzige Person durchführbar ist. Üblicherweise muss momentan eine Person je Fahrzeug anwesend sein [47], sowohl bei Zug- und Rangierfahrten und insbesondere auch bei Zugfahrten, die mit Fahrgästen besetzt sind. Es muss stets eine Person direkt an Bord sein, die für die Fahrzeugbewegungen verantwortlich ist.

Zuletzt sind Fragen zum Zulassungsaufwand der MKB, zu Migrationsstrategien und zur Kostenaufteilung zwischen den Stakeholdern zu klären. Diese fallen jedoch nicht unter den betrieblichen Fokus des Projekts und werden daher nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Hinsichtlich des Fahrplans ist es wichtig zu betonen, dass die Fahrplanlagen der einzelnen mittels MKB zu verknüpfenden Linien zueinander passen müssen. Aufgrund von Fahrplanzwängen (bspw. Einhaltung von festen Taktzeiten auf einem Streckenabschnitt bei Überlagerung zweier Linien) kann es vorkommen, dass potenziell für MKB geeignete Linien nicht beliebig kombinierbar sind.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Pünktlichkeit: MKB-Manöver erfordern eine hohe Fahrplanstabilität, sonst funktioniert das Fahrplansystem nicht. Betriebsbedingt kommt es bei einem Fahrplan mit zahlreichen Kuppelmanövern zu Verlusten von einigen Minuten aufgrund des Kuppelvorgangs (längere Standzeiten am Bahnsteig durch Kupplungsprozess, siehe auch Abschnitt 6.5). Dies unterstreicht, dass ein Fahrplan, welcher eine MKB in hoher Frequenz und flächendeckend nutzt, auf eine hohe Pünktlichkeit angewiesen ist, um stabil zu sein.

5 Handlungsempfehlungen für die Beseitigung von Defiziten

Auf Basis der vorhergehenden Arbeitspakete wurden die Defizite und Hemmnisse einer Multikuppelbarkeit vorgestellt und aufgezeigt. Mit den dargestellten Ergebnissen ist eine Datengrundlage geschaffen worden, um eine Beseitigung dieser Defizite anzugehen, was im Folgenden mit einer Handlungsempfehlung geschieht. Im Rahmen dieses Projekts ist es nicht möglich, einen bis ins Detail ausgearbeiteten technischen Standard zu entwerfen. Vielmehr sollen hier Ansätze genannt werden, die in Zukunft tiefergehend weiterverfolgt werden müssen, um einer fehlenden universalen Kuppelbarkeit in Zukunft entgegenzutreten.

Aus den in Abschnitt 2.6 angeführten Defiziten (vgl. Abbildung 4) lässt sich ableiten, dass wirtschaftliche, administrative (rechtliche) und technische Aspekte einer Multikuppelbarkeit aktuell entgegenstehen. Dieses Spannungsfeld muss zukünftig dahingehend durchbrochen werden, dass diese Aspekte bspw. mit der Einführung eines neuen Standards (Norm) soweit relativiert werden, dass das Ziel einer Multikuppelbarkeit erreicht wird. Allerdings dürfen demgegenüber für alle Akteure keine wirtschaftlichen Nachteile entstehen; vielmehr würde eher das Gegenteil der Fall sein, wenn betriebliche Gesichtspunkte mitbetrachtet werden (siehe Abschnitt 6). Die technischen Hemmnisse können durch einen solchen Standard beseitigt werden, ebenso wie administrative Hemmnisse seitens der Fahrzeugausschreibung. Weitere rechtliche Aspekte, v. a. einer universalen Zulassung, müssten separat bewertet werden.

Aufgrund des Spannungsfeldes bietet sich eine Kategorisierung der Defizite an, um diese zu beseitigen:

- Beseitigung administrativer Hemmnisse aufseiten der Aufgabenträger im Rahmen der
 - Fahrzeugbeschaffung (Fahrzeugausstattungs wünsche) sowie der
 - Losvergabe und Verkehrsverträge mit diesbezüglicher Pönale bei Nichterfüllen des Vertrags
- Beseitigung technischer Hemmnisse aufseiten der Fahrzeugkonzeption durch
 - Standardisierung der Funktionalitäten auf Leittechnikebene sowie
 - Standardisierung der Schnittstelle (Kupplung)

Daraus folgt ein Stufenplan, der für die Umsetzung notwendig ist. Dieser umfasst als erste Stufe eine Beseitigung der administrativen Hemmnisse. In einer zweiten Stufe können dann die technischen Hemmnisse angegangen und ein umfassender Standard für die Schnittstelle zwischen den Fahrzeugen erarbeitet werden.

5.1 Beseitigung administrativer Hemmnisse

5.1.1 Analyse von Verkehrsausschreibungen

Wie sich in der Recherche gezeigt hat, werden die meisten Fahrzeuge für speziell ausgeschriebene Netze beschafft und sind dann netzübergreifend i. d. R. nicht kuppelbar. Der Bundesverband SchienenNahverkehr e. V. (ehemals Bundesarbeitsgemeinschaft (BAG) SPNV) hat jedoch „Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren für Mitglieder der BAG-SPNV“ [30] herausgegeben, die u. a. technische Randbedingungen für die Fahrzeuggestaltung enthalten. Diese Empfehlungen wurden von den Autoren gesichtet und hinsichtlich kupplungsrelevanter Funktionen analysiert.

Grundsätzlich sind bei Verkehrsausschreibungen laut Nr. [30] Neu- oder Gebrauchtfahrzeuge möglich. Die Aufgabenträger können neben Triebzügen auch lokbespannte Züge erlauben oder fordern. Es sollte stets eine Mindestfahrzeugreserve von zehn bis 15 Prozent vorgesehen werden und Fahrzeugnachbestellungen können zeitlich begrenzt möglich sein. Dieser letzte Punkt zielt auf die Problematik nicht kuppelbarer Fahrzeuge ab, ohne dies explizit zu erwähnen: Wenn Fahrzeuge in zu großem zeitlichem Abstand zur Ursprungsbestellung nachbeschafft werden, kann deren Zulassung möglicherweise nach neuem Regelwerk erfolgen. Das kann erfahrungsgemäß mit Änderungen an der Fahrzeugtechnik verbunden sein, die eine Kuppelbarkeit dann ausschließen oder zumindest beeinträchtigen würde [E2, E3].

Die Empfehlungen [30] geben weiter vor, dass die Fahrzeuge aktuelle Normen erfüllen müssen und ein universeller Netzzugang erforderlich ist – beides Aspekte, die die allgemeine Zulassung der Fahrzeuge betreffen. In Ausschreibungen dürfen die Besteller Vorgaben zur mindestens erforderlichen Höchstgeschwindigkeit machen. Zur Kapazitätsanpassung dürfen Mehrfachtraktionen möglich sein, wobei die Fahrzeuge „vollumfänglich untereinander kompatibel sein (Türsteuerung, Zugbus, FIS-Daten) [müssen]“ [30]. Dies betrifft wiederum die Kuppelbarkeit, ohne dass explizite Vorgaben zur Ausgestaltung der Kupplung zwischen den Zugteilen genannt werden. Dabei werden in Nr. [30] folgende Hinweise gegeben:

- „Wird eine Mischtraktion z. B. aus Diesel- und E-Fahrzeugen (Triebzüge, Lok-Wagengarnituren) vorgesehen, so ist dies explizit zu fordern. Die oben geforderte Kompatibilität ist bisher i. d. R. nur bei Neubaufahrzeugen des gleichen Herstellers möglich und mit Mehrkosten verbunden.
- Die Nachbestellung baugleicher Fahrzeuge ist infolge von Fahrzeugzulassung und gesetzlicher Vorgaben nur in einem begrenzten Zeitraum möglich. Ggf. ist eine Angabe dieses Zeitraums vom Hersteller abzufordern.
- Änderungen der Fahrzeugsoftware können zu vorübergehenden Inkompatibilitäten innerhalb der Fahrzeugflotte führen.“

Hier wird also explizit die Problematik baureihenübergreifend nicht kompatibler Fahrzeuge erwähnt. Womöglich wird auch wegen möglicher erhöhter Kosten vermieden, derartige Kombinationen in Ausschreibungen explizit zu fordern.

In den Empfehlungen [30] finden sich zudem zahlreiche Hinweise dafür und Richtwerte, wie die Fahrzeuge gestaltet werden sollen. Beispiele hierfür sind der Sitzabstand, die Anordnung und Anzahl von Fahrgasttüren, die Erfüllung der TSI PRM usw. Diese Aspekte betreffen aber nicht die Kuppelbarkeit der Fahrzeuge, da sich die Fahrzeuginnenräume individuell gestalten lassen. Einfluss auf die Kuppelbarkeit hat die Türsteuerung, die seitenselektiv und bahnsteiglängenabhängig erfolgen muss. Diese Funktion muss also vom führenden Führerstand auf den geführten Triebzug übertragen werden können. Weitere Funktionen, die über die Kupplung übertragen werden müssen, sind optionale Haltewunsch Tasten und Sitzplatzreservierungen, wobei Letztere auch lokal auf dem Fahrzeug erfolgen können.

Ein wichtiger Punkt ist das Fahrgastinformationssystem (FIS). Zur Ausgestaltung werden zahlreiche Hinweise gegeben. Dies sind u. a. Anzahl, Positionierung und Lesbarkeit von Innen- und Außenanzeigen sowie der Informationen, die hier wiedergegeben werden sollen. Eine automatische wie individuelle Innen- sowie seitenselektive Außenbeschallung müssen möglich sein. Eine selektive Beschallung von Zugteilen bei Flügelung wird gefordert. Einige dieser Aspekte richten sich nach der TSI PRM. Aktuell erfolgt die Steuerung des FIS über das Integrierte Bordinformationssystem (IBIS), das vom führenden Führerstand aus für den gesamten Zug bedient wird. Daher wird die Funktion FIS auch zwischen den Fahrzeugen übertragen, sodass diese Funktion kupplungsrelevant ist.

Als Fahrzeugendkupplung wird bei Triebzügen explizit die SchaKu Typ 10 mit einer Einbauhöhe von 1040 mm \pm 20 mm über Schienenoberkante (SO) empfohlen. Ein automatisches Kuppeln von HL und HBL sowie der elektrischen Kontakte ist vorzusehen. Letzteres muss manuell deaktiviert werden können, um im Abschleppfall Kurzschlüsse zu vermeiden.

Somit sind die wichtigsten Funktionen beschrieben. Außer der Vorgabe, die SchaKu Typ 10 zu verwenden, und einzelne Funktionen wie die Türsteuerung oder das FIS, die über die Kupplung übertragen werden, enthalten diese Empfehlungen keine weiteren Anforderungen. Genaue technische Vorgaben zur Leittechnik der Fahrzeuge gibt es nicht, sodass hier der individuelle Freiraum bei der Konzeption der Fahrzeuge erhalten bleibt. Dies führt unweigerlich zu einer nicht vorhandenen Kompatibilität unterschiedlicher Baureihen untereinander. Da diese Empfehlungen ursprünglich aus Fahrgastsicht geschrieben worden sind [E3], sind derart detaillierte technische Vorgaben nicht enthalten. Aktuell werden die Empfehlungen überarbeitet, sodass die Möglichkeit bestehen könnte, Erkenntnisse aus diesem Projekt dabei einfließen zu lassen wie z. B. genauer spezifizierte Vorgaben zur Kuppelbarkeit [E3].

Neben diesen bundesweit gültigen Empfehlungen hat die Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg mbH (NVBW) ein eigenes Musterfahrzeuglastenheft für Vergabeverfahren herausgegeben [31]. Auch dieses Lastenheft wurde von den Autoren gesichtet und analysiert. Es orientiert sich an den Empfehlungen des Bundesverbands SchienenNahverkehr e. V. (ehemals BAG-SPNV) und weicht nur im Detail davon ab. So wird u. a. eine Videoüberwachung explizit gefordert, was jedoch nicht die Kupplung betrifft. Die Funktionen, die über die Kupplung geführt werden müssen, sind nahezu identisch. Das Lastenheft enthält einige optionale Punkte, die bei Bedarf in Ausschreibungen zur Anwendung kommen können. So kann eine zeitlich befristete Zusage betrieblicher Kuppelbarkeit von Bestandsfahrzeugen mit Nachbestellungen gefordert werden oder eine vollumfängliche Kuppelbarkeit von Neufahrzeugen mit Gebrauchtfahrzeugen nicht erforderlich sein.

Leider existieren keine weiteren öffentlich zugänglichen Lastenhefte für Fahrzeuge seitens der Aufgabenträger. Um sich dennoch einen Überblick über Ausschreibungen und Anforderungen an Fahrzeuge zu machen, wurden Ausschreibungsunterlagen aktuell veröffentlichter Vergabeverfahren gesichtet und hinsichtlich der Anforderungen an Fahrzeuge analysiert.

In diesem Zusammenhang wurden drei Ausschreibungen mit insgesamt sechs zu vergebenden Losen analysiert: die Vergaben des Liniensterns Mühldorf der Bayerischen Eisenbahngesellschaft (BEG) mit vier Losen [48], das Netz Regensburg/Donautal der BEG [49] und das Netz Kinzigtal der Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH (RMV) [50] mit jeweils einem Los. In weiteren Ausschreibungen waren keine Anforderungen an Fahrzeuge öffentlich verfügbar.

Allen Ausschreibungen ist gemein, dass nur sehr wenige Mindestanforderungen an Fahrzeuge gestellt werden. So werden vereinzelt Neufahrzeuge [50] oder spezielle Antriebstechnologien gefordert [48]. Weitere Anforderungen erfolgen zur Sitzplatzkapazität und Erfüllung der TSI PRM. Im Netz Kinzigtal gibt es zudem Anforderungen an das FIS [50]. Außer diesem Aspekt betrifft keine Anforderung die Kuppelbarkeit der Fahrzeuge.

Eine Übersicht relevanter Funktionen hinsichtlich Kuppelbarkeit aus allen analysierten Unterlagen findet sich in Anhang 6.

Die Ausschreibungen decken sich zum Teil nicht mit den in den Empfehlungen [30] angegebenen Inhalten. Nach einem erneuten Interview mit Nr. [E3] ist klar geworden, dass die Empfehlungen des Bundesverbands SchienenNahverkehr e. V. [30] nur als Empfehlungen ohne Bindungscharakter zu sehen sind. Die Aufgabenträger können davon abweichen, wenn für spezielle Netze passende Fahrzeuge gefordert werden. Mit den veröffentlichten Empfehlungen, die zusammen von allen Aufgabenträgern im Bundes-

verband mit ausgearbeitet worden sind, ist aber ein Leitfaden vorhanden, wie Fahrzeuge gestaltet werden sollten. Wünschenswert ist daher, dass diese Empfehlungen Grundlage für Neuausschreibungen sind. In Baden-Württemberg ist mit dem Musterlastenheft [31] ein ähnliches Dokument vorhanden, das für Ausschreibungen zur Anwendung kommt. Dennoch weicht dieses inhaltlich leicht von den Empfehlungen des Bundesverbands SchienenNahverkehr e. V. ab.

Beide Dokumente enthalten keine Vorgaben zur Leittechnik und Ausgestaltung der E-Kupplung, was die kritischen Punkte bei der Multikuppelbarkeit sind. Da die Funktionsbelegung des Wired Train Bus' (WTB) auch nicht genormt ist, sind die Fahrzeughersteller hier frei in ihrer Ausgestaltung. Um eine bau-reihenübergreifende Kuppelbarkeit herstellen zu können, sind daher weitere Schritte hinsichtlich Standardisierung der Fahrzeugschnittstelle Kupplung notwendig.

5.1.2 Lösungsvorschläge

Ein möglicher erster Schritt in Richtung Multikuppelbarkeit auf administrativer Ebene ist, dass in Ausschreibungen zusätzliche betriebliche Vorgaben gemacht werden, die eine netzübergreifende Kuppelbarkeit ausdrücklich wünschen. Dabei könnten die Fahrzeuge losgelöst von etwaigen Netzen beschafft werden und damit einen Pool bilden. Dieser kann dann für die verschiedenen Netze übergreifend eingesetzt werden. Vorteilhaft ist dabei, dass größere Stückzahlen an Fahrzeugen z. B. über Rahmenverträge bei dann niedrigeren Stückkosten beschafft werden könnten. Ein Fahrzeugpool für mehrere Netze bietet auch den Vorteil einer insgesamt niedrigeren Fahrzeugreserve und damit niedrigere Betriebskosten. Fahrzeugausfälle in einem Netz können mit Reservefahrzeugen aus dem Pool ersetzt werden. Alle Fahrzeuge können bspw. dem Land oder dem Aufgabenträger gehören und an die EVU, die den Zuschlag für ein Netz erhalten haben, vermietet werden. So bliebe der Wettbewerb erhalten bei gleichzeitiger Steigerung der Qualität.

Ferner kann durch Verzicht auf eine „vollumfängliche Kompatibilität“ der Fahrzeuge untereinander, wie sie derzeit in den Empfehlungen [30] und dem Lastenheft der NVBW [31] gefordert wird, ein Mehrwert geschaffen werden, wenn die Fahrzeuge betrieblich sicher kuppelbar, aber nicht alle Komfortfunktionen aktiviert wären. Die NVBW nennt dies bereits in ihrem Lastenheft, allerdings nur als Option für einen Betrieb von Neu- und Gebrauchtfahrzeugen [31]. Eine Erweiterung auf alle Fahrzeuge ist wünschenswert, sofern die eingeschränkte Kompatibilität lediglich untergeordnete Komfortfunktionen betrifft.

Ebenso kurzfristig umgesetzt werden kann der Verzicht auf Pönalzahlungen oder zumindest deren Senkung, wenn anstelle eines vertraglich zugesicherten Fahrzeugs wegen dessen Ausfalls ein Ersatzfahrzeug die Verkehre übernimmt. Die Wahrscheinlichkeit, Verkehrsleistungen wegen anfallender Vertragsstrafen durch Verwendung eines anderen Fahrzeugtyps ganz ausfallen zu lassen, wäre damit zumindest verringert. Dies bietet zudem den Anreiz für die Betreiber, Fahrzeuge technisch so zu beschaffen, dass sie netzübergreifend kuppelbar sind. Ein Reservefahrzeug aus dem einen Netz kann dann ein Schadfahrzeug aus dem anderen Netz ersetzen. Aus Fahrgastsicht wäre dies zwar unter Umständen nicht ideal, aber dennoch ein Zugewinn gegenüber einem Zugausfall.

Als längerfristiger Lösungsvorschlag ist ein technisch einheitliches Lastenheft sinnvoll, das für alle Ausschreibungen in Deutschland gilt. In diesem Lastenheft sollten technische Vorgaben hinsichtlich der über die Kupplung zu übertragenden Funktionen gemacht werden. Diese Funktionen können denen in dieser Handlungsempfehlung vorgeschlagenen entsprechen (siehe Kapitel 5.2), wobei das FIS als lokale Funktion auf einem Fahrzeug zu bevorzugen ist, damit dieses nicht über die Kupplung geführt werden muss. Lediglich für Sonderfunktionen müsste eine Lösung gefunden werden, die über zusätzliche Pins, Bussysteme oder über Funk übertragen werden. Sofern in naher Zukunft mit einem Standard (Norm) hinsichtlich der E-Kupplung zu rechnen ist, kann die Erfüllung dieses Standards explizit gefordert werden. Die technische Umsetzung würde sich mit einem Standard deutlich vereinfachen.

5.2 Beseitigung technischer Hemmnisse

5.2.1 Kategorisierung der Funktionen

Aufseiten der Technik ist eine Standardisierung der Schnittstelle essenziell, um eine baureihen- und herstellerübergreifende Kuppelbarkeit zu ermöglichen. Hierzu ist die Ausarbeitung eines Standards erforderlich, was im Rahmen dieses Projekts nicht vorgesehen ist. Vielmehr sollen hier die grundlegenden Funktionen betrachtet werden, die über die Kupplung geleitet werden. Daraus wird abgeleitet, welche dieser Funktionen zwingend über die Kupplung geführt werden müssen und wie viele Pinkontakte dafür notwendig sind. Daraus ergibt sich, wie die E-Kupplung zukünftig standardisiert gestaltet werden kann.

Aus der Analyse der Stromlaufpläne ausgewählter Fahrzeugkupplungen (vgl. Übersicht der zu übertragenden Funktionen in Kapitel 2.4) ergibt sich, welche Funktionen über wie viele Kontakte übertragen werden. Diese wurden in einer Übersicht gruppiert und kategorisiert. Prinzipiell eignet sich eine Kategorisierung der Funktionen hinsichtlich

- Sicherheitsrelevanz,
- Komfortfunktionen und
- Spannungsversorgung/Sammelschiene.

Funktionen mit **Sicherheitsrelevanz** werden derzeit jeweils als einzelne Funktion (separater Pin plus eine Redundanz) über die Kupplung übertragen. Hierzu zählen

- sämtliche Fahrzeugsteuersignale (über ZMS/Bus/Ethernet),
- Fahrtrichtungsstellung und Einschaltverriegelung (Zug aufgerüstet),
- Traktionssperre,
- Hilfsfahrt bzw. Notfahrt,
- Zugidentifikationskontrolle,
- Zug-besetzt-Meldung,
- Türsteuerung und Grünschleife,
- Signale der Schnellbremse/Notbremse und Parkbremse (Federspeicher),
- Kupplungskontrollsignale,
- Federüberwachung,
- Feuer-/Brandalarm sowie
- Beschallung über die UIC-Kabel-Leitungen 1 bis 13 (mit Lücken).

Als Funktionen mit **Komfortcharakter** werden diejenigen Funktionen eingruppiert, die nicht dem sicheren Fahren dienen und nicht unbedingt zentral vom besetzten Führerstand aus bedient werden müssen. Diese Funktionen müssen daher nicht zwingend über die Kupplung geführt werden, sondern die Informationsübertragung und Steuerung der Funktionen kann auch lokal auf dem Fahrzeug erfolgen. Eine Belegung eines Kupplungskontakts ist aber nicht ausgeschlossen, was aktuell auch (noch) so gehandhabt wird. Folgende Funktionen werden hierfür zunächst definiert:

- IBIS inkl. FIS
- Sprechstellen
- Beleuchtungssteuerung
- Vorheizen
- Batteriestatus und -fernbedienung

Die **Spannungsversorgung** bzw. Bereitstellung elektrischer Energie findet via **Zugsammelschiene** über die Kupplung statt. Diese dient u. a. zur zuverlässigen Versorgung auch sicherheitsrelevanter Komponenten bei Ausfall der Spannungsversorgung auf den gekuppelten Fahrzeugen. Je nach Fahrzeugkonfiguration werden 24 V oder 36 V DC über die Sammelschiene geleitet. Zusätzlich gibt es eine Erdung. Daher sind hier enthalten:

- Sammelschiene Niederspannung DC
- Erdung

Aktuell werden die aufgeführten Funktionen über verschiedene Kontakte – zum Teil belegt eine Funktion mehrere Kontakte - mit Redundanz über die elektrische Kupplung übertragen. Für eine sinnvolle Standardisierung der Schnittstelle E-Kupplung folgt nun ein Vorschlag, wie dies ausgestaltet werden könnte. Ferner wird auf die Herausforderungen hinsichtlich einheitlicher Datenprotokolle eingegangen.

5.2.2 Vorschlag für die Gestaltung der Schnittstelle E-Kupplung

Das Ziel ist, alle für den Betrieb zwingend notwendigen Informationen sicher von einem Fahrzeug auf das nächste Fahrzeug zu übertragen. Hierzu eignet sich ein Standard, der definiert, welche Funktion auf welche Art über die E-Kupplung geführt werden kann. Eine detaillierte Ausarbeitung dieses Standards ist im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Hier werden vielmehr die Randbedingungen erarbeitet, die bei der Erstellung berücksichtigt werden sollten.

Bei einem solchen Standard müssten mindestens alle Funktionen, die aktuell über die Kupplung übertragen werden, berücksichtigt sein. Wird hierzu der klassische Ansatz gewählt, dass jede Funktion über mindestens einen separaten Pinkontakt geführt wird, ergeben sich nach einer Analyse von Stromlaufplänen (Anhang 7, [25]) folgende mindestens notwendigen Pinkontakte:

- für die Fahrzeugsteuersignale (Fahren/Bremsen): 13 Kontakte
- für die Notbremsung: zehn Kontakte
- für die Türsteuerung: zwölf Kontakte
- für die Kupplungsansteuerung: drei Kontakte
- für Federüberwachung/Notsenken/Feueralarm: drei Kontakte
- für die Beschallungsanlage über UIC-Leitungen: neun Kontakte
- für die Spannungsversorgung: drei Kontakte
- für die Notrufeinrichtung: ein Kontakt

Das ergibt insgesamt 54 Kontakte. Inkl. einer Redundanz mit dem Faktor 2 sind somit mindestens 108 Kontakte erforderlich. Hinzu kommen noch die Funktionen mit Komfortcharakter:

- für das IBIS-System mit Sprechstellen und FIS: mindestens drei Kontakte
- für Beleuchtungssteuerung und Vorheizen: drei Kontakte
- für den Batteriestatus und die -fernsteuerung: drei Kontakte

Dies sind mindestens neun zusätzliche Kontakte. In Summe ergeben sich also mit einer Redundanz insgesamt mindestens 126 notwendige Kontakte. Für zukünftige Funktionen muss noch eine Reserve vorgesehen werden. Diese Anzahl an Kontakten kann in einem Standard einheitlich gestaltet werden. Damit wäre das Ziel einer standardisiert aufgebauten E-Kupplung erreicht.

Da diese Vorgehensweise aufgrund aktueller Tendenzen zur Digitalisierung jedoch wenig zielführend und zukunftsweisend ist, ist in einem weiteren Schritt nach Alternativen gesucht worden, wie die Anzahl der Kontakte insgesamt reduziert werden kann.

Hierzu bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Zusammenfassung von Funktionen auf einem Bus- oder Ethernet-System
- Übertragung der Funktionen über eine Powerline
- Übertragung der Informationen über Funk

Grundsätzlich ist die Trennung des Physical Layers, also der Hardware, von den Funktionen anzustreben [E12]. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass für zusätzliche Funktionen keine neue Leitung gelegt werden müsste, sondern diese über neue Protokollsequenzen übermittelt werden können. Auf diese Weise wird für eine bestimmte Zeit eine Abwärts- und Aufwärtskompatibilität der zu kuppelnden Fahrzeuge gewährleistet.

Eine Zusammenlegung der Funktionen auf einem Bussystem (oder Ethernet-System) ist ein möglicher Ansatz. Aufgrund der Digitalisierung und die Vielzahl an elektronischen Komponenten auf einem Schienenfahrzeug, die aktuell bereits digital z. B. über den WTB miteinander kommunizieren, liegen die Signale bereits digital vor. Eine fehlende Standardisierung der Datenprotokolle soll hier zunächst ausgeblendet und weiter unten betrachtet werden. Grundsätzlich ist es also möglich und auch sinnvoll, sämtliche Funktionen digital z. B. über einen Bus zu übertragen. Allerdings sind einige Funktionen hoch sicherheitsrelevant (SIL 3 und SIL 4), während aktuell verbaute WTB-Systeme höchstens SIL 2 erfüllen [E9]. Aus diesem Grund werden derzeit nur wenig sicherheitsrelevante Funktionen über einen Bus übertragen. Es gibt jedoch bereits hoch sicherheitsrelevante Bussysteme z. B. in der Luftfahrtbranche, die SIL 4 erfüllen [E9, E12]. Diese sind jedoch im Softwareaufbau deutlich komplexer und erfordern deshalb wesentlich höhere Investitionen [E12, 25]. Aus diesem Grund werden bisherige hoch sicherheitsrelevante Funktionen weiterhin über separate Kontakte geführt, da diese Leitungen die Sicherheitsanforderungen entsprechend erfüllen.

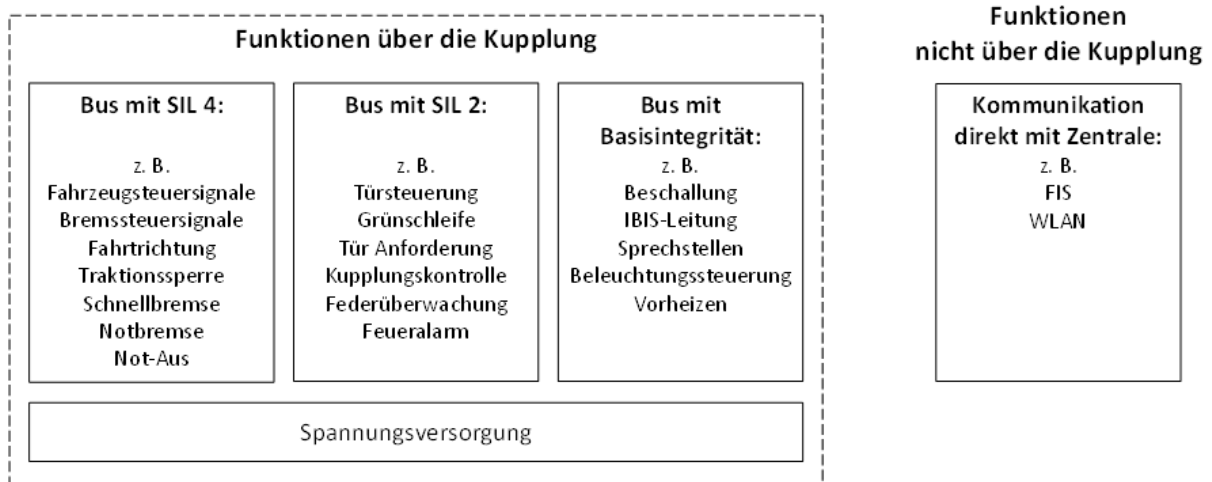


Abbildung 12: Vorschlag für Kupplungskontakte

In diesem Zusammenhang wurden die o. g. Funktionen in Zusammenarbeit mit Voith hinsichtlich ihrer Sicherheitsanforderungen bewertet und in eine SIL-Kategorie eingestuft (siehe Anhang 8). Hierbei zeigte sich, dass die Mehrzahl der Funktionen höchstens SIL 2 erfordert. Lediglich einzelne Funktionen, die die Bremssteuerung betreffen, werden als SIL 3 bzw. SIL 4 bewertet.

Daher bietet sich folgende Umsetzungsmöglichkeit an (Abbildung 12):

- Übertragung hoch sicherheitsrelevanter Informationen wie der Fahrzeugsteuer- und Bremssignale über einen entsprechend sicheren Bus
- Übertragung von weniger sicherheitsrelevanten Informationen wie der Türsteuerung oder der Kupplungskontrolle über einen Bus mit SIL 2
- Übertragung von nicht sicherheitsrelevanten Informationen über einen dritten Bus mit Basisintegrität
- Funktionen, die nicht zwingend über die Kupplung geführt werden müssen, werden lokal auf dem Fahrzeug belassen (wie z. B. das FIS)

Werden für jeden Bus vier Adern vorgesehen, könnte die Zahl der Pinkontakte auf zwölf für die Bussysteme zuzüglich der drei Kontakte für die Spannungsversorgung reduziert werden.

Die Abtrennung der Funktionen von der Kupplung, die nicht zwingend zum Betrieb der Fahrzeuge dienen, ist deshalb ratsam, weil das Infotainment sehr pflege- und wartungsintensiv ist [E12]. Bei Funktionen wie dem FIS finden regelmäßig Aktualisierungen von Informationen z. B. über Baustellenverkehre, Umleitungen und Zugausfälle statt. Außerdem verwenden zahlreiche Betreiber und Verkehrsverbände separate Systeme, die nicht miteinander kommunizieren können und u. a. einen gekoppelten Betrieb nicht ermöglichen (vgl. Kapitel 5.1.1) [E4, E9, E12]. Das erschwert die Etablierung einer standardisierten Schnittstelle, v. a. für Bestandsfahrzeuge. Daher ist es sinnvoll, das FIS und ähnliche Systeme lokal auf dem Fahrzeug zu installieren. Das Fahrzeug kommuniziert dann funkbasiert direkt mit der Leitstelle bzw. Zentrale und bekommt die notwendigen Informationen aktuell aufgespielt. Die Datenpflege erfolgt damit zentral. In der Schweiz setzt die SBB dies bereits um [E12]: Die Fahrzeuge besitzen jeweils einen Router mit SIM-Karte, der über eine Cloud mit der Zentrale die Informationen austauscht. Auf dem Fahrzeug befindet sich ein separates eigenes Netzwerk, an dem u. a. das FIS angeschlossen ist. Über Eingabe der Zug- und Fahrzeugnummern auf dem besetzten Führerstand erhält jedes gekoppelte Fahrzeug zugleich Informationen zu Fahrtziel und Fahrplan, da auch Flügelungen im Fahrplan berücksichtigt werden. Es können so auf jedes der gekoppelten Fahrzeuge die gewünschten Zugziele und -läufe zur optischen und akustischen Fahrgastinformation übermittelt werden. Darüber hinaus bietet das lokale Fahrzeugnetzwerk Vorteile hinsichtlich der Obsoleszenz, da es so ausgeführt ist, dass bestimmte Komponenten frei tauschbar sind. Durch eine Verknüpfung der Bahnhöfe mit der Zentrale können umgekehrt aktuelle Informationen wie bspw. Verspätungen auf die Bahnsteiganzeigen aufgespielt werden.

Neben der Übertragung der Funktionen über Bus- oder Ethernet-Systeme ist auch eine Übertragung über eine Powerline möglich. Dabei werden einer Sammelschiene, die zur Energieversorgung der Wagen dient, Oberschwingungen aufgeprägt, die definierte Informationen übertragen. Jede Funktion besitzt eigene Frequenzbänder, sodass die Funktion eindeutig bestimmt ist. Dieses Prinzip soll bei der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) im Güterverkehr Verwendung finden und ist bereits ausgiebig erprobt worden. Obwohl im Güterverkehr andere Anforderungen an die zu übertragenden Funktionen gestellt werden, kann das Prinzip auch auf Triebzüge des SPNV übertragen werden. Praktisch kann das oben bei den Bussystemen Genannte direkt auf die Powerline übertragen werden. Die Powerline der DAK erfüllt SIL 4 und eignet sich auch zur Übertragung sämtlicher hoch sicherheitsrelevanter Informationen. Als Übertragungsraten sind bis zu 16 Mbit/s möglich, sodass sogar Bilddateien verschickt werden könnten. Somit würde praktisch eine einzelne Powerline zuzüglich einer Erdung ausreichen, um sämtliche für den Betrieb notwendigen Funktionen sicher übertragen zu können. Bei der DAK sind wegen Redundanzen drei Leitungen vorgesehen. Dies wäre auch für Triebzüge des SPNV ein sinnvoller Ansatz [E12].

Als letzte Möglichkeit bietet sich an, die Funktionen über Funk zu übertragen. Ähnlich wie beim Prinzip der virtuellen Kupplung werden die Informationen digital von einem Fahrzeug auf das nächste versendet. Dabei erhält jede Funktion wie bei der Powerline ein eigenes Frequenzband. Durch die Funküber-

tragung muss das Sicherheitsniveau höher als bei Übertragung über Draht eingestuft werden, um ungewollte Zugriffe von außen zu vermeiden (Cyber-Security). Auch muss eine zuverlässige und ununterbrochene Datenübertragung gewährleistet sein. Dies macht das System aufwendig, aber durch den Wegfall von elektrischen Kupplungskontakten interessant. Die mechanische und pneumatische Kupplung der Fahrzeuge soll aber weiterhin konventionell erfolgen.

Die ohnehin vorhandene Luftkupplung kann bei all diesen Konzepten auch als zusätzliche Rückfallebene dienen, da diese bereits als SIL 4 eingestuft ist (zumindest bei Zugverbänden) [25].

Bei der Gestaltung der Schnittstelle E-Kupplung genügt es nicht, nur die Anzahl der notwendigen Kontakte zu definieren. Wegen der auf den Fahrzeugen unterschiedlich ausgeführten Leittechnik müssen zusätzlich die Datenprotokolle in einem Standard definiert werden. Auch dies ist im Rahmen dieses Projekts nicht möglich, sollte aber bei Ausarbeitung des Standards unbedingt berücksichtigt werden.

Zunächst sollte entschieden werden, welcher Physical Layer als Übertragungsmedium verwendet wird, weil dieser die Ausführung und Ausgestaltung der Protokolle bedingt. Anschließend müssen für jede Funktion entsprechende Protokolle entwickelt und definiert werden. Dies muss eng abgestimmt mit den Fahrzeugherstellern erfolgen, da diese den besten Einblick in ihre jeweilige Leittechnikarchitektur besitzen. Sofern sich alle Beteiligten auf eine einheitliche Leittechnikarchitektur einigen, könnte dies Eingang in einen entsprechenden Standard finden. Durch die in den Experteninterviews genannten Vorbehalte bezüglich einer Offenlegung von Firmenwissen wird dies wahrscheinlich nicht erreichbar sein. Daher bietet sich als Lösungsweg an, die Protokolle für die Schnittstelle zu definieren und diese über einen Switch oder ein Gateway mit der Fahrzeugleittechnik zu verknüpfen. Dieser Switch (Gateway) verwendet auf der Kuppelseite die standardisierten Protokolle. Auf Fahrzeugseite werden die Protokolle der jeweiligen Leittechnikarchitektur verwendet. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass das Firmenwissen nicht offengelegt werden muss und dennoch eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen mit unterschiedlicher Leittechnik-Architektur möglich ist. Zusätzlich könnten auch Bestandsfahrzeuge mit einem derartigen Switch (Gateway) ausgestattet werden, sodass dieses Konzept nicht auf Neufahrzeuge beschränkt bleibt.

5.3 Allgemeine Handlungsempfehlungen

Wie beschrieben ist die Thematik der Informationsübertragung zwischen den Zügen hochkomplex, sodass eine finale Ausarbeitung den Umfang dieses Projekts sprengen würde. Daher bedarf es zur Erzielung einer Multikuppelbarkeit weiterer Forschungsaktivitäten, insbesondere die Erarbeitung eines Standards. Hierzu soll als allgemeine Empfehlung ausgesprochen werden, dass die Durchführung von Nachfolgeprojekten unter Koordination einer neutralen Stelle auf Bundesebene mit dem Ziel einer Weiterverfolgung der in Abschnitt 5.2 genannten Lösungsvorschläge initiiert werden.

Für die Standardisierung der Ausschreibeverfahren müssen alle Beteiligten involviert werden. Dies sind alle Aufgabenträger sowie der Bundesverband SchienenNahverkehr e. V. Mit diesen ließen sich die in Kapitel 5.1.2 gemachten Lösungsvorschläge erörtern und ggf. umsetzen. Inwieweit eine Aufweichung der Regionalisierung politisch umsetzbar wäre, müsste ebenso geklärt werden.

Für die Standardisierung der Schnittstelle ist zwingend eine Koordination auf wettbewerbsneutraler Ebene erforderlich. Hier bietet sich die Koordination durch den Bund an. Beteiligte sind zum einen die Aufgabenträger, zum anderen vor allem Betreiber und Hersteller, da diese das fachliche Wissen beisteuern. Wichtig ist die Hinzuziehung von Safety-Experten und Expertinnen, die bei der Bewertung der Sicherheitsanforderungen unterstützen. Alle Akteure zusammen können dann eine Art Normungsgremium bilden, in dem die technische Schnittstelle ausgearbeitet wird.

Schließlich müssen Zulassungsaspekte stets mitberücksichtigt werden, wobei dies parallel zur Ausarbeitung der standardisierten Schnittstelle erfolgen muss. Zu diesem Zweck müssen Zulassungsexperten und -expertinnen auf nationaler und EU-Ebene beteiligt werden. Da eine Multi- oder universelle Kuppelbarkeit bisher im Zulassungsverfahren so nicht vorgesehen ist, erfordert dies ggf. eine Änderung des Rechtsrahmens, mittelfristig also der TSI.

Für die Umsetzung der Maßnahmen wird ein erheblicher Zeitaufwand erforderlich sein.

6 Auswirkungen einer universalen Kuppelbarkeit auf Einsatz und Betrieb

6.1 Vorbemerkungen

Im dritten Teil dieser Studie erfolgt die betriebliche Bewertung und Validierung von ausgewählten Handlungsmöglichkeiten zur Einführung einer MKB, die in den vorherigen Kapiteln diskutiert worden sind. Dazu werden mithilfe von Simulationen und Berechnungen die betrieblichen Auswirkungen der MKB hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Fahrzeugumläufen bestimmt.

In einem ersten Schritt wird die verwendete Methodik vorgestellt. Bei den Betrachtungen kommen sowohl der Fahrplankonstruktionsansatz als auch die analytische Methode zum Einsatz (siehe Abschnitt 6.2). Anschließend wird ein Untersuchungsraum innerhalb des deutschen Schienennetzes definiert (Abschnitt 6.3). Darauf aufbauend werden Szenarien für das sinnvolle Kuppeln von SPNV-Zügen im vorhandenen Liniennetz des Untersuchungsraums festgelegt (Abschnitt 6.4). Dabei werden betriebliche Bewertungsparameter berücksichtigt, bspw. die Größe der Restkapazitäten eines Streckenabschnitts vor und nach der Einführung einer MKB. Aus den gewählten Szenarien ergibt sich eine Unterscheidung in ein Basisszenario, welches keine MKB vorsieht, sowie ein Planfallszenario, welches je nach Anwendungsfall verschiedene Formen einer MKB enthält. In einem separaten Schritt wird betrachtet, welche Auswirkungen eine MKB auf Fahrzeugumläufe und Fahrzeugbedarfe hat (Abschnitt 6.5).

6.2 Methodik

6.2.1 Vorgehensweise

Zur Ermittlung der betrieblichen Auswirkungen einer MKB wird jeweils ein Vergleich mit der Situation ohne eine derartige Kuppelbarkeit hergestellt. Die Ermittlung möglicher Potenziale erfolgt hierbei auf Basis zweier komplementärer Analyseansätze, zum einen auf Basis eines analytischen Ansatzes und zum anderen mittels eines konstruktiven Ansatzes.

Die Grundlage für diese Ansätze bildet in allen Betrachtungsfällen eine fahrdynamische Simulation auf der Grundlage von Wende [51]. Mittels der berechneten Fahrdynamik werden Fahrzeiten in Form von Fahrtrajektorien eines einzelnen Zuges erzeugt. Verknüpft mit eisenbahnbetrieblichen Vorgaben aus der Infrastruktur und der Sicherungstechnik (z. B. Annäherungsfahrzeit, Fahrstraßenbildezeit), werden Sperrzeiten sowie Mindestzugfolgezeiten bestimmt [52].

Hinsichtlich der Angebotsplanung wird anschließend eine asynchrone bzw. synchrone Fahrplanerstellung bzw. -konstruktion im Untersuchungsgebiet vorgenommen. Als Fahrplanbasis wird das zukünftige Konzept des Deutschlandtaktes 2030 zugrunde gelegt. Da in diesem Projekt die generellen Möglichkeiten und Potenziale einer MKB im Vordergrund stehen, wird der Fokus auf die Fahrplanerstellung und nicht auf dispositive Entscheidungen im täglichen Betriebsablauf gelegt. Verspätungen oder dispositive Prozesse spielen demnach bei den Betrachtungen keine Rolle.

Die asynchrone Fahrplanerstellung (vgl. u. a. [53]) bietet die Möglichkeit, die Züge nicht rein zeitschritt-basiert in den Fahrplan einzufügen, wie es beim rein synchronen Vorgehen der Fall ist. Stattdessen erfolgt eine Priorisierung einzelner Zuggruppen bspw. des Schienenpersonenfernverkehrs (SPFV). Dies ist

von Vorteil, da der SPFV in den Szenarien aufgrund seiner überregionalen Abhängigkeiten nicht in seiner ursprünglichen Fahrplanlage beeinträchtigt werden soll.

Anschließend wird auf Basis der aktuell von der DB Netz AG bei der Infrastrukturdimensionierung verwendeten analytischen Modelle die Leistungsfähigkeit der Streckenabschnitte mittels der STRELE-Formel [54] untersucht und mit der im Fahrplankonzept des Deutschlandtaktes ausgewiesenen Personenverkehrsgrundlast verglichen. Wesentlicher Aspekt dieser Methodik ist die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Netzabschnitten mit einem langfristigen Planungshorizont. Da bei der Wahl der analytischen Methodik nach der DB-Konzern-Richtlinie 405 [55] kein explizites Fahrplankonzept, sondern lediglich ein Betriebsprogramm auf Basis von Modellzügen als Eingangsparameter benötigt wird, ist dieser Ansatz besonders geeignet, um Unsicherheiten und Ungenauigkeiten bei der Langfristprognose von Zug- und Fahrplancharakteristika Rechnung zu tragen. Der Ansatz erlaubt eine Untersuchung des Infrastrukturverhaltens, bereinigt um dezidierte Fahrplaneffekte. Zur Untersuchung des Infrastrukturverhaltens zählt die theoretische und optimale Leistungsfähigkeit in Form von möglichen Zugfahrten (vgl. Unterabschnitt 6.2.4). Als dezidierte Fahrplaneffekte sind u. a. die Reihenfolge der durchgeführten Zugfahrten zu nennen. Diese finden bei der Analytik indirekt Eingang in die Berechnung, indem das Auftreten der entsprechenden Zugfolgefälle statistisch berücksichtigt wird (vgl. Unterabschnitt 6.2.4).

Beim konstruktiven Ansatz werden die für die Optimierung des SPNV zur Verfügung stehenden Zeitfenster innerhalb des Fahrplangerüsts identifiziert und in Hinblick auf ihre Belegbarkeit durch die anzuwendenden MKB-Verfahren untersucht. Das Vorgehen erlaubt somit die Analyse der Verfügbarkeit benötigter Zeitfenster. Hierbei wird auf eine zielführende Verteilung der Zugfahrten auf Basis der sinnvollen Zusammenfassung von Linienkonzepten geachtet.

Das Zusammenspiel beider Methoden erlaubt einen detaillierten Blick auf die Kapazitätsnutzung, sowohl in Hinblick auf die zu analysierenden Fahrplanspezifika als auch hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Flexibilität der zugrunde liegenden Infrastruktur innerhalb der definierten MKB-Szenarien. Insbesondere kann hierdurch untersucht werden, ob durch die vorgesehenen Kuppelbarkeitsaspekte eine effizientere Kapazitätsnutzung ermöglicht wird. Des Weiteren lässt der analytische, fahrplanunabhängige Ansatz eine Einschätzung der vorliegenden Betriebsqualität zu. Mithilfe des konstruktiven Ansatzes kann die Beurteilung der Betriebsqualität um einen weiteren Aspekt ergänzt werden. Dies wird durch eine Bestimmung der möglichen Anzahl zusätzlicher Zugfahrten bzw. der identifizierten Zahl zusätzlich konstruierbarer Trassen direkt im Fahrplangefüge erreicht.

Im Anschluss an die Fahrplanbetrachtung wird durch eine Optimierung der Fahrzeugeinsatzplanung überprüft, ob durch Einführung einer MKB eine Reduktion der Fahrzeuganzahl über eine Fahrplananpassung im Fahrplankonstrukt des Deutschlandtaktes erreicht werden kann. Diese Optimierung bezieht auch die zukünftig geplanten Fahrzeugkombinationen aus BEMU- und EMU-Triebzügen sowie möglicher Flügelzugkonzepte im Untersuchungsgebiet (vgl. Szenarien im Abschnitt 6.4) ein. Auf den im Deutschlandtakt identifizierten Linienverläufen des SPNV werden die Möglichkeiten einer MKB berücksichtigt. Mittels Fahr- und Taktzeiten werden die benötigten Fahrzeugumläufe ermittelt und der Fahrzeugbedarf errechnet.

6.2.2 Auswahl geeigneter Parameter zur Untersuchung der betrieblichen Auswirkungen

Um die große Bandbreite von unterschiedlichen MKB-Anwendungen und Rahmenbedingungen auf untersuchbare Aspekte zu reduzieren, werden konkrete Szenarien definiert (siehe Abschnitt 6.4). Zur Bewertung der Auswirkung einer MKB können die folgenden Parameter aus dem Eisenbahnbetrieb zu Hilfe genommen werden, welche im Anschluss kurz erläutert werden. Das zugehörige Vorgehen wird in den nachfolgenden Unterabschnitten in diesem Kapitel ausführlich beschrieben.

Kapazität: Die Kapazität oder auch Leistungsfähigkeit kann als Bewertungsgröße herangezogen werden, indem die zusätzlich vermarktbareren Trassen bzw. gewonnenen Trassenkapazitäten durch die Anwendung der MKB ausgewiesen werden. Als Einheit wird die Anzahl der Zugfahrten verwendet (vgl. Unterabschnitt 6.2.4).

Trassenverfügbarkeit: Mittels der konstruktiven Methodik (vgl. Unterabschnitt 6.2.3) kann überprüft werden, ob die zusätzlichen Trassen konfliktfrei in das bestehende Fahrplangefüge integriert werden. Es wird in diesem Projekt also versucht, die bestehenden Fahrplanlücken durch Anwendung der MKB optimal auszunutzen, ohne das angesetzte Fahrplangefüge des Deutschlandtaktes 2030 zu verändern.

Fahrzeugbedarf durch Umlaufverknüpfungen: Durch die Anpassung von Linienverläufen oder die Durchbindung von Linien (vgl. Abschnitt 6.4) kann es passieren, dass eine höhere Fahrzeuganzahl benötigt wird (vgl. Abschnitt 6.5).

Gleisbelegung: Insbesondere in Bahnhöfen kann der Gleisbelegungsplan als grafische Auswertung verwendet werden. Hierbei werden die Zugfahrten inkl. der benötigten Vor- und Nachlaufzeiten (u. a. Sperr- und Fahrzeiten zum/vom Halteplatz) mit ihrer benötigten Haltezeit eingeplant. Nachfolgend kann überprüft werden, ob die vorliegende Gleisanzahl zum vorliegenden bzw. geplanten Betriebsprogramm passt und es nicht zu Konflikten in Form von Fahrstraßenausschlüssen bzw. Halteplatzüberschneidungen kommt. Eine Anwendung der MKB führt durch den Kupplungsvorgang zu verlängerten Haltezeiten. Es kann aber durch die Verknüpfung mehrerer Linien auch zu einer Reduktion bei der Bahnsteigbelegung kommen (siehe dazu auch Szenario 1, Unterabschnitt 6.4.2).

Es folgt eine Auflistung weiterer Bewertungsansätze, welche jedoch in diesem Projekt zwar diskutiert, aber nicht ausgewertet worden sind.

Häufigkeit und Aufwand von Umstiegen: Durch die Anwendung der MKB kommt insbesondere für die Reisenden die Anzahl der Umstiege als Kenngröße hinzu. Eine Durchbindung von Zugfahrten kann demnach die Umstieganzahl reduzieren.

Wirtschaftliche Aspekte: Zudem kann über Zielkostenberechnungen analysiert werden, ab wann sich ein Kupplungsvorgang wirtschaftlich lohnt. Dies ist jedoch von Strecke zu Strecke und je nach eingesetzten Fahrzeugen unterschiedlich. Dafür müssen Vergleichsszenarien erarbeitet werden und bspw. die längere Fahrzeit durch den Kupplungsvorgang oder auch eingesparte Energiebedarfe o. ä. berücksichtigt werden. Eine vollständige Betrachtung muss Effekte wie Life Cycle Costs (LCC), benötigtes Personal, Werkstattkapazitäten, Trassengebühren, Investitionen in Fahrzeuge usw. einbeziehen.

Fahrgastkapazität: Durch die Anwendung der MKB kann bspw. bei Durchbindungen auf bestimmten Streckenabschnitten eine zusätzliche Fahrgastkapazität gegenüber dem Fall ohne MKB angeboten werden. Dadurch kann insbesondere auf Kernabschnitten im Bereich vor und nach wichtigen Knoten die Fahrgastkapazität gesteigert werden, ohne zusätzliche Trassen zu benötigen.

Für die Modellierung der Szenarien werden die folgenden betrieblichen Parameter benötigt:

Einfahrtsgeschwindigkeit: Diese ist abhängig von der Streckengeschwindigkeit und der Geschwindigkeit, mit der die entsprechenden Weichen befahren werden dürfen. Sie reduziert sich jedoch, wenn in ein belegtes Gleis eingefahren wird (je nach örtlicher und betrieblicher Situation auf 20 oder 30 km/h [43, 44]), sowie für die eigentliche Kuppelfahrt auf zwei bis drei Stundenkilometer.

Fahrzeuggeschwindigkeit: Durch den Einsatz unterschiedlicher Fahrzeugtypen und die Anwendung der MKB muss ggf. die Fahrzeuggeschwindigkeit angepasst werden, da sich die Fahrzeugparameter verändern. Hierzu zählen bspw. die maximale Geschwindigkeit, die jeweilige Länge des Zugverbands, die Fahrzeugmasse, Antriebsleistung sowie weitere Parameter wie Beschleunigungs- oder Bremsvermögen.

Haltezeit: Die Annahme für die reguläre Haltezeit kann aus dem angesetzten Fahrplan des Deutschlandtaktes abgeleitet werden. Es muss für die Anwendung der MKB überprüft werden, ob sich diese Haltezeit verändert (siehe dazu auch Abschnitt 6.5).

Halteplatzlängen/Bahnsteiglängen: Für die Identifizierung möglicher Halteplätze muss überprüft werden, ob eine ausreichende Länge für die Durchführung einer MKB verfügbar ist.

Betriebsprogramm: Für die Anwendung der Analytik und die Ausweisung der Leistungsfähigkeiten wird die Anzahl der Zugfahrten im Basisfahrplan benötigt.

Infrastrukturparameter: Weitere wichtige Eingangsgrößen sind die Infrastrukturparameter. Darunter fällt u. a. die Abbildung der gleisseitigen Infrastruktur wie Weichenpositionen, Signalstandorte, Neigungen, Fahrwege und Fahrstraßen. Mit Kenntnis dieser Parameter kann die benötigte fahrdynamische Berechnung durchgeführt werden.

6.2.3 Konstruktiver Ansatz

Wie bezüglich der methodischen Vorgehensweise in Unterabschnitt 6.2.1 bereits beschrieben werden zwei parallele Ansätze verfolgt. Neben der Analytik wird die Konstruktion gewählt und im Folgenden detailliert beschrieben.

Bei der Konstruktion werden fahrplanbasierte Fragestellungen mithilfe der Eisenbahnbetriebssimulationssoftware RailSys untersucht. Diese Software zählt zu den mikroskopischen Betriebssimulationen, die einen starken Fokus auf die möglichst realitätsgetreue Abbildung des operativen Betriebs legt. Untersucht werden spezifische Fahrpläne mittels detaillierter Infrastrukturdaten mit dem Ziel, Verspätungsübertragungen (Ur- und Folgeverspätungen) zu modellieren und so die Betriebsqualität einer Strecke bzw. eines Teilnetzes mit einem bestimmten Betriebsprogramm abbilden und bewerten zu können. Die Software zählt zu den auf dem Markt etablierten und wird z. B. bei der DB Netz AG oder den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) verwendet.

Die Software ist dreiteilig aufgebaut: Zunächst erfolgt die Aufnahme der mikroskopischen Infrastruktur (Maßeinheit: 1 Meter). In einem zweiten Modul wird im Fahrplanmanager das gewünschte Betriebsprogramm in die erzeugte Infrastruktur integriert. Dabei zeichnet sich die Software durch eine umfassende, detaillierte Fahrzeitenrechnung aus. Mittels fahrdynamischer Daten von Triebfahrzeugtypen und Informationen zur Zugzusammenstellung kann dieses Modul als umfangreiches Fahrplankonstruktionstool auf Basis von Sperrzeitenberechnungen Anwendung finden. Es besteht eine eigene Simulationsoberfläche, die anhand von definierten Verspätungsverteilungen den operativen Betrieb simuliert und eine Auswertung nach bestimmten Parametern (bspw. Pünktlichkeit) erlaubt. Letztere Funktion steht im vorliegenden Projekt weniger im Fokus, vielmehr wird die beschriebene Software hier zur Beantwortung fahrplankonstruktiver Fragestellungen benutzt. RailSys ermöglicht die Untersuchung der Auswirkung von bestimmten Kupplungszenarien auf den Fahrplan durch eine kleinteilige Konflikterkennung. So kann bspw. untersucht werden, ob durch einen zusätzlichen Kupplungsvorgang die durch die zusätzliche Kupplungszeit entstehende Gleisbelegung einen Konflikt mit anderen Trassen bedeutet oder vielmehr gewünschte Effekte in Form frei werdender Fahrplankapazität (freie Fahrplanfenster für mögliche zusätzliche Trassen oder eine höhere Betriebsstabilität) überwiegen.

6.2.4 Analytischer Ansatz

Neben der konstruktiven Methode wird ein analytischer Ansatz zur Betrachtung der betrieblichen Auswirkungen von Kupplungsvorgängen eingesetzt. Dabei wird der Eisenbahnbetrieb mithilfe der Warteschlangentheorie modelliert [54–58], bei dieser werden Eisenbahnstrecken und -knoten als Bediensysteme betrachtet. Die Bedienungszeiten dieser Systeme werden durch die Mindestzugfolgezeit der Züge

bestimmt, d. h. die kürzest technisch mögliche Zugfolge zweier aufeinanderfolgender Züge auf einem Streckenabschnitt, sodass sich die beiden Züge nicht behindern. Anstatt exakte Fahrplanlagen zu modellieren, wird der Eisenbahnbetrieb statistisch durch Zufallsgrößen der Zugabstände, Pufferzeiten sowie Bedienzeiten und deren mathematische Verteilungen dargestellt. Bei Berechnung der Sperrzeiten werden ähnlich wie bei der konstruktiven Methode fahrdynamische Berechnungen durchgeführt, welche die Eigenschaften der einzelnen Modellzüge und Infrastrukturdaten wie die Ausdehnung der einzelnen Sicherungsblöcke berücksichtigen. Die theoretische maximale Leistungsfähigkeit eines Eisenbahnsystems ist im Rahmen dieser Modellierung durch das Gleichsetzen von Zugfolgezeit und mittlerer Mindestzugfolgezeit gegeben. Praktisch kann diese Systemauslastung jedoch nicht realisiert werden, da es hierbei aufgrund der Abwesenheit von Pufferzeiten zu exorbitanten Wartezeiten und Verspätungen käme und die Qualität ungenügend wäre.

In der Realität wird dementsprechend eine Bemessung auf Grundlage der sogenannten praktischen Leistungsfähigkeit vorgenommen. Um von der theoretischen auf die praktische Kapazität, beides in Form von Zügen pro Zeit, zu schließen, muss ein Leistungsniveau erfüllt werden, das durch eine zulässige Summe von Wartezeiten im Beobachtungszeitraum gegeben ist. Die entsprechenden Grenzen der Leistungsfähigkeit sind in der Richtlinie 405 der DB Netz AG festgehalten [55].

In Abhängigkeit von der mittleren Pufferzeit zwischen aufeinanderfolgenden Zugfahrten können die Systemauslastung und die hiermit verknüpften Wartezeiten im Betrieb reguliert werden. Pufferzeiten hemmen den Aufbau von Verspätungen und reduzieren die Verspätungspropagation. Die optimale Pufferzeit und korrespondierende Zuganzahl sind dann erreicht, wenn die resultierende Wartezeit gerade dem definierten Qualitätsniveau (Level of Service, LoS) entspricht (vgl. [56]).

Zur Bemessung der Pufferzeiten auf Eisenbahnstrecken wurde von Schwanhäuser ein analytischer Ansatz zur Berechnung der außerplanmäßigen Wartezeit, die ein Maß für die Beschreibung der zu erwartenden Folgeverspätungen ist, entwickelt [54]. Die resultierende STRELE-Formel ist die Grundlage der aktuell bei der DB Netz AG verwendeten analytischen Methode zur Streckenbemessung und u. a. im eisenbahnbetriebswissenschaftlichen (EBW-)Tool LUKS implementiert (STRELE: Formel zur analytischen Berechnung der Streckenleistungsfähigkeit; LUKS: Leistungs-Untersuchungen für Knoten und Strecken) [59].

Der Zusammenhang zwischen Zuganzahl, Leistungsniveau (LoS) und Wartezeit ist in nachfolgender Abbildung 13 dargestellt. Das analytische Modell ermöglicht zusätzlich zur optimalen Zuganzahl n_{opt} ebenso einen Ausweis noch vorhandener Restkapazität n_{Rest} als Differenz zwischen n_{opt} und n_{Fpl} (Anzahl Zugfahrten im Fahrplan); das heißt, es kann zusätzlich vermarktbare Trassen aufzeigen nach Maßgabe des definierten Levels of Service (LoS). Insbesondere kann eine Betrachtung von Restkapazitäten durchgeführt werden, die sich in dem untersuchten Szenario durch Kupplung einzelner Züge ergeben, was einen fahrplanunabhängigen Vergleich zum Basisszenario ohne zusätzliche Kupplungsvorgänge erlaubt.

6.2.5 Aufbau des Modellsystems

Die betrieblichen Betrachtungen werden sowohl mit der Eisenbahnbetriebssimulation RailSys als fahrplankonstruktivem Ansatz als auch mit der analytischen Methode durchgeführt. Beide Ansätze stellen jeweils unterschiedliche Anforderungen an die notwendigen Input-Daten, speziell hinsichtlich Detailgrad und Umfang. Insbesondere die mikroskopische Abbildung der Infrastruktur in der Eisenbahnbetriebssimulationssoftware RailSys erfordert möglichst präzise und umfassende Input-Daten wie bspw. Signalstandorte oder Überholabschnitte. Die genutzten Daten werden je nach Modellanforderung sowohl für den fahrplankonstruktiven als auch für den analytischen Ansatz verwendet.

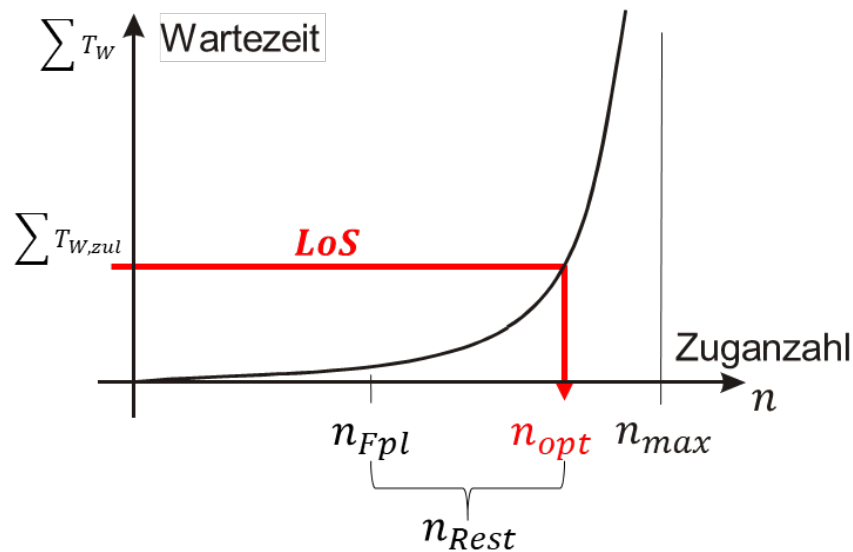


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Auslastung und Qualität (in Anlehnung an Nr. [60])

Der erste Schritt bei der Erstellung der Simulationsumgebung in RailSys ist die Modellierung der mikroskopischen Streckeninfrastruktur. Dazu sind eine Reihe von Informationen notwendig, z. B. Angaben zu Kilometrierung und Streckenabschnittslängen sowie Geschwindigkeitsprofile. Außerdem sind die Positionen von Stationen, Signalen sowie Weichen elementar. Weitere notwendige Aspekte sind Angaben zu Bahnhöfen und Haltepunkten wie bspw. Spurpläne und Anzahl der verfügbaren Gleise mit Halteplatzlängen. Darüber hinaus muss z. B. geprüft werden, welche Zugsicherungssysteme auf dem jeweiligen Streckenabschnitt zum Einsatz kommen, um die betrieblichen Abläufe korrekt abbilden zu können und die entsprechende fahrdynamische Berechnung für die Fahrzeiten zu erhalten.

In weiteren Schritten werden dann die Parameter für das Betriebsprogramm definiert, welche sowohl die notwendigen Schienenfahrzeuge inkl. ihrer fahrdynamischen Eigenschaften als auch das anzusetzende Betriebsprogramm (Häufigkeit der Zugfahrten mittels Taktzeiten etc.) beinhaltet. Auch diese Eingangsgrößen werden für die Berechnung der Fahrdynamik verwendet. So können die Mindestzugfolgezeiten der einzelnen Zugpaarungen ermittelt sowie der Basisfahrplan abgebildet werden.

6.3 Definition und Beschreibung des Untersuchungsraums

Als geeigneter Untersuchungsraum wird das Streckennetz rund um den Knoten Offenburg an der hochbelasteten Strecke Karlsruhe–Basel (Rheintalbahn) einschließlich der abzweigenden Strecken in Richtung Biberach, Kehl, Bad Griesbach sowie Ottenhöfen ausgewählt (siehe Abbildung 14 und Tabelle 2).

Der gewählte Untersuchungsraum bietet das Zusammenspiel einer überlasteten Hauptstrecke (Rheintalbahn) mit zahlreichen Nebenstrecken unterschiedlicher Nachfrage und Fahrzeugflottenstruktur sowie unterschiedlichem Elektrifizierungsgrad.

Zu den betrachteten Strecken gehört die überregional bedeutsame Rheintalbahn von Karlsruhe nach Basel sowie deren Nebenstrecken im Raum Offenburg. Dazu zählen auch ausgewählte Nebenstrecken, welche die zahlreichen Schwarzwaldtäler erschließen.

Folgende Strecken werden innerhalb des Untersuchungsraums ausgewählt:

- Rheintalbahn: Karlsruhe–Basel (elektrifiziert)
- Schwarzwaldbahn: Offenburg–Singen (elektrifiziert)
- Europabahn: Appenweier–Straßburg (elektrifiziert)
- Achertalbahn: Achern–Ottenhöfen (nicht elektrifiziert)
- Renchtalbahn: Appenweier–Bad Griesbach (nicht elektrifiziert)
- Harmersbachtalbahn Biberach–Oberharmersbach-Riersbach (nicht elektrifiziert)

TABELLE 2: STRECKEN IM UNTERSUCHUNGSRAUM MIT JEWEILS FÜR DIE SIMULATION AUSGEWÄHLTEN STRECKENABSCHNITTEN

Strecke	Streckennummer	Streckenabschnitt	Streckenlänge Abschnitt in km
Karlsruhe–Basel	4000	Lahr (Schwarzwald)–Achern	38,4
Karlsruhe–Basel	4280	Offenburg–Achern	22,5
Achern–Ottenhöfen	9426	Achern–Achern Stadt	1,3
Appenweier–Bad Griesbach	4262	Appenweier–Zusenhofen	4,0
Appenweier–Straßburg	4260	Appenweier–Legelshurst	5,1
Offenburg–Singen (Hohentwiel)	4250	Offenburg–Biberach	17,9
Biberach–Oberharmersbach-Riersbach	9427	Biberach	-

Die zugehörige grafische Darstellung des Untersuchungsgebiets ist Abbildung 14 zu entnehmen [61].

Der Knoten Offenburg hat im Landesnetz Baden-Württemberg eine hohe Bedeutung für den Schienenpersonennahverkehr (SPNV), ist aber auch ein wichtiger Fernverkehrsknoten in der Region. Dementsprechend besitzt Offenburg Hbf eine zentrale Funktion beim Umstieg vom Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) auf den SPNV und umgekehrt. Insbesondere Durchbindungen und die gemeinsame Führung von Linien auf dem Kernabschnitt der Rheintalbahn nördlich und südlich von Offenburg sind aussichtsreich für eine sinnvolle Anwendung der MKB. Es bestehen Optimierungsmöglichkeiten bei der Verknüpfung von Linien unter weitgehender Beibehaltung der bisherigen Linienstruktur. Dadurch werden Verbesserungen für die Fahrgäste und für die Betriebsabwicklung angestrebt.

Für den Untersuchungsraum wird als Fahrplangrundlage der Deutschlandtakt 2030 im dritten Gutachterentwurf unterstellt [62–64]. Dabei wurden der SPFV und der SPNV möglichst minutengenau übernommen. Die Trassen des Schienengüterverkehrs (SGV) sind an den Deutschlandtakt 2030 angelehnt. Die Wahl des Deutschlandtaktes 2030 als Fahrplangrundlage schafft eine einheitliche Basis für Optimierungen der einzelnen Linien hinsichtlich einer MKB. In den meisten Fällen entsprechen die Linienverläufe des Deutschlandtaktes 2030 dem heutigen Zustand, allerdings bereits ergänzt um einzelne Verbesserungen. Der Fahrplan des SPNV wird in den Szenarien jeweils weiter angepasst und variiert, insbesondere im Hinblick auf die Anwendung der MKB. Dort, wo es sinnvoll erscheint, werden SPNV-Linien mittels MKB miteinander verknüpft. So stellt der resultierende Fahrplan einen Deutschlandtakt 2030 dar, der hinsichtlich des SPNV mittels MKB weiter optimiert wird.

Die Fahrpläne und Linienverläufe des Schienenpersonenfernverkehrs sowie des Schienengüterverkehrs werden nicht verändert. Deshalb werden sie an dieser Stelle nicht weiter aufgeführt. Folgende SPNV-Linien werden gemäß Deutschlandtakt 2030 für den Untersuchungsraum unterstellt (siehe Tabelle 3 [62–64]).

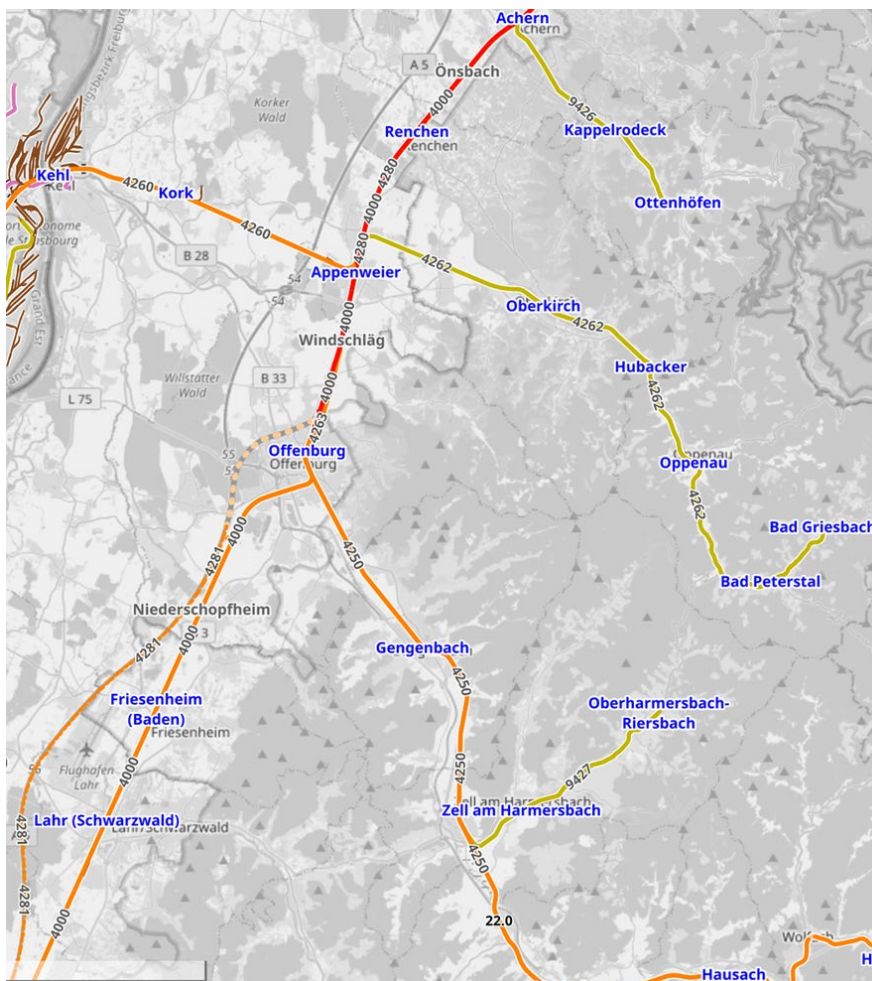


Abbildung 14: Ausschnitt des Streckennetzes im Untersuchungsraum Offenburg und Umgebung

TABELLE 3: BETRACHTETE SPNV-LINIEN IM UNTERSUCHUNGSRAUM (FAHRPLAN D-TAKT 2030, DRITTER ENTWURF)

Linie	von	nach	Takt in Minuten	Zugkategorie
OSB 1	Offenburg	Ottenhöfen	60	Regionalbahn
OSB 2	Offenburg	Bad Griesbach	60	Regionalbahn
OSB 3	Straßburg	Offenburg	30	Regionalbahn mit Frankreich-Zulassung
OSB 4	Biberach	Oberharmersbach-Riersbach	60	Regionalbahn
OSB 5.1	Offenburg	Freudenstadt	60	Regionalbahn
OSB 5.2	Offenburg	Hornberg	60	Regionalbahn
BSB 8	Offenburg	Freiburg	30	Regionalbahn
BW Ex 10	Karlsruhe	Konstanz	60	Regional-Express
E 31	Karlsruhe	Basel SBB	60	Regional-Express

6.4 Auswirkungen einer MKB auf den Betrieb

6.4.1 Untersuchung von definierten Anwendungsfällen

Basierend auf dem gewählten Untersuchungsraum, Knoten Offenburg und Umgebung, werden zwei verschiedene Grundscenarien definiert. Zunächst wird ein Basisszenario Deutschlandtakt 2030 festgelegt, welches den aktuellen Planungsstand des Deutschlandtaktes mit einer stark eingeschränkten Kuppelbarkeit darstellt. In diesem Fall verkehren auf den SPNV-Nebenstrecken im Untersuchungsgebiet zahlreiche DMU-Triebwagen. Demgegenüber steht das Planfallszenario Deutschlandtakt 2030 mit MKB. Hier wird eine umfassende MKB unterstellt. Ausgewählte Linien des untersuchten Streckennetzes sind auf eine MKB hin optimiert. Außerdem sind sämtliche DMU-Fahrzeuge der Nebenstrecken durch BEMU-Fahrzeuge ersetzt [65], sodass eine einfachere Kombination mit vorhandenen EMU-Fahrzeugen hinsichtlich Traktion und Fahrdynamik möglich ist. Zudem wirkt eine einheitliche elektrische Traktion begünstigend für eine angedachte MKB. Zwar wäre es denkbar, dass auch im Deutschlandtakt 2030 weiterhin DMU im SPNV im Untersuchungsraum verkehren. Dies würde eine Kupplung von EMU und DMU mittels MKB nahelegen. Aber die Betrachtung dieses Anwendungsfalles bzw. Investitionen in eine MKB zur Kupplung von EMU und DMU scheinen nicht mehr sinnvoll, da die Anzahl an DMU im SPNV bis 2040 stark sinken wird. Viele Aufgabenträger in Deutschland haben bereits jetzt beschlossen, bei Neuausschreibungen auf DMU zu verzichten bzw. konkrete Anforderungen an lokal emissionsfreie Fahrzeuge in Ausschreibungsanforderungen aufzunehmen [48, 66–68].

Der Fahrzeugeinsatz auf den SPNV-Linien im Grundkonzept des Deutschlandtaktes 2030 unterscheidet sich je nach Linientyp und Fahrgastaufkommen. Im Untersuchungsgebiet kommen sowohl große Regional-Express-Fahrzeuge in Doppelstockausführung als auch kleinere Regionalbahn-Triebwagen zum Einsatz. Während die großen Double-Deck-EMU vorrangig den Hauptkorridor Rheintalbahn bedienen, kommen für die Erschließung der Nebenstrecken um Offenburg sowie zur Angebotsergänzung bei der Rheintalbahn vorwiegend kleinere BEMU bzw. Single-Deck-EMU zum Einsatz. Es werden also drei verschiedene Fahrzeugklassen unterschieden (Double-Deck-EMU als Regional-Express, Single-Deck-EMU als Regionalbahn auf Hauptstrecken und BEMU als Regionalbahn auf Nebenstrecken). Diese Fahrzeugklassen unterscheiden sich bspw. hinsichtlich Gefäßgröße, Höchstgeschwindigkeit, Masse, Traktionsverhalten sowie Länge zum Teil deutlich. Mittels MKB sollen diese voneinander abweichenden Fahrzeugklassen miteinander verknüpft werden, sodass ein Mehrwert für das Bahnsystem und für die Fahrgäste entstehen kann.

Im Basisszenario, welches auf dem Deutschlandtakt 2030 beruht, werden auf den SPNV-Linien im Untersuchungsraum vermutlich keine Züge linienübergreifend miteinander gekuppelt. Denkbar ist allerdings ein Kuppeln von Fahrzeugen gleicher Baureihe, um Zugverbände einer spezifischen SPNV-Linie zu stärken oder zu schwächen. Dies kann z. B. an wichtigen Knotenbahnhöfen oder an Bahnhöfen mit Streckenverzweigungen zur Anwendung kommen (bspw. wird OSB 5 zu OSB 5.1 und OSB 5.2 in Hausach, siehe Tabelle 3). Die Etablierung einer MKB führt zwangsläufig zu einer Steigerung der Kupplungsvorgänge im Untersuchungsraum. Im Folgenden werden einige Szenarien vorgestellt, anhand derer die betrieblichen Auswirkungen einer MKB betrachtet werden.

Das Planfallszenario untergliedert sich in drei Subscenarien, die jeweils unterschiedliche betriebliche Aspekte einer MKB beleuchten. Anhand der folgenden drei prägnanten Szenarien wird sowohl das ausgewählte Streckennetz und der dazugehörige Verkehrsknoten hinsichtlich der (theoretisch) möglichen Leistungsfähigkeit bewertet als auch der zugehörige (optimierte) SPNV-Fahrplan anhand von Fahrzeugumläufen und des Fahrzeugbedarfs ausgewertet. Zu den Szenarien zählt zum einen die Durchbindung zweier in einem Knoten endender Züge in der Hauptverkehrszeit (HVZ), die durch eine freie Kuppelbarkeit ermöglicht wird. Zum anderen wird in einem weiteren Szenario die vereinigte Führung zweier

Linienäste ab einem Bahnhof in der Peripherie bis in den Knoten betrachtet. In einem dritten Szenario schließlich wird die Kupplung eines BEMU-Zuges einer Nebenstrecke an den durchgehenden Regional-Express zur kapazitätssteigernden Führung auf der Hauptstrecke untersucht.

Je nach Szenario werden unterschiedliche Methoden angewandt. In Szenario 1, der Linienbündelung bzw. Durchbindung im Knoten (vgl. Unterabschnitt 6.4.2), wird die konstruktive Methode genutzt, da bei diesem Szenario insbesondere die Engpasssituation auf der hochbelasteten Rheintalbahn zwischen Offenburg und Achern betrachtet wird. Hier ist eine trassen- und sperrzeitengenaue Vorgehensweise zur Beurteilung kapazitätsspezifischer Veränderungen sehr wichtig. Im zweiten Szenario, der Vereinigung vor dem relevanten Knoten Offenburg (vgl. Unterabschnitt 6.4.3), wird die analytische Methode verwendet. Die Schwarzwaldbahn von Offenburg in Richtung Biberach ist weniger stark belastet, daher steht eine trassenscharfe Betrachtung hier weniger im Fokus. Dies qualifiziert Szenario 2 für eine analytische Vorgehensweise. Szenario 3 (Kupplung BEMU mit EMU, Unterabschnitt 6.4.4) wiederum wird ebenfalls mithilfe der konstruktiven Methode bearbeitet, da hier erneut die Rheintalbahn befahren wird und demnach auch die für Szenario 1 relevante Engpasssituation vorliegt.

6.4.2 Linienbündelung/Durchbindung im Knoten (Szenario 1)

Das erste Szenario befasst sich mit der Durchbindung der zwei Linien in einem Knoten. Für die Untersuchung dieses Szenarios wurden die folgenden beiden Linien, die momentan im Knoten Offenburg enden, identifiziert:

- OSB 3: Straßburg–Offenburg (BEMU, RB)
- BSB 8: Offenburg–Freiburg (EMU, RB)

Prinzipiell sind Durchbindungen auch ohne MKB möglich, indem dieselben Züge weiterfahren. Oft stehen dem aber organisatorische oder wirtschaftliche Gründe entgegen. So auch hier: Die beteiligte Linie OSB 3 verkehrt von Offenburg ins benachbarte Straßburg, weshalb eine gesonderte Ausrüstung und Zulassung der Fahrzeuge für den Betrieb in Frankreich (bzw. auf der französischen Teilstrecke) nötig ist. Da hierdurch die Fahrzeugkosten erhöht werden, ist es wirtschaftlich wünschenswert, die kostenintensiven Fahrzeuge auch dort einzusetzen, wo die Zusatzausrüstung benötigt wird. Für die Durchbindung der OSB 3, Straßburg–Offenburg, auf die BSB 8, Offenburg–Freiburg, ergibt sich durch die MKB dabei die Möglichkeit, auf einer Teilstrecke in Doppeltraktion zu fahren und so die Vorteile der Durchbindung teilweise zu realisieren, ohne den Einsatz der frankreichtauglichen Fahrzeuge bis Freiburg zu erfordern.

Betrachtet wird die gekuppelte Führung der beiden Linien zwischen Kehl und Lahr (Schwarzwald). Da eines der Ziele die Entlastung des Knotens Offenburg ist, werden die Kupplungsmanöver auf die nächsten geeigneten Bahnhöfe ausgelagert. Kehl und Lahr verfügen sowohl über ein relevantes Fahrgastaufkommen als auch über genügend Bahnsteigkapazitäten, um den Kupplungsvorgang durchführen zu können. Eine vollständige Durchbindung zwischen den beiden Endpunkten entsteht so zwar nicht, doch immerhin kann durch das Verkehren in Doppeltraktion und einen längeren Halt an einem Zwischenbahnhof (oder in Offenburg) ein gesicherter Umstieg zwischen den Zugteilen angeboten werden. Ferner besteht in Kehl alternativ zur OSB 3 Anschluss an die Straßenbahn in Richtung Straßburg. Das Linienkonzept der Regionalbahnen ist in Abbildung 15 dargestellt.

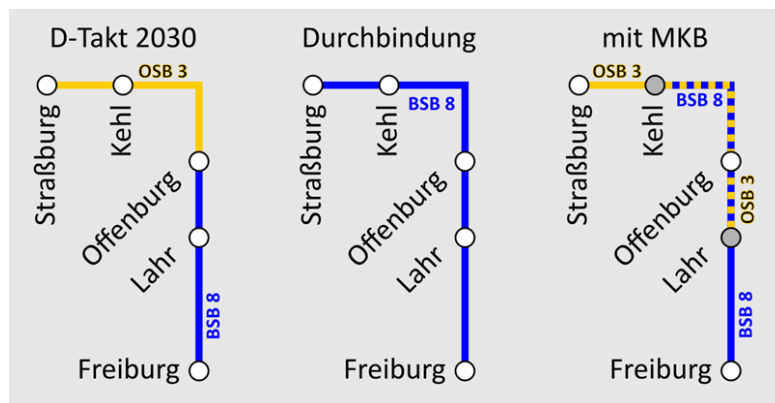


Abbildung 15: Linienkonzeptscenario 1

Die frankreichtauglichen Züge (BEMU) verkehren somit auf dem Abschnitt Straßburg–Lahr, die günstigeren Einsystemzüge (EMU) zwischen Kehl und Freiburg. Dieses Prinzip lässt sich auf andere Situationen mit technischen oder betrieblichen Grenzen übertragen.

Erhoffte Vorteile:

- umsteigefreie Fahrten zwischen Straßburg und Lahr bzw. Kehl und Freiburg
- gesicherter und damit attraktiverer Umstieg für alle darüber hinausgehenden Relationen
- wirtschaftlicher Fahrzeugeinsatz
- verringerte Bahnsteigbelegung in Offenburg

Herausforderungen:

- Kupplungszeiten in Kehl und Lahr
- Eignung der Spurpläne in Kehl, Offenburg und Lahr
- Kombination zwischen BEMU und EMU

Benötigter Fahrzeugeinsatz:

- OSB 3 (RB): 1 × BEMU mit Frankreichzulassung (2-Teiler), Höchstgeschwindigkeit $v_{max} = 140$ km/h
- BSB 8 (RB): 2 × EMU (3-Teiler), $v_{max} = 160$ km/h

Mittels Fahrplankonstruktion in RailSys wird untersucht, inwiefern das Szenario 1 mit den formulierten erhofften Effekten einhergeht unter gleichzeitiger Sicherstellung eines konfliktfreien Fahrplans. Das im Zuge der MKB entwickelte Angebotskonzept ermöglicht eine umsteigefreie Verbindung zwischen Straßburg und Lahr bzw. Kehl und Freiburg bei gleichzeitiger Berücksichtigung frankreichspezifischer Anteile der Fahrzeugflotte. Zudem wird die Fahrgastkapazität zwischen Kehl und Lahr erhöht.

Die Fahrplankonstruktion in RailSys zeigt, dass das vorgeschlagene MKB-Konzept durch konfliktfreie Trassen bewerkstelligt werden kann. Die entstehenden Kuppelzeiten werden am Beispiel Lahr näher beleuchtet (siehe Abbildung 16): Ein Kupplungsvorgang in einem Nebengleis (3) ist möglich bei gleichzeitiger Beibehaltung der anderen auf der Rheintalbahn vorgesehenen Trassen (Deutschlandtakt-Basisfahrplan). Obwohl die Züge in Richtung Norden zur Einfahrt in das Kupplungsgleis das durchgehende Hauptgleis kreuzen müssen, werden keine Konflikte im Fahrplan beobachtet.

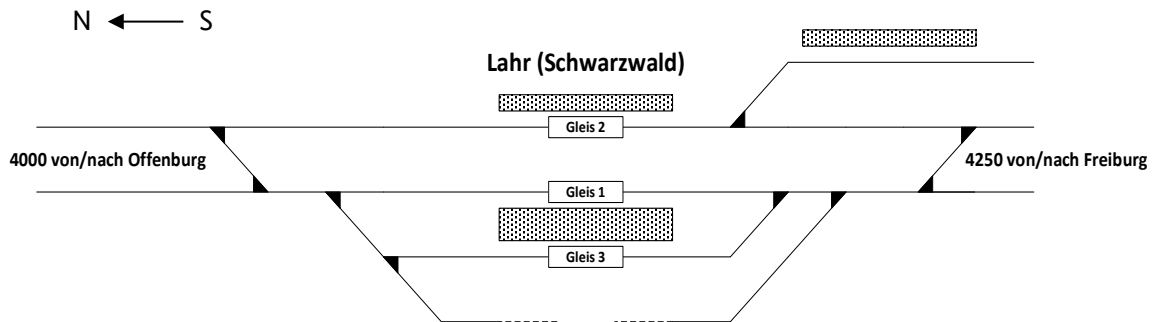


Abbildung 16: Spurplan Lahr (Schwarzwald) (reduzierter Inhalt)

Die Vorteile des Konzepts liegen neben der angebotsplanerischen Dimension auch bei der Bahnsteigbelegung im Knoten Offenburg. Eine Übersicht über die Gleis- und Bahnsteigsituation in Offenburg Hbf findet sich in Abbildung 17. Während im Basisfahrplan des Deutschlandtaktes noch umfangreiche Wendezeiten in Offenburg (vermutlich am Bahnsteig) vorgesehen werden, wird die Bahnsteigbelegung durch das vorgestellte MKB-Konzept signifikant reduziert. In Abbildung 18 werden die beiden Konzepte mittels Gleisbelegungsplan miteinander verglichen. Insbesondere werden hier die frei werdenden Bahnsteigkapazitäten auf den Gleisen 2 und 4 sichtbar.

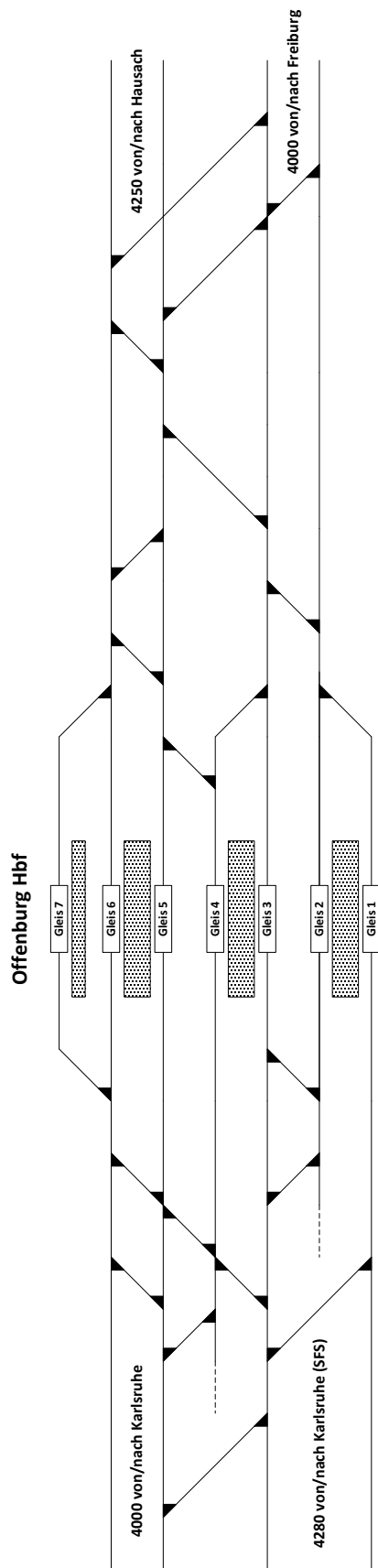


Abbildung 17: Spurplan Offenburg Hbf (reduzierter Inhalt)

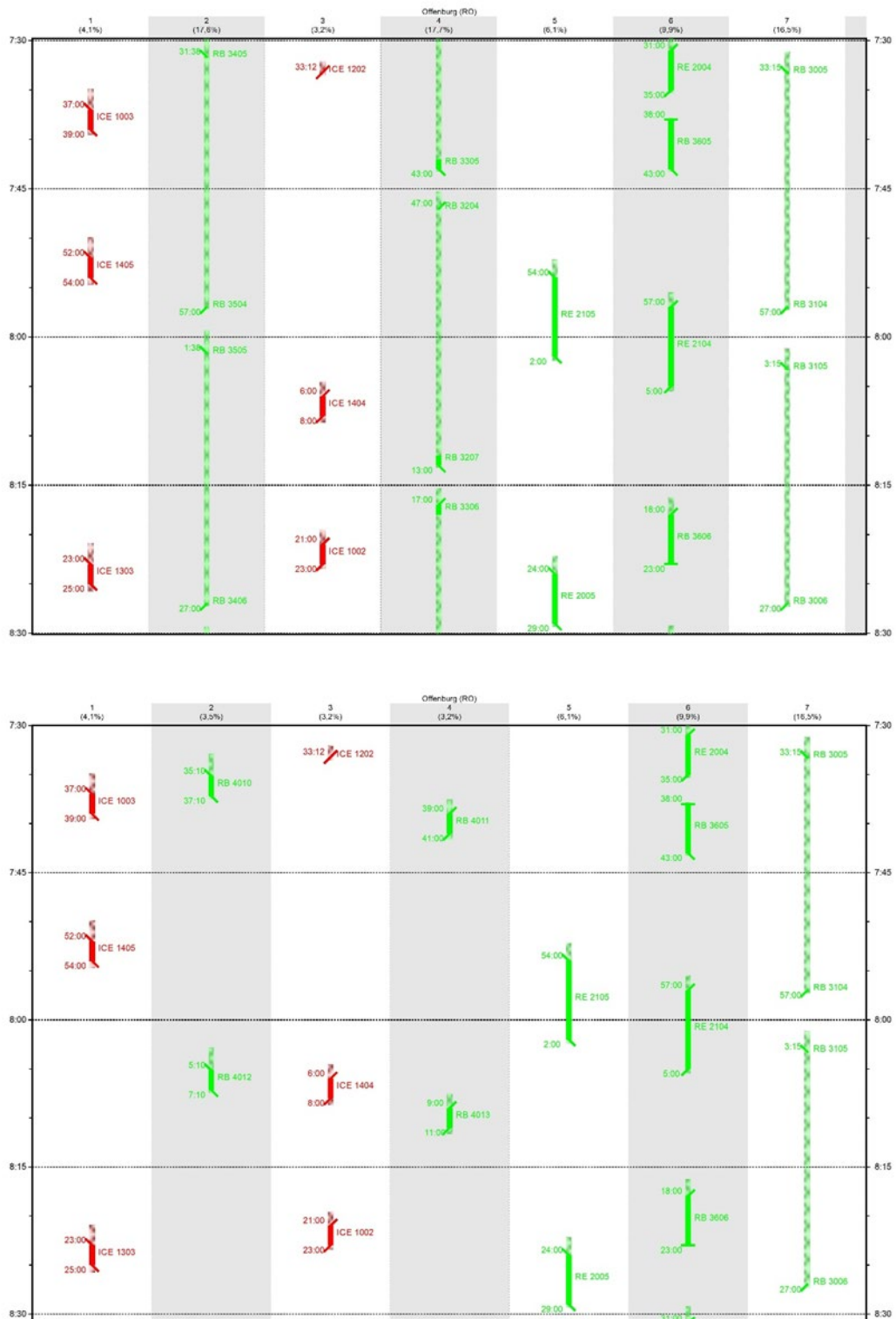


Abbildung 18: Gleisbelegungsplan Offenburg Hbf (RailSys) in der Zeit von 7:30 bis 8:30 Uhr, Vergleich der Bahnsteigkapazitäten (oben ohne MKB, unten mit MKB)

Der Gleisbelegungsplan in Abbildung 18 zeigt, dass anstatt einer fast dauerhaften Belegung der Gleise 2 und 4 zu Wendezwecken der gekuppelte Zug jetzt nur noch zweimal pro Stunde in Offenburg hält. Die frei werdenden Bahnsteigkapazitäten können einer anderen Verwendung zugeführt werden. Im Zuge des Deutschlandtaktes 2030 als integralem Taktfahrplan nehmen jedoch die Fahrplanzwänge bei Änderungen am Trassengerüst zu. Es ist in dieser Hinsicht weiter zu prüfen, inwiefern die veränderte Trassenlage (durch Wegfall der Wenden in Offenburg) sich mit den Knotenkonzepten insbesondere der benachbarten Taktknoten wie Karlsruhe und Freiburg vereinen lassen.

Die Simulation in RailSys berücksichtigt auch die veränderte Fahrdynamik des gekuppelten Zuges. Die Auswirkungen in diesem Szenario sind in diesem Kontext jedoch vergleichsweise gering. So erhöht sich die Fahrzeit des gekuppelten Zuges (RB BSB 8 + RB OSB 3) auf dem Abschnitt zwischen Lahr und Offenburg um ca. 80 Sekunden im Vergleich zum Basisfahrplan, nach dem beide RB-Linien getrennt verkehren bzw. noch keine Durchbindung umgesetzt ist. Das bedeutet, dass die BSB 8, welche bislang mit 160 km/h verkehrt hat, eine leichte Fahrzeitverlängerung erhält. Mit Blick auf den Deutschlandtakt 2030 scheint die geringe Fahrzeitverlängerung hier jedoch noch akzeptabel. Eine größere Bedeutung hat allerdings die zeitliche Auswirkung der verlängerten Haltezeit in Lahr. Für die bislang schneller verkehrende RB-Linie BSB 8 verlängert sich die Fahrzeit durch das Kuppeln in Lahr stets um fünf Minuten. Dies stellt vor dem Hintergrund eines Taktfahrplans eine bedeutende Fahrzeitverlängerung dar. Es ist zu prüfen, inwiefern die benötigte Kantenfahrzeit der BSB 8 im Deutschlandtakt 2030 mit einer Verlängerung der Fahrzeit vereinbar ist. Je nach Verhältnis von Taktzeit, Distanz zwischen zwei Hauptknoten und der Kantenfahrzeit kann es hier zu erheblichen Auswirkungen auf Anschlussverbindungen in den Taktknoten kommen, da bei einem integralen Taktfahrplan die Kantenfahrzeit ein Vielfaches der halben Taktzeit betragen sollte [69].

6.4 3 Vereinigung vor dem Knoten (Szenario 2)

Das zweite Szenario untersucht die Verknüpfung der Nebenlinien mit einer Vereinigung vor dem (relevanten) Knoten. Als Anwendungslinien dienen hier:

- OSB 4: Oberharmersbach–Riersbach–Biberach (BEMU, RB)
- OSB 5.1: Offenburg–Freudenstadt (BEMU, RB)
- OSB 5.2: Hornberg–Hausach (BEMU, RB)

Ziel ist es, die Angebotsqualität durch umsteigefreie Verbindungen zu erhöhen, ohne durch die Verlängerung der bestehenden Linien als eigenständige Fahrten die Belastung des Knotens Offenburg zu erhöhen. Daher sollten die drei Linien in Hausach (OSB 5.1 mit OSB 5.2) und Biberach (OSB 5.1 + OSB 5.2 mit OSB 4), wo die Streckenbelastung noch nicht so hoch ist, gekuppelt werden und gemeinsam nach Offenburg fahren. Das Linienkonzept wird in Abbildung 19 dargestellt.

Erhoffte Vorteile:

- umsteigefreie Verbindungen
- unveränderte Belastung des Knotens Offenburg

Herausforderungen:

- Dreifachtraktion (Bahnsteiglängen beachten)
- Kupplung in Biberach auf dem durchgehenden Hauptgleis (siehe Abbildung 20 [61])

Benötigter Fahrzeugeinsatz:

- OSB 4 (RB): 1 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h
- OSB 5.1 (RB): 1 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h
- OSB 5.2 (RB): 1 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h

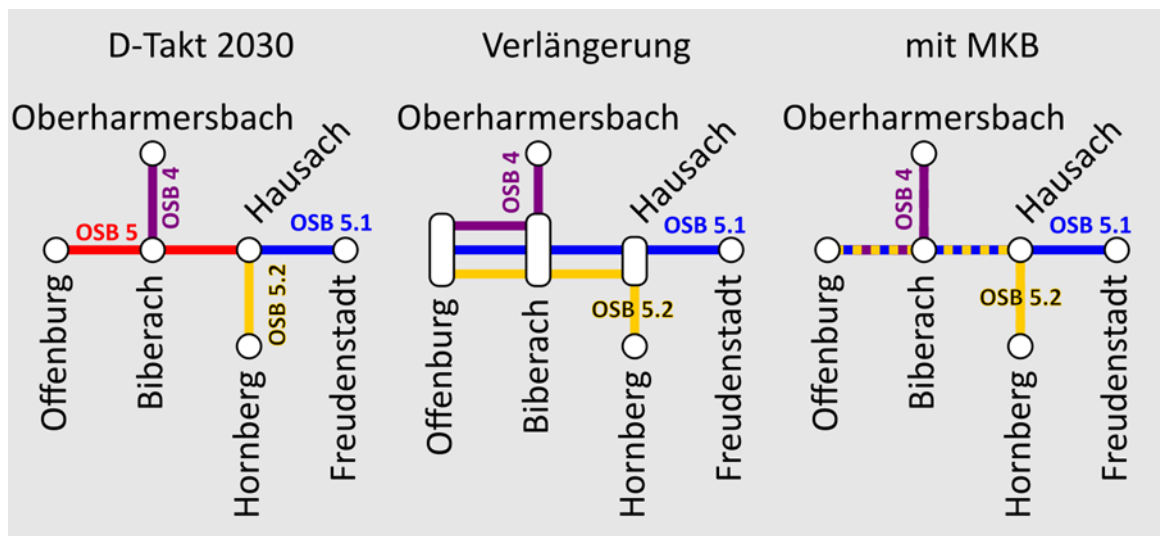


Abbildung 19: Linienkonzeptscenario 2

Im zweiten Szenario wird der Abschnitt Biberach–Offenburg betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Vereinigung der Züge vor dem Knoten Offenburg. Die analytische Betrachtung erfolgt dabei nur für den Abschnitt Biberach–Offenburg, da dieser Streckenabschnitt wesentlich für die Betrachtung der maximalen Streckenkapazität ist. Die Nebenäste der betroffenen Regionalbahn-Linien werden nicht abgebildet, da sich auf diesen Abschnitten durch die MKB keine Änderung hinsichtlich der Kapazität ergäbe.

Das Betriebsprogramm ist angelehnt an den Deutschlandtakt 2030 und um zusätzliche Fahrten ergänzt (Verstärkung RE/RB, Güterverkehr, Fernverkehr), die aus dem aktuellen Fahrplanjahr 2021 abgeleitet worden sind. Der Betrachtungszeitraum beträgt acht Stunden mit maximaler Streckenbelastung (7–15 Uhr). Das Betriebsprogramm enthält entsprechend Fahrten von RE, RB, IC (nur Richtung Biberach) sowie einzelnen Güterzügen. Die Kupplung der drei Regionalbahn-Triebzüge (OSB 4, OSB 5.1 und OSB 5.2) erfolgt auf dem Hauptgleis im Bahnhof Biberach.

Mithilfe der analytischen Methode nach Schwanhäußer [54] wird zunächst die mit dem Level of Service verknüpfte Leistungsfähigkeit oder Nennleistung errechnet und mit der Grundlast des angesetzten Basisfahrplans verglichen. Dadurch können die vorliegenden Restkapazitäten berechnet werden, die sich mit und ohne Vereinigung der Regionalbahnen vor dem Knoten Offenburg ergeben (vgl. Abschnitt 6.2.4). Der Kupplungsvorgang in Biberach muss aufgrund der infrastrukturellen Gegebenheiten auf dem Hauptgleis durchgeführt werden. Der Kupplungsvorgang führt dabei zu einer Verlängerung der planmäßigen Haltezeit und für die betroffenen Zugfolgen zu einer erhöhten Bedienzeit (Mindestzugfolgezeit) im Warteschlangensystem.

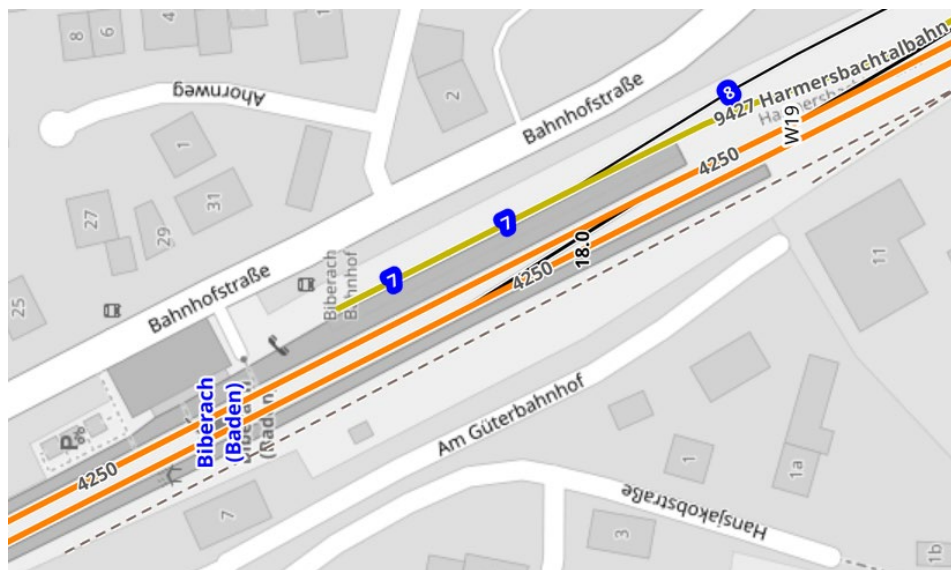


Abbildung 20: Spurplanausschnitt Biberach

Der betriebliche Vorteil der Vereinigung vor dem Knoten ist die verringerte Anzahl an Zugfahrten, da mehrere Linien zu einem Zugverband zusammengefasst werden. Es stellt sich nun die Frage, ob dieser Vorteil den Nachteil der verlängerten Mindestzugfolgezeit aufgrund des zeitlichen Mehraufwands des Kupplungsprozesses ausgleichen kann. Bewertet wird dies durch den Vergleich der Restkapazität im Basisszenario und im Falle zusätzlicher Kupplungen. Die Restkapazität wird hier verstanden als die Differenz zwischen der maximal möglichen Kapazität und der aktuell vorliegenden Streckenauslastung, jeweils in Zügen pro Stunde (vgl. Abschnitt 6.2.4). Die maximal mögliche Kapazität wird dabei durch die Analytik ermittelt und berücksichtigt auch Pufferzeiten und Verspätungsverteilungen der einzelnen Zuggattungen. Somit ist die Restkapazität ein Ausdruck dafür, wie viel ungenutzte Kapazität auf dem Streckenabschnitt vorliegt. Da die Analytik die Abhängigkeiten zwischen den Zügen nur statistisch abbildet, ist jedoch davon auszugehen, dass die Restkapazität im operativen Betrieb nicht in vollem Umfang ausgeschöpft werden kann. Es wird sich also eine Abweichung in Form einer Überschätzung der möglichen Zugzahlen zwischen der hier ermittelten theoretischen Leistungsfähigkeit und der möglichen praktischen Leistungsfähigkeit ergeben.

Wie in Abbildung 21 dargestellt, ergibt sich im realisierten Betriebsprogramm für den Abschnitt von Biberach nach Offenburg durch die Kupplung eine Reduzierung der Zahl der Zugfahrten pro Stunde gegenüber dem Basisszenario. Zudem verringert sich die maximal mögliche Streckenkapazität. Dadurch verringert sich konsequenterweise auch die Restkapazität im Falle des Szenarios mit Kupplung.

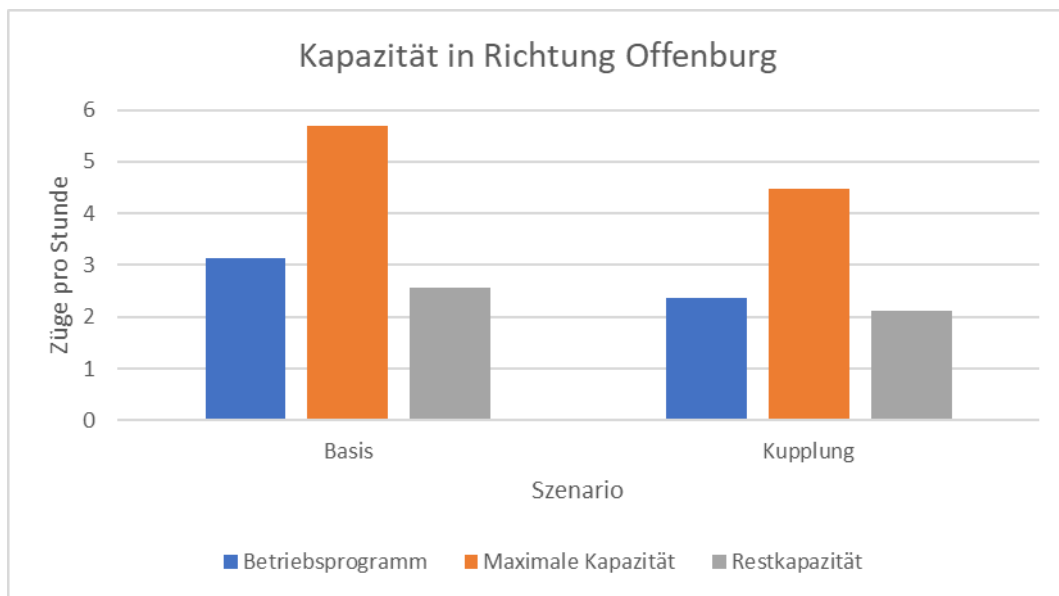


Abbildung 21: Kapazitätsmaße in Richtung Offenburg

In Richtung Biberach ist die Tendenz ähnlich, hier fallen die Unterschiede der maximalen Kapazität und somit auch der Restkapazität jedoch geringer aus, siehe Abbildung 22.

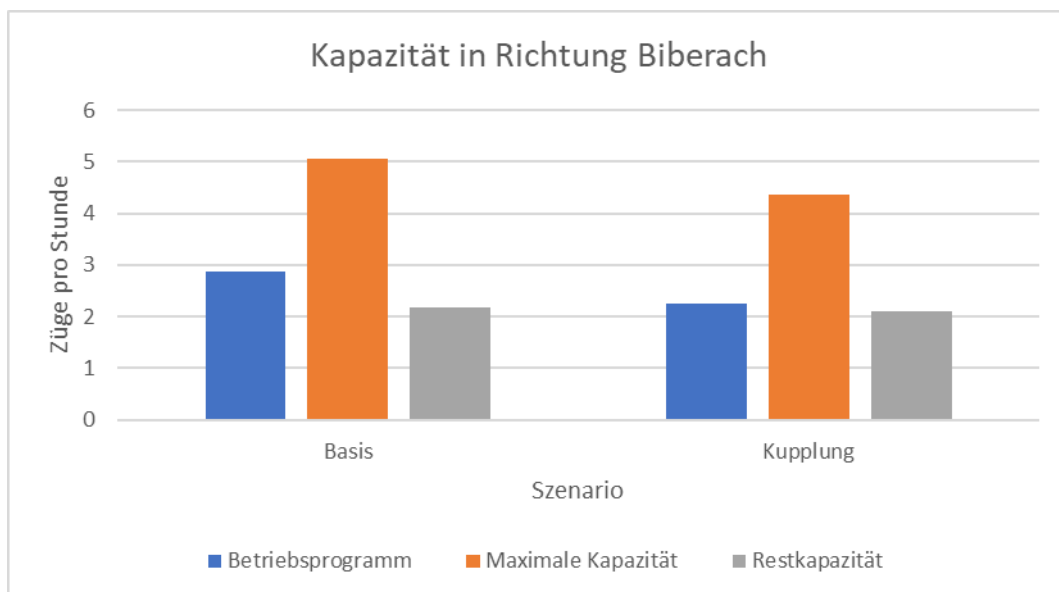


Abbildung 22: Kapazitätsmaße in Richtung Biberach

Somit kann die durch die MKB reduzierte Anzahl an Zugfahrten im Betriebsprogramm nicht die erhöhte Mindestzugfolgezeit durch den Kupplungsvorgang auf dem Hauptgleis kompensieren, was zu einer Verringerung der maximal möglichen Streckenkapazität führt.

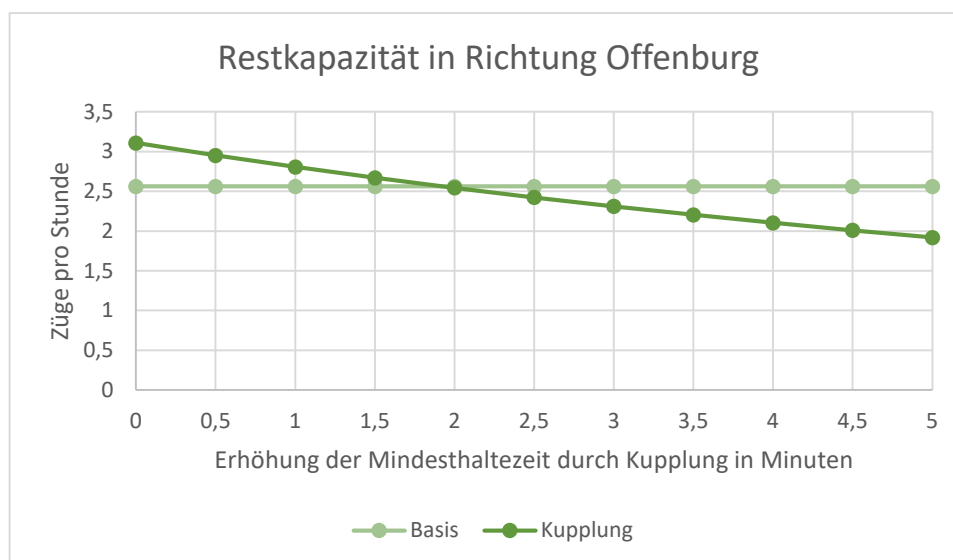


Abbildung 23: Einfluss der Kupplungszeit auf die Restkapazität in Richtung Offenburg

Als weitergehende Auswertung wird daher untersucht, wie sich das Verhalten bei abweichenden Kupplungszeiten ändert. Wie in Abschnitt 6.5 erläutert ist die angenommene Kupplungszeit zum einen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Zum anderen könnte je nach infrastrukturellen Voraussetzungen und Ausbaumöglichkeiten durch Kupplung auf einem Nebengleis der Konflikt mit nachfolgenden Zügen verhindert werden. In diesem Fall müsste auch keine Erhöhung der Mindestzugfolgezeit angenommen werden. Aufgrund dieser Überlegungen wird die Restkapazität bei kupplungsbedingter Erhöhung der Mindestzugfolgezeit zwischen null und fünf Minuten ausgewertet.⁵ In Abbildung 23 ist dargestellt, wie sich die Restkapazität Richtung Offenburg verhält. Da im Basisszenario kein Kupplungsvorgang angenommen wird, variiert die Restkapazität nur im Kupplungsszenario. Hervorzuheben ist dabei der Schnittpunkt zwischen den beiden Geraden (Break-even-Point) bei einer Erhöhung der Mindestzugfolgezeit um zwei Minuten. Ähnlich verhält es sich für die Richtung Biberach, in der der Break-even wie in Abbildung 24 veranschaulicht bei etwa 2,5 Minuten liegt.

Festzuhalten bleibt, dass aus Sicht der maximalen Streckenkapazität die Vereinigung von Linien vor einem Knoten durch Kupplung durchaus sinnvoll ist. Sind allerdings keine Ausweichmöglichkeiten während des Kupplungsvorgangs gegeben, hat dies einen starken negativen Effekt auf die maximale Leistungsfähigkeit. Aufgrund dessen ist es strategisch sinnvoll, den Spurplan abschnittsweise zu erweitern, um das Kuppeln im Hauptgleis zu vermeiden. Alternativ kann die Verringerung der Kupplungszeiten durch technische oder organisatorische Maßnahmen angestrebt werden.

Im Zuge der Streckenleistungsfähigkeitsanalyse auf dem Streckenabschnitt der Schwarzwaldbahn zwischen Biberach und Offenburg konnten durch die MKB keine Vorteile in Bezug auf Angebotsqualität und Kapazitätsnutzung ausgewiesen werden. Gleichzeitig ist jedoch auf dem betrachteten Streckenabschnitt eine relativ geringe Streckenbelastung gegeben, sodass ein höherer Kapazitätsverbrauch auf der Schwarzwaldbahn zur Entlastung des Knotens Offenburg sinnvoll sein könnte.

⁵ Ein Aufschlag von null Minuten bedeutet, dass der Kupplungsvorgang innerhalb der Haltezeit durchgeführt werden kann und somit keine zusätzliche Zeit für das Kuppeln anfällt. Dies könnte mit einer neuartigen Kupplungstechnologie umgesetzt werden. Dabei könnte es sich z. B. um eine virtuelle Kupplung handeln, die auf eine mechanische Verbindung verzichtet und eine drahtlose Kommunikation zwischen den Triebfahrzeugen aufbaut. Die Abstandshaltung während der Fahrt würde dann durch Regelungstechnik und Sensorik erfolgen.

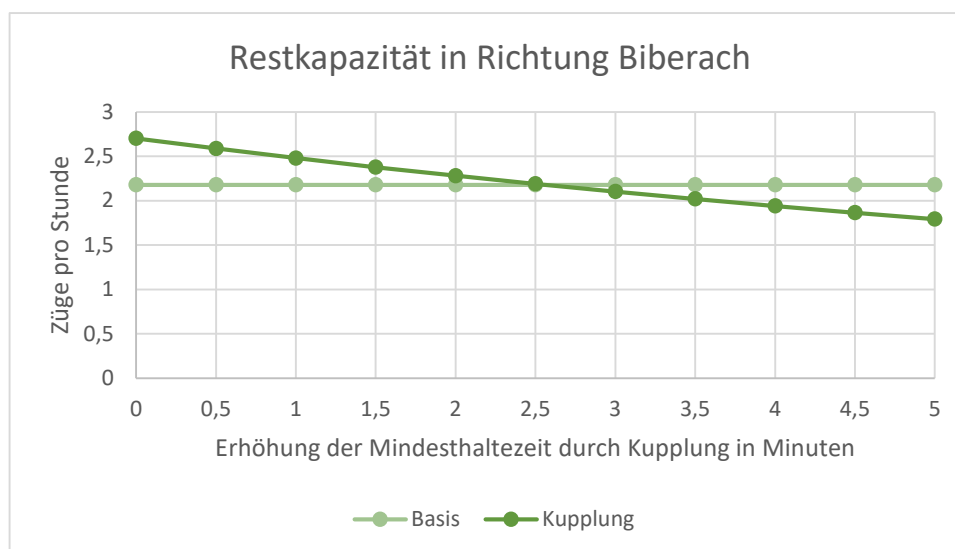


Abbildung 24: Einfluss der Kupplungszeit auf die Restkapazität in Richtung Biberach

Vor diesem Hintergrund wird in der Folge der Kapazitätsverbrauch bei der Einbindung der Züge der Schwarzwaldbahn in den Knoten Offenburg betrachtet. Da die MKB in Szenario 2 lediglich eine Auswirkung auf den südlichen Bahnhofskopf besitzt, während in nördlicher Richtung keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem Anwendungsfall mit und ohne MKB zu erwarten sind, wird nachfolgend dieser Bereich untersucht. Zur Bewertung der Auswirkungen auf den Knoten Offenburg werden hierbei die Fälle „Verlängerung“ (ohne MKB) und „mit MKB“ auf der Schwarzwaldbahn (vgl. Abbildung 19) gemeinsam mit dem in Szenario 1 (siehe Abschnitt 6.4.2) mittels der Software RailSys analysierten Betriebskonzept des Deutschlandtaktes auf der Rheintalbahn untersucht.

Bei direktem Vergleich der durchgeführten Zugfahrten im südlichen Bahnhofskopf von Offenburg Hbf fällt auf, dass die Streckenbelastung der Rheintalbahn die Belastung auf der Schwarzwaldbahn bei Weitem überwiegt. Nichtsdestoweniger ist zu ersehen, dass bei den für den Deutschlandtakt unterstellten Fahrwegen bei getrennter Einfahrt der Regionalbahnen von der Schwarzwaldbahn ein Gleisabschnitt im östlichen Bereich des Bahnhofs, in dem sich Zugfahrten von Rheintalbahn und Schwarzwaldbahn überlagern, die höchste Zugbelastung auftritt. Im MKB-Fall mit gemeinsamer Einfahrt der Regionalbahnen auf der Schwarzwaldbahn fällt diese Belastung deutlich geringer aus und der höchst belastete Infrastrukturbereich liegt bei der Bahnhofseinfahrt aus Richtung Lahr auf der Rheintalbahn.

Bei der Auswertung der Infrastrukturbelegungszeiten der Zugfahrten fallen insbesondere die hohen Gleisbelegungszeiten in Offenburg Hbf in den beiden Anwendungsfällen mit und ohne MKB ins Auge (siehe Abbildung 26). Diese erklären sich durch die teilweise sehr langen Haltezeiten wendender Züge in Offenburg. Eine detaillierte Betrachtung dieses Sachverhalts wurde bereits in Abschnitt 6.4.2 gegeben. Nichtsdestoweniger ist auch hier – wengleich deutlich weniger ausgeprägt – ein Unterschied beim Kantenbelegungsgrad zwischen den beiden Anwendungsfällen mit und ohne MKB im südöstlichen Bahnhofsbereich zu beobachten.

Mit Blick auf die Bewertung der Einbindung der Züge der Schwarzwaldbahn wird abschließend der Weichenbereich im südlichen Bahnhofskopf gesamtheitlich untersucht. Hierzu kann ein Ansatz von Schwanhäüßer [70] verwendet werden, welcher eine Bewertung des Fahrstraßenknotens auf Basis der Verkettung von Belegungen erlaubt. Hierbei wird der kritische Pfad sich gegenseitig ausschließender Zugfahrten im Knoten gebildet und die Servicequalität anschließend mittels eines einkanaligen Warteschlangenmodells bemessen (vgl. auch die Beschreibung in Nr. [71] oder [60]). Für den südlichen Bahnhofskopf von Offenburg Hbf ergeben sich dabei die in Tabelle 4 dargestellten Kennzahlen.

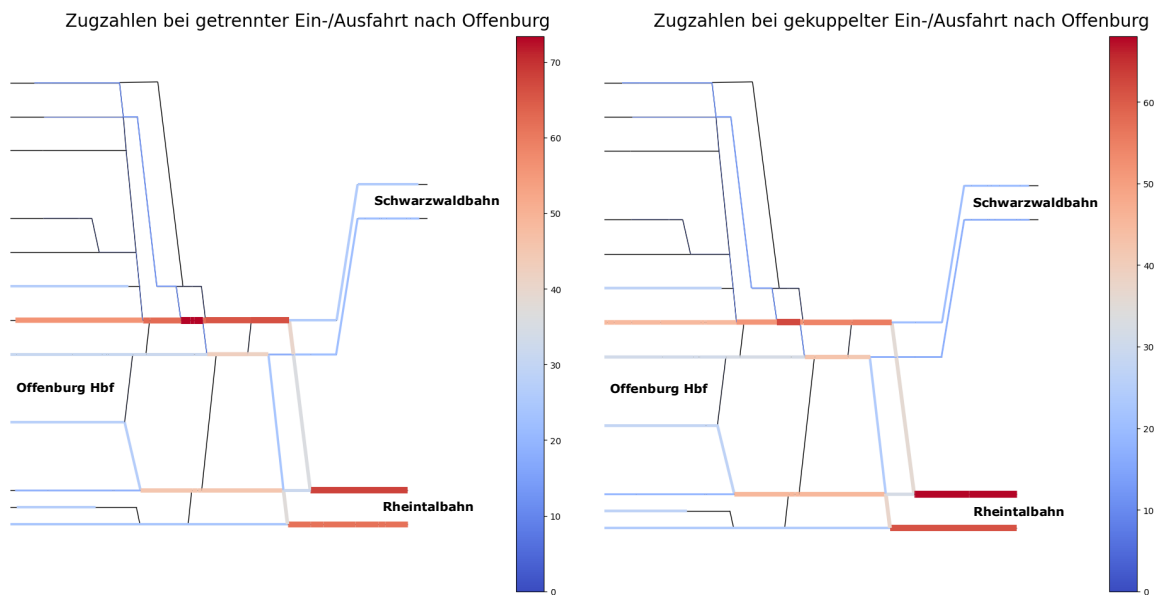


Abbildung 25: Vergleich der Infrastrukturlastung (Zugzahlen) im südlichen Bahnhofskopf von Offenburg Hbf bei getrennter (links) und gekuppelter (rechts) Ein-/Ausfahrt

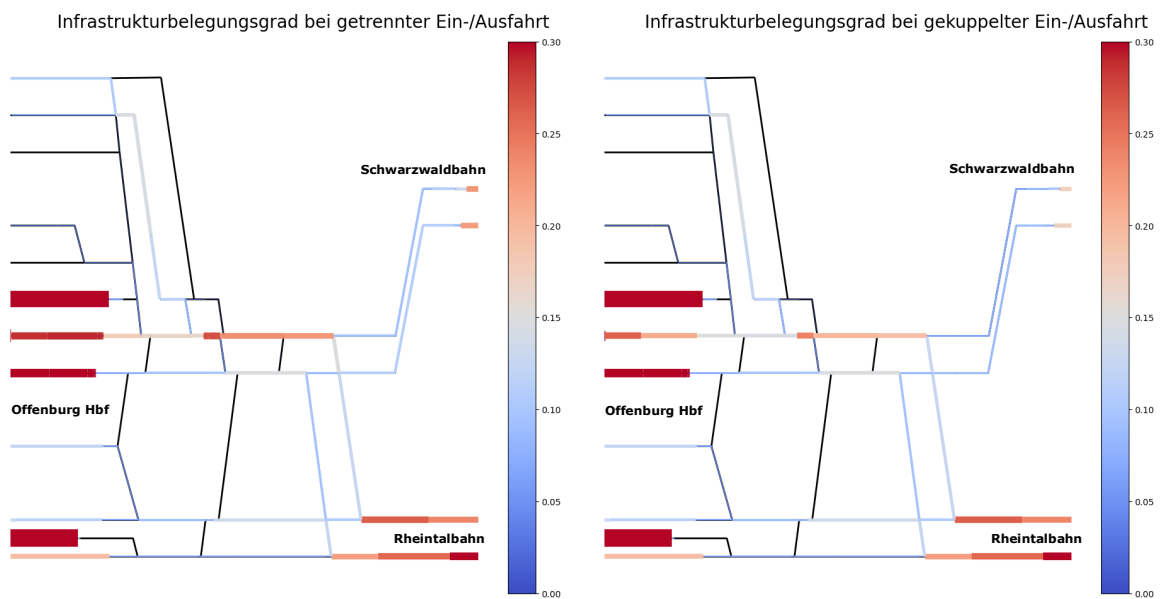


Abbildung 26: Vergleich der Infrastrukturlastung (Belegungsgrad) im südlichen Bahnhofskopf von Offenburg Hbf bei getrennter (links) und gekuppelter (rechts) Ein-/Ausfahrt

Auffällig hierbei ist der hohe Ausschlussgrad der in Offenburg Hbf durchgeführten Zugfahrten, was auf die dominierende Belastung der Rheintalbahn zurückzuführen ist. Zudem wird deutlich, dass bei separater Einbindung aller Regionalbahnen von der Schwarzwaldbahn ein Qualitätsfaktor von 1,49, d. h. eine an der oberen Grenze des als risikobehaftet zu bezeichnenden Bereichs (vgl. RiL 405 [55]), zu beobachten ist. Im Szenario mit gekuppelter Einfahrt ist demgegenüber nur ein Qualitätsfaktor von 1,21 ausgewiesen, der sich an der Grenze zwischen noch guter und risikobehafteter Belastung befindet.

TABELLE 4: ERGEBNISSE DER KNOTENANALYSE DES SÜDLICHEN BAHNHOFSKOPFES VON OFFENBURG HBF MITHILFE DES VERFAHRENS DER VERKETTUNG NACH SCHWANHÄUßER

	Getrennte Ein-/Ausfahrt	Gekuppelte Ein-/Ausfahrt
Gesamtzugzahl	177	166
Anteil sich ausschließender Fahrten (Verkettungszahl φ)	55,5 %	57,0 %
Anzahl verketteter Züge	98	95
Anteil Personenzüge	66,5 %	64,3 %
Mittlere Bedienzeit	2,50 min	2,45 min
Mittlere Wartezeit	1,47 min	1,27 min
Qualitätsfaktor	1,49	1,21

Die durchgeführten Berechnungen erheben hierbei jedoch nicht den Qualitätsanspruch einer vollständigen, detaillierten Knotenanalyse. So liegen bspw. keine belastbaren Daten für die Wahl der Fahrwege im Rahmen des zukünftigen Betriebskonzepts des Deutschlandtaktes 2030 sowie für die Laufwegwahl des Güterverkehrs vor. Ferner stützt sich die Analyse auf die Infrastruktur des Bahnhofs Offenburg und betrachtet keine weitergehenden Wechselwirkungen auf die bzw. von der Rheintalbahn. Zu guter Letzt soll mit der Einführung des Deutschlandtaktes 2030 ein durchgehend viergleisiger Ausbau (Streckenumbau) mit der Möglichkeit der Umfahrung des Bahnhofs Offenburg realisiert werden, der hier nicht berücksichtigt ist. Dessen ungeachtet kann anhand der Untersuchung der Knotenbelastung sowie der bei Ein-/Ausfahrt im Warteschlangenmodell entstehenden Wartezeiten geschlussfolgert werden, dass im Knoten Offenburg bei den gewählten Fahrwegen und der hohen Grundbelastung des Deutschlandtaktes 2030 auf der Rheintalbahn durch die Kupplung vor Einfahrt in den Knoten dieser entlastet werden kann. Vergleichbare Ergebnisse sind bei anderen Bahnhöfen, in denen sich die Fahrwege der Zugfahrten der Nebenbahn mit denen der auf den Hauptstrecken verkehrenden Züge im Knoten stark überlappen, zu erwarten. Gleichwohl ist ebenfalls zu bedenken, dass eine Kupplung vor dem Knoten zulasten der Umsteigefrequenz zwischen Nebenbahn und Hauptverkehrsachsen im Knoten führt und somit in Bezug auf die Erschließungswirkung auch negative Nebeneffekte besitzt.

6.4.4 Kupplung BEMU mit EMU (Szenario 3)

Szenario 3 beschreibt die Verlängerung der Nebenlinie OSB 4, Biberach–Oberharmersbach, bis Offenburg (BEMU, RB). In einem zweiten Schritt wird die Linie OSB 4 mit der Linie OSB 1, Offenburg–Achern–Ottenhöfen (BEMU, RB), zur neuen Linie OSB 1X (BEMU, RB) verknüpft. Unter Nutzung der MKB erfolgt eine Kupplung der Linie OSB 1X (BEMU, RB) mit dem durchgehenden BW Ex 10, Karlsruhe–Offenburg–Konstanz (EMU, RE).

Ähnlich wie in Szenario 2 (vgl. Unterabschnitt 6.4 3) sollen hierdurch direkte Verbindungen nach Offenburg angeboten werden, ohne die Belastung des Knotens Offenburg zu erhöhen. Angesichts der unterschiedlichen fahrdynamischen Eigenschaften des RE und der RB-Fahrzeuge ist hier zu prüfen, wie sich die gekuppelte Fahrt zwischen Achern und Biberach auf die Fahrzeit und damit die Streckenkapazität auswirkt⁶. Das Linienkonzept ist in Abbildung 27 dargestellt.

⁶ Als Unterschied in den Zugcharakteristiken sind die maximale Geschwindigkeit, die jeweilige Länge, die Fahrzeugmasse, die Antriebsleistung sowie weitere Parameter wie Beschleunigungs- oder Bremsvermögen zu nennen. Eine Veränderung dieser Parameter bedingt unmittelbar eine Änderung in der Fahrdynamik und wirkt sich auf die (theoretische) Fahrzeit aus.

Erhoffte Vorteile:

- umsteigefreie Verbindungen
- Knoten Offenburg wird trotz Angebotsausweitung nicht zusätzlich belastet.
- Entlastung der Rheintalbahn zwischen Achern und Offenburg

Herausforderungen:

- Kupplung von RE und RB mit unterschiedlicher Fahrdynamik
- Kupplung in Biberach auf dem durchgehenden Hauptgleis
- Kupplung in Achern erfordert Kreuzung des Gegengleises.
- Kupplung in Dreifachtraktion (Bahnsteiglängen beachten)

Benötigter Fahrzeugeinsatz:

- OSB 1X (RB): 2 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h
- BW 10 Ex (RE): 1 × Double Deck EMU (4-Teiler), $v_{max} = 160$ km/h

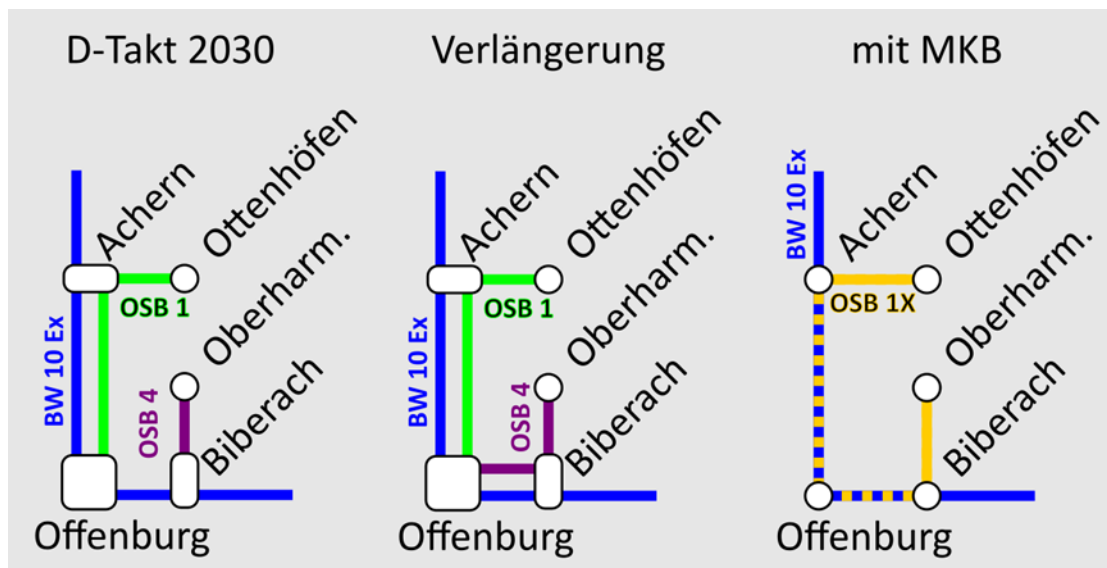


Abbildung 27: Linienkonzeptscenario 3

In Ergänzung zu den beiden vorhergehenden Szenarien legt Szenario 3 einen Fokus auf Streckenkapazitätseffekte auf konstruktiver Ebene. Beim vorgestellten Szenario wird untersucht, wie sich eingesparte Trassen durch gekuppelte Züge und die dadurch entstehende zusätzliche Kupplungszeit sowie mikroskopische Fahrwegseffekte zueinander verhalten.

Das Szenario sieht vor, dass durch Kupplung der von Ottenhöfen kommenden OSB 1X mit dem von Baden-Baden kommenden BW 10 Ex in Achern eine Trasse je Stunde und Richtung auf der Rheintalbahn eingespart werden kann (jene Trasse der ursprünglich nach Offenburg durchgebundenen OSB 1X zwischen Achern und Offenburg). Die Fahrplankonstruktion in RailSys zeigt dies anschaulich, wie dem Vergleich der Bildfahrpläne in Abbildung 28 zu entnehmen ist.

Aus Abbildung 28 ist ersichtlich, dass die kurze OSB-1X-Trasse im Basisfahrplan (oberes Bild, kurze grüne Trasse in der Mitte der Abbildung) durch das MKB-Szenario eingespart werden kann: Es kann Fahrplankapazität gewonnen werden. Gleichzeitig zeigt der Bildfahrplan auch, dass sich durch das MKB-Szenario eine Aufenthaltszeit des BW 10 Ex ergibt (Abbildung 28: unteres Bild, gelbe Trasse).

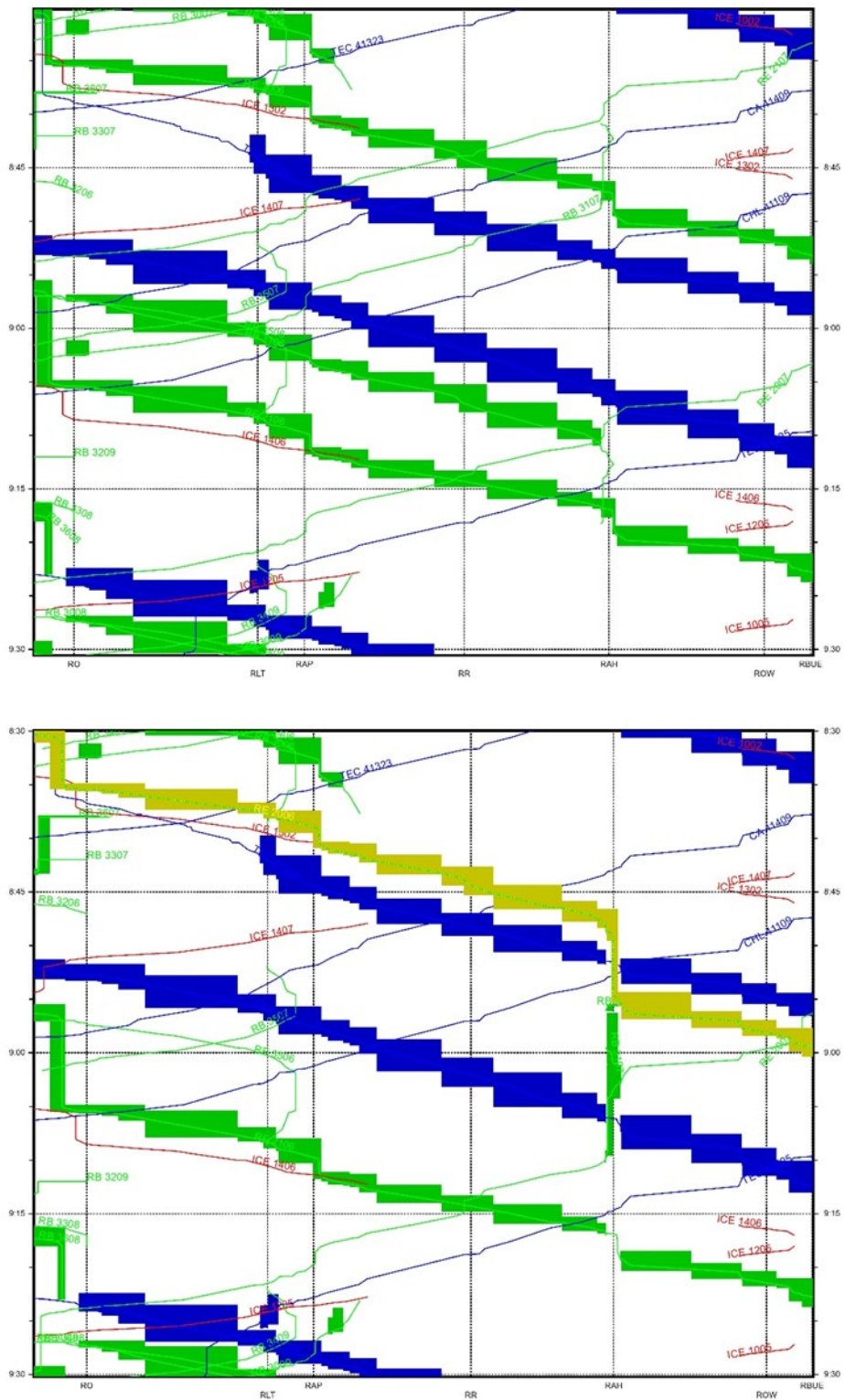


Abbildung 28: Streckenabschnitt Offenburg–Achern in RailSys in der Zeit von 08:30 bis 09:30 Uhr, Vergleich der Bildfahrpläne in Szenario 3 ohne MKB (oben) und mit MKB (unten)

Der mit fünf Minuten veranschlagte Kupplungsvorgang in Achern bewirkt im konkreten Beispiel, dass ein hinter dem BW 10 Ex verkehrender Güterzug (blau) selbigen überholt (zur Festlegung der Kuppeldauer siehe Abschnitt 6.5). Die Abbildung zeigt auch anhand des schmalen grünen Verlaufs die vor- und nachgelagerten Fahrten der Linie OSB 1X, die zwischen Achern und Ottenhöfen verkehren. Der Kupplungsvorgang ist in Abbildung 29 exemplarisch dargestellt.

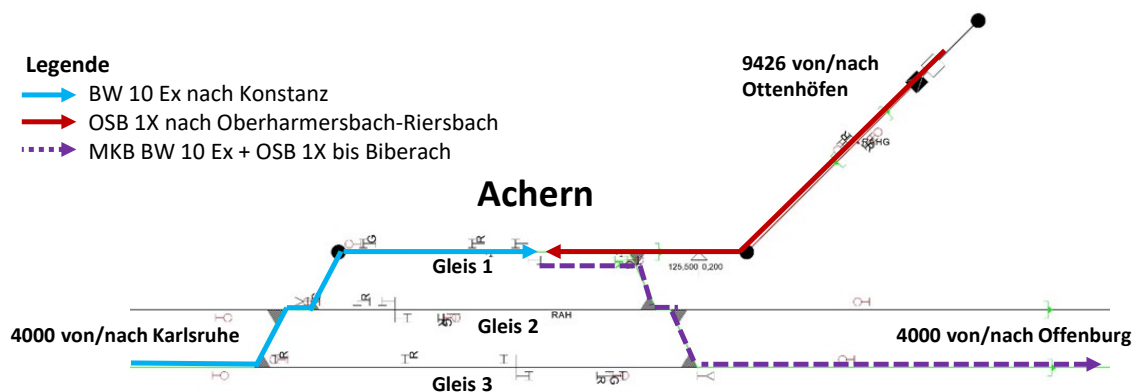


Abbildung 29: Spurplan Bahnhof Achern in RailSys, Kupplungsvorgangsszenario 3, BW 10 Ex in Hellblau, OSB 1X in Dunkelrot, MKB-Zugverband in Lila

Der von links aus Richtung Baden-Baden/Karlsruhe kommende BW 10 Ex (in Hellblau) hält in Achern entgegen des ursprünglichen Fahrplans auf dem Nebengleis und muss dazu das durchgehende Hauptgleis der Gegenrichtung kreuzen (dies ist in Fahrrichtung Karlsruhe nicht der Fall). Die aus Ottenhöfen bzw. Achern Stadt kommende Regionalbahn OSB 1X (dunkelrot) fährt bereits vorher in das Gleis ein und wird dann an den ankommenden BW 10 Ex gekuppelt. Anschließend folgt die gemeinsame Fahrt über Offenburg bis Biberach (lila).

Die Konstruktion in RailSys zeigt, dass das hier beschriebene betriebliche Vorgehen ohne zusätzlich entstehende Konflikte möglich ist. Dies ist auf den viergleisig verlaufenden Streckenabschnitt zwischen Karlsruhe und Freiburg zurückzuführen, der eine Entmischung von Fern- und Regional- bzw. Güterverkehr vorsieht und so einen größeren Puffer für das vorgestellte Manöver bewirkt. Das Fahren in das Gegengleis, wie es hier erforderlich ist, ist generell eine Betriebsweise, die sorgfältig abgewogen werden sollte. Auch wenn die Fahrplankonstruktion im vorliegenden Fall eine Konfliktfreiheit bestätigt, ist ein solches Manöver auf einem hochbelasteten Korridor wie der Rheintalbahn nicht zu empfehlen.

Obwohl eine konfliktfreie Konstruktion des Trassengefüges möglich ist, ist auf Fahrplaneffekte mit Auswirkungen auf nachgelagerte Nebenstrecken wie in Abbildung 30 gezeigt hinzuweisen.

Im Hinblick auf die durch Einführung des Deutschlandtaktes steigende Wichtigkeit zueinander passender Fahrplan- und Taktzeiten kann anhand der obigen Abbildung gezeigt werden, dass durch zusätzliche Kupplungszeiten bzw. -manöver Konflikte auf anderen Strecken entstehen können. Abbildung 30 zeigt die laut Deutschlandtakt vorgesehenen Ankunftszeiten bzw. Abfahrtszeiten des BW 10 Ex in Achern (Minute 10 bzw. Minute 47). Wird der Prämisse gefolgt, dass die Wartezeiten für Regionalbahnen stets höher als für Regional-Express-Linien sein sollen, und wird der Verlauf in Richtung Süden betrachtet, so wird angenommen, dass die zu kuppelnde OSB 1X aus Ottenhöfen demnach bereits zwei Minuten vor Einfahrt des BW 10 Ex in Achern eintrifft. Wird zudem eine Kupplungszeit von fünf Minuten angenommen, so beträgt die erforderliche Aufenthaltszeit der OSB 1X im Kupplungsgleis insgesamt sieben Minuten. Um den nach dem Deutschlandtakt vorgegebenen Abfahrtszeitpunkt des BW 10 Ex in Minute 10 zu ermöglichen, ist demnach eine Ankunft der OSB 1X in Achern in Minute 03 erforderlich. Umgekehrt

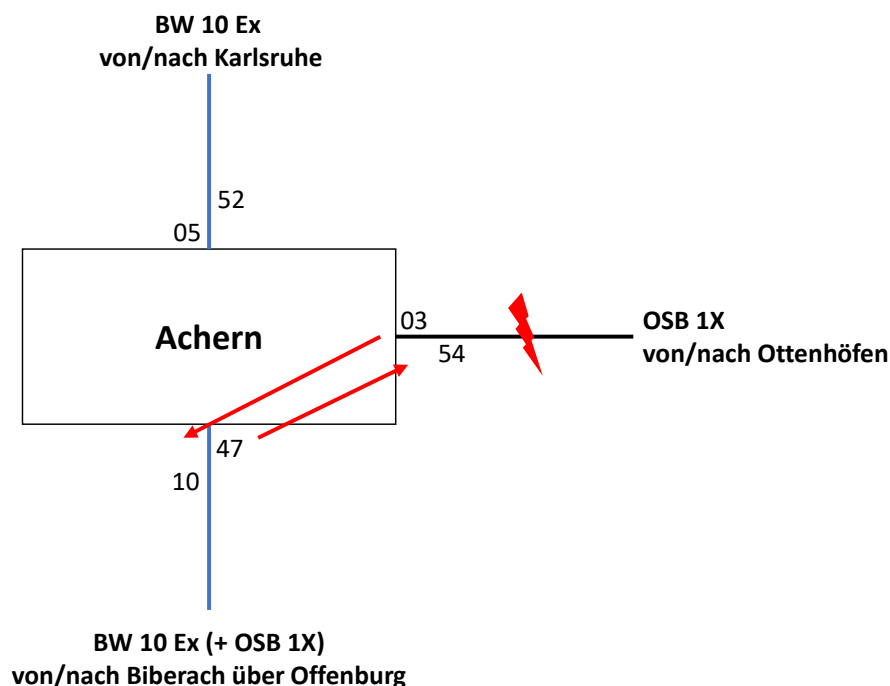


Abbildung 30: Taktknoten Achern, Auswirkungen auf Nebenstrecke durch geplante MKB

Ergibt sich eine Abfahrt der OSB 1X in Achern in Richtung Ottenhöfen sieben Minuten nach Ankunft des BW 10 Ex in Richtung Norden, also in Minute 54. Aufgrund der Eingleisigkeit der Strecke Achern–Ottenhöfen und einer Regelfahrzeit von 20 Minuten wird es an dieser Stelle zu einem Konflikt auf selbiger Strecke zwischen den beiden OSB-1X-Regionalbahnen im Bereich Achern Stadt kommen. Soll der Deutschlandtakt so gut wie möglich beibehalten werden, müssen an dieser Stelle infrastrukturelle Ausbauten zur Ermöglichung der Begegnung der beiden Züge erwogen werden (zweigleisiger Begegnungsabschnitt).

Das Verkehren eines gekuppelten Verbands aus BW 10 Ex und OSB 1X kann je nach Baureihe mit verminderter Höchstgeschwindigkeit einhergehen (hier im Beispiel BW 10 Ex + OSB 1X mit 140 km/h statt BW 10 Ex allein mit 160 km/h). In RailSys bewirkt dieser Aspekt zwischen Offenburg und Achern je nach Gleis eine Fahrzeitverlängerung von 30 bis 60 Sekunden. Somit erhöht sich die Fahrzeit des gekuppelten Zuges (BW 10 Ex + OSB 1X) auf dem Abschnitt im Vergleich zum Basisfahrplan, in dem BW 10 Ex und OSB 1X getrennt verkehren, leicht. Das bedeutet, dass der BW 10 Ex eine leichte Fahrzeitverlängerung erhält. Im Hinblick auf den Deutschlandtakt 2030 scheint diese geringe Fahrzeitverlängerung noch akzeptabel. Deutlich gravierender sind allerdings die zeitlichen Auswirkungen der verlängerten Haltezeit in Achern. Für den auf dem Hauptkorridor verkehrenden BW 10 Ex verlängert sich die Fahrzeit durch das Kuppeln in Achern stets um fünf Minuten. Dies stellt vor dem Hintergrund eines Taktfahrplans eine bedeutende Fahrzeitverlängerung dar. Es ist zu prüfen, inwiefern die benötigte Kantenfahrzeit des BW 10 Ex im Deutschlandtakt 2030 mit einer Verlängerung der Fahrzeit um fünf Minuten vereinbar ist. Je nach Verhältnis von Taktzeit, Distanz zwischen zwei Hauptknoten und der assoziierten Kantenfahrzeit kann es hier zu erheblichen Auswirkungen auf Anschlussverbindungen in den Taktknoten kommen, da bei einem integralen Taktfahrplan die Kantenfahrzeit ein Vielfaches der halben Taktzeit betragen sollte [69].

6.4.5 Kupplung BEMU mit EMU (Szenario 4)

Ein zusätzliches viertes Szenario betrachtet die Möglichkeit zur Einsparung von Trassenkapazitäten auf einem sehr kurzen Abschnitt der hochbelasteten Rheintalbahn zwischen Appenweier und Offenburg durch die Kupplung der in geringem Abstand verkehrenden Linien. Diese sind:

- OSB 2X (OSB 2 + OSB 5): Bad Griesbach–Offenburg–Freudenstadt (BEMU, RB)
- E 31: Karlsruhe–Basel (EMU, RE)

Angesichts der nur kurzen Überlappung der Linien ist zu untersuchen, ob die Streckenkapazität trotz der Kupplungsvorgänge in Appenweier und Offenburg erhöht werden kann und wie sich das Vorgehen auf die Fahrzeiten der Züge auswirkt. Für die Fahrgäste ergeben sich keine Vorteile. Das Linienkonzept ist in Abbildung 31 zu sehen.

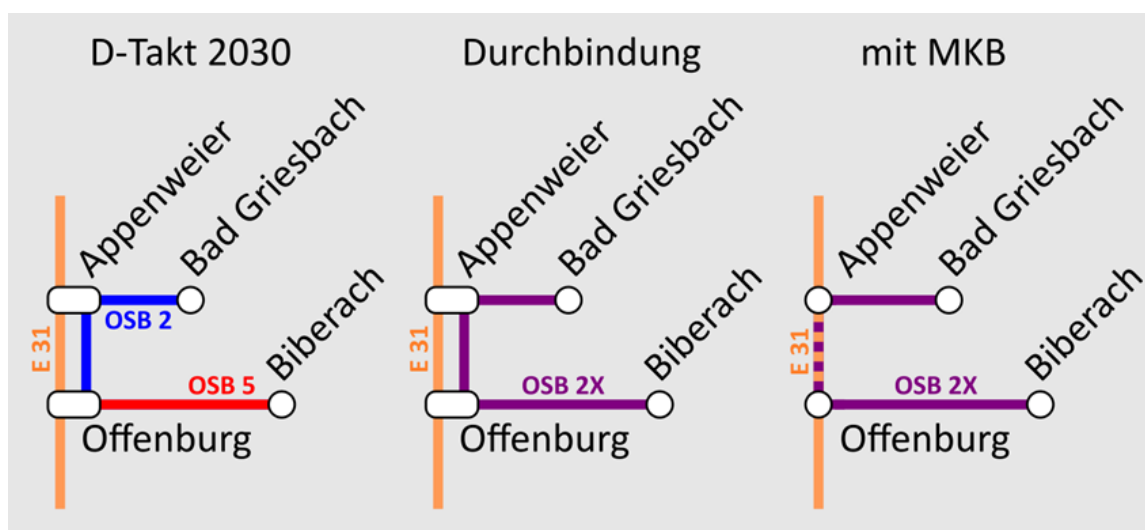


Abbildung 31: Linienkonzeptsszenario 4

Erhoffte Vorteile:

- Verringerung der Streckenbelastung zwischen Appenweier und Offenburg

Herausforderungen:

- Kupplung von RE und RB mit unterschiedlicher Fahrdynamik
- sehr kurze Strecke, auf der die gekuppelte Fahrt genutzt werden kann
- Auswirkungen der Kupplungsvorgänge auf die Fahrzeiten
- Kupplung in Dreifachtraktion (Bahnsteiglängen beachten)

Benötigter Fahrzeugeinsatz:

- OSB 2 (RB): 1 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h
- OSB 5.1 (RB): 1 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h
- OSB 5.2 (RB): 1 × BEMU (2-Teiler), $v_{max} = 140$ km/h
- E31 (RE): 2 × Double-Deck-EMU (4-Teiler), $v_{max} = 160$ km/h

Die Betrachtung des vierten Szenarios beschränkt sich auf die oben dargestellten Kernpunkte. Innerhalb des Projekts findet jedoch keine Untersuchung mittels fahrplankonstruktiver oder analytischer Methode statt.

6.5 Auswirkungen einer MKB auf Fahrzeugeinsatz und Umlaufplanung

Neben den betrieblichen Auswirkungen einer Multikuppelbarkeit auf die Kapazität bzw. Streckenleistungsfähigkeit ergeben sich weitere Effekte auf die Umlaufplanung und insbesondere auf die Dimensionierung der Fahrzeugreserve. Im Falle der Umlaufplanung sind zwei Anwendungsfälle zu unterscheiden

- mit Fokus auf die Streckenleistungsfähigkeit (Szenario 2, Unterabschnitt 6.4.3; Szenario 3, Unterabschnitt 6.4.4; Szenario 4, Unterabschnitt 6.4.5) und solche
- mit Fokus auf neue Durchbindungen von Zügen (Szenario 1, Unterabschnitt 6.4.2).

Im ersten Fall kommt es generell nicht zu einer Einsparung von Fahrzeugen, da weiterhin dieselbe Anzahl an Fahrzeugen verkehrt, lediglich zu längeren Zügen gekuppelt. Sofern bestehende Linienverläufe zusammengelegt werden (Szenario 1) und die Kupplungszeiten ausreichend kurz sind, bleibt der Fahrzeugbedarf unverändert. Wenn allerdings Linien bis in den Knoten verlängert werden, die zuvor an einem Abzweigbahnhof geendet haben, entsteht ein zusätzlicher Fahrzeugbedarf. Dieser kann aber möglicherweise durch eine entsprechend erhöhte Qualität der dann umsteigefreien Verbindung für die Fahrgäste gerechtfertigt werden. Im Fall von Durchbindungen (Szenario 1) kann es sogar vorkommen, dass durch die geschickte Kombination von Wendezeiten im Knotenbahnhof ein effizienterer Umlauf entsteht, der weiterhin die notwendige betriebliche Stabilität aufweist. Im untersuchten Szenario lässt sich auf diese Weise ein reduzierter Fahrzeugbedarf von sieben gegenüber acht Fahrzeugen realisieren (siehe Tabelle 5). Dies setzt jedoch sehr spezifische Rahmenbedingungen voraus (vor allem die Durchbindung kompletter Züge statt der in Unterabschnitt 6.4.2 vorgeschlagenen Doppeltraktion zwischen Kehl und Lahr, welche weitere Fahrzeuge bindet) und sollte daher nicht verallgemeinert werden.

TABELLE 5: FAHRZEUGBEDARF DER DURCHBINDUNG STRAßBURG–OFFENBURG–FREIBURG (SZENARIO 1)

Linie	von	nach	Σ Fahrzeiten in Minuten	Σ Wende in Minuten	Wende in %	Takt in Minuten	Fzg.	Σ Fzg.
OSB 3	Straßburg	Offenburg	55	35	64	30	3	8 alt
BSB 8	Offenburg	Freiburg	106	44	42	3	5	
OSB 3 + BSB 8	Straßburg	Freiburg	161	49	30	30	7	7 optimiert

Ein relevanter Bestandteil bei Umlaufbetrachtungen ist u. a. der Aspekt der Halte- und Kuppelzeit in Bahnhöfen. Insbesondere der Zeitbedarf für das Kuppeln und Entkuppeln spielt vor dem Hintergrund der MKB eine wichtige Rolle, da die Kuppelvorgänge bei flächendeckender Einführung einer MKB zunehmen werden. Zur Plausibilisierung realistischer Zeitaufwände für das Kuppeln und Entkuppeln werden die aktuell betrieblich möglichen Kupplungszeiten durch die Analyse aller im Deutschlandtakt 2030 vorgesehenen Zugflügelungen ermittelt. Bis auf wenige Ausnahmen mit spezifischen technischen und betrieblichen Hintergründen (z. B. S-Bahn Karlsruhe) finden sich minimale Kupplungszeiten von fünf bzw. drei Minuten (erster bzw. zweiter Zug, jeweils inkl. Haltezeit) und Trennungszeiten von zwei bzw. vier Minuten. Da diese Zeiten jeweils an mindestens fünf Stellen ohne Besonderheiten vorgesehen sind,

werden diese für die Betrachtung gewählt. Es ergeben sich Aufschläge auf die Haltezeit von vier bzw. zwei (Kuppelvorgang) und einer bzw. drei (Trennung) Minute(n). Die vollständige Auflistung der Zeiten ist in Anhang 9 des Berichtes zu finden.

Der entscheidende Vorteil bezüglich des Fahrzeugbedarfs ergibt sich jedoch bei der Fahrzeugreserve: Durch die Multikuppelbarkeit wird es technisch möglich, dass verschiedene Netze oder auch Betreiber gegenseitig verfügbare Fahrzeuge nutzen, wenn es durch Baustellenfahrpläne, Infrastruktur- oder Fahrzeugdefekte zu Fahrzeugengpässen kommt. Hierdurch kann die Fahrzeugreserve über die Summe der Fahrzeuge in einer Region gebildet werden statt für jedes einzelne Netz. Durch Rundungseffekte (halbe Reservefahrzeuge gibt es nicht) sind für kleinere Netze oft erhöhte Fahrzeugreserven notwendig. In Tabelle 6 sind drei beispielhafte Berechnungen ohne Bezug zu den oben vorgestellten Szenarien für die Fahrzeugreserve abgebildet, bei welchen eine Einsparung von null bis zwei Fahrzeugen bzw. 1,0 bis 4,8 Prozent des Fahrzeugbedarfs erreicht werden. Dieser Aspekt ist relevant, wenn die Reserve statt für einzelne Linienbündel (vgl. obige Szenarien) für ein größeres Gesamtnetz berechnet würde. Die erste Spalte in Tabelle 6 stellt Linienbündel aus den Szenarien 1, 2 und 3 dar, ist aber dennoch nur beispielhaft zu verstehen.

Zusätzliche Effekte können dadurch auftreten, dass bei großen Netzen von der Empfehlung der 10- bzw. 15-Prozent-Fahrzeugreserve zugunsten detaillierter Zuverlässigkeitsbetrachtungen teilweise nach unten abgewichen werden kann, was bei kleinen Netzen nur selten möglich ist.

Zu diesem Zweck werden in Tabelle 6 exemplarisch vier Teilnetze und drei Beispiele aufgezeigt, für die jeweils eine entsprechende Fahrzeuganzahl angenommen wird (bspw. für Teilnetz 1 eine benötigte Fahrzeuganzahl von fünf Fahrzeugen für das erste Beispiel). Danach wird eine Berechnung der benötigten Reservefahrzeuge vorgenommen, welche mit einem Wert von zehn und 15 Prozent angesetzt wird. Daraus ergibt sich für dieses Teilnetz durch die oben beschriebene Rundung jeweils ein weiterer Fahrzeugbedarf.

TABELLE 6: EINSPARUNGEN BEI DER FAHRZEUGRESERVE DURCH MKB ÜBER MEHRERE NETZE

	Bsp. 1			Bsp. 2			Bsp. 3		
	Fzg.	Reserve 10 %	Reserve 15 %	Fzg.	Reserve 10 %	Reserve 15 %	Fzg.	Reserve 10 %	Reserve 15 %
Teilnetz 1	5	1	1	7	1	2	11	2	2
Teilnetz 2	8	1	2	18	2	3	23	3	4
Teilnetz 3	6	1	1	15	2	3	46	5	7
Teilnetz 4				9	1	2	7	1	2
Gesamtnetz	19	2	3	49	5	8	87	9	14
Einsparung [Fzg.]		1	1		1	2		2	1
Einsparung [%]		4,8	4,5		1,9	3,5		2,1	1,0

Werden anstelle der jeweiligen Teilnetze diese Reservefahrzeuge für eine Zusammenfassung aller vier Teilnetze vorgenommen, wie sie mit der MKB erreicht werden kann, ergibt sich ein geringerer Fahrzeugbedarf gegenüber einer separaten Betrachtung der Teilnetze. Bspw. ergibt dies im ersten Beispiel eine Einsparung von einem Reservefahrzeug, was 4,8 Prozent entspricht (für die 10-Prozent-Reserve), bezogen auf die Gesamtanzahl von 21 Fahrzeugen (19 + 2 Reservefahrzeuge). Wenn sich die Gesamtanzahl der Fahrzeuge, die zusammengefasst werden können (Beispiel 2 und Beispiel 3), erhöht, dann fallen aufgrund der Komplexität des Fahrzeugbedarfs und des Einsatzes die Zahl der eingesparten Fahrzeuge prozentual geringer aus.

Über diese rechnerische Einsparung hinaus ergibt sich eine stark erhöhte betriebliche Flexibilität bei der Bedienung von außerplanmäßigen Situationen. Zugausfälle wegen zufällig auftretenden Fahrzeugmangels in einem Netz könnten mittels MKB flexibel durch in anderen Netzen verfügbare Reservefahrzeuge aufgefangen werden. Um diese Potenziale zu nutzen, ist es jedoch notwendig, auch organisatorisch eine klare Regelung zwischen den Fahrzeughaltern und -betreibern zu finden, die einen gegenseitigen Einsatz mit kurzer Vorlaufzeit und ohne finanzielle Nachteile ermöglicht. Denkbar wäre ein automatisierter Buchungs- und Abrechnungsprozess, über den alle Betreiber auf die gemeinsame Fahrzeugreserve zugreifen können. Entscheidend für den Erfolg ist zudem, dass die Kosten für den Einsatz eines Reservefahrzeugs (inkl. Personal und Einsatzplanung) geringer sind als die fälligen Pönalen für einen Ausfall der Fahrten. Zudem wäre es von Vorteil, wenn gegenüber dem heutigen Zustand die Anzahl an Fahrzeugen in den Fahrzeugpools der Aufgabenträger deutlich erhöht wird. Des Weiteren könnte der Aufgabenträger vorschreiben, dass alle im Bereich des Aufgabenträgers in Betrieb befindlichen Fahrzeuge verpflichtend in diesen Pool integriert werden und bei Abstellung bzw. Nichteinsatz für eine virtuelle Reserve zur Verfügung stehen müssen.

Zu guter Letzt werden durch die Multikuppelbarkeit noch Änderungen von Wettbewerbsnetzen während der Vertragslaufzeit bzw. Umstrukturierungen bei Neuausschreibungen vereinfacht. Fahrzeuge unterschiedlicher Netze lassen sich ohne technische Änderungen neu einsetzen und Nachbestellungen von verschiedenen Herstellern und mit unterschiedlicher Losgröße lassen sich zusammen mit den bestehenden Fahrzeugen einsetzen.

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung zu technischen Aspekten

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Recherche zu an Triebzügen des SPNV verbauten Kupplungen sowie den die Kupplung betreffenden Normen und wissenschaftlichen Arbeiten durchgeführt. Insgesamt konnten acht Standards bzw. Regelwerke identifiziert werden, die sich mit der Kupplung befassen. Von diesen sind die Kupplung von Triebzügen betreffend folgende besonders relevant: EN 16019, TSI LOC&PAS, die UIC-Blätter 558/568 / IRS 50558, IEC 61375 und EN 50128. Diese Normen bzw. Regelwerke wurden gesichtet und auf Defizite bei der Normung hin analysiert. Als Kernproblem konnte herausgearbeitet werden, dass Defizite bei der Normung der Schnittstelle Kupplung vorliegen: Während die Ausführung des mechanischen Kupplungskopfes sowie die Position der Luftkupplungen der Scharfenbergkupplung (SchaKu) Typ 10 genormt ist, ist ihre Einbauhöhe nicht standardisiert. Hinzu kommt, dass für die Ausführung der Elektrokupplungen (E-Kupplungen) kein Standard existiert. Die E-Kupplungen werden je nach Fahrzeugausführung entsprechend der zu übertragenden Funktionen individuell gestaltet. Dies bringt eine sehr große Variantenvielfalt mit sich, innerhalb der eine Kompatibilität der Kupplungen nicht gegeben ist. Zudem ist die Ausführung der Leittechnik nicht genormt, sodass für dieselben Funktionen bzw. Informationen fahrzeugspezifisch unterschiedliche Datenprotokolle verwendet werden. Fahrzeuge mit unterschiedlicher Leittechnik können daher zwangsläufig nicht miteinander kommunizieren, was ein betriebliches Kuppeln unmöglich macht.

Ferner wurden wissenschaftliche Arbeiten zum Thema Kuppelbarkeit recherchiert. Es fand sich nur eine Dissertation, die die Problematik aufgreift und als Lösungsvorschlag eine virtuelle Kupplung der Fahrzeuge präferiert. Weitere Arbeiten betrafen ebenfalls die virtuelle Kupplung oder die automatische Mittelpufferkupplung im Schienengüterverkehr (SGV). In Shift2Rail liefen bereits Projekte zur Kuppelbarkeit im Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV).

Parallel zu der Recherche von Normen und wissenschaftlichen Arbeiten wurden technische Daten, Kupplungsbauarten, Stückzahlen und Verbreitungsgebiete von Triebzügen in Deutschland recherchiert. Als Datengrundlage dienten dazu Internetportale, Fahrzeugdatenbanken, Fachliteratur sowie Experteninterviews. Die Recherche ergab, dass aktuell deutschlandweit ca. 4.200 Triebzüge im SPNV unterwegs sind (ohne S-Bahn-Netze). Der Großteil davon (knapp 90 %) besitzt eine SchaKu Typ 10. Es zeigte sich, dass der aktuelle Fahrzeugbestand hinsichtlich der verbauten Kupplungen dennoch sehr inhomogen ist. Zwar besitzt ein Großteil der Fahrzeuge die SchaKu Typ 10 zur mechanischen Kupplung, aber die E-Kupplungen und die Leittechnik sind durch die fehlende Normung deutlich verschieden aufgebaut, sodass die Fahrzeuge baureihenübergreifend i. d. R. nicht kuppelbar sind.

Der Aufbau der SchaKu Typ 10 wurde im Bericht beschrieben. Zusätzlich wurden ausgewählte Stromlaufpläne analysiert, um eine Übersicht über zu übertragende Funktionen zu erhalten. Diese Funktionen belegen einen oder mehrere Pinkontakt(e) der E-Kupplung und besitzen je nach Fahrzeugtyp verschiedene Datenprotokolle. Wichtige Funktionen, die über die Kupplung geführt werden, sind vor allem sicherheitsrelevante Informationen wie Fahren/Bremsen, Türsteuerung oder Notbremse, aber auch andere Funktionen wie das Fahrgastinformationssystem (FIS), die Beleuchtungssteuerung oder eine Niederspannungssammelschiene.

Die technischen Gründe für die Diversitäten wurden weiter durch insgesamt zwölf verschiedene Expertinnen und Experten beleuchtet, die zur Kuppelbarkeit interviewt wurden. Hierbei wurde deutlich, dass die Problematik im Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit, Technik und Administration verortet werden kann. Wirtschaftliche Aspekte betreffen eine kostspielige Herstellung einer (herstellerübergreifenden)

universellen Kuppelbarkeit, technische Aspekte die fehlende Normung der Schnittstelle sowie administrative Aspekte die derzeitige Fahrzeugbeschaffungspraxis. Bspw. ist bei einer an das Ausschreibellos gebundenen Fahrzeugbeschaffung eine Kuppelbarkeit mit anderen losfremden Fahrzeugen nicht vorgesehen und wird deshalb technisch nicht umgesetzt. Umgekehrt fehlt durch die mangelhafte Standardisierung der Schnittstelle ein Anreiz, die Fahrzeuge entsprechend auszustatten.

In einem weiteren Schritt wurde analysiert, welche Fahrzeuge des heutigen Bestands miteinander in welchem Grad kuppelbar sind. Die Abstufung reicht von nicht kuppelbar, rein mechanisch kuppelbar, mechanisch und pneumatisch kuppelbar bis zusätzlich passende E-Kupplung und schließlich passender Leittechnik. Lediglich Fahrzeuge dieser letzten Stufe sind betrieblich kuppelbar. In drei verschiedenen Matrizen wurden die Fahrzeuge in den jeweiligen Netzgrößen betrachtet. Es zeigte sich, dass nur ein Bruchteil der Fahrzeuge betrieblich kuppelbar ist, zumeist innerhalb einer Baureihe eines EVU. Die Mehrzahl der Fahrzeuge ist mechanisch und pneumatisch kuppelbar, was immerhin im Abschleppfall hilfreich ist, aber einen gekuppelten Betrieb ausschließt.

Dieselbe Betrachtung wurde unabhängig von der technischen Kompatibilität hinsichtlich einer betrieblichen Kompatibilität durchgeführt. Hier zeigte sich, dass die meisten Fahrzeugkombinationen sinnvoll betrieblich kuppelbar sind, sofern sie dieselbe Antriebsart besitzen. Ein Kuppeln von Diesel- mit Elektrotriebzügen wird wegen fahrdynamischer Differenzen derzeit und voraussichtlich auch zukünftig nicht verfolgt. Einschränkend gilt jedoch, dass sehr lange Fahrzeuge (Fünf- und Sechsteiler) für einen Betrieb in Doppeltraktion bei gegebener Bahnsteiglänge zu lang sein können. Hierfür wären ausreichend lange Bahnsteige mit über 210 Meter Länge erforderlich.

Aufbauend auf der Analyse der Defizite wurden aktuelle Fahrzeugausschreibungen recherchiert und deren Anforderungen an die zu beschaffenden Fahrzeuge bewertet. Es zeigte sich, dass je nach Ausschreibung nur sehr wenige Mindestanforderungen an die Fahrzeuge gestellt werden, die Freiraum bei der Ausgestaltung lassen. Hinzu kommt, dass es bundesweit kein einheitliches Lastenheft für die Fahrzeuggestaltung gibt. Es gibt lediglich Empfehlungen ohne bindenden Charakter.

Abschließend wurde eine Handlungsempfehlung erarbeitet, um die herausgestellten Defizite beseitigen zu können. Die Handlungsempfehlung umfasst die Beseitigung administrativer sowie technischer Hemmnisse und schließt mit einer allgemeinen Handlungsempfehlung.

Die Beseitigung administrativer Hemmnisse umfasst die mangelnde Einheitlichkeit bei der Fahrzeugbeschaffung, die standardisiert erfolgen sollte. Ferner könnten Fahrzeuge losübergreifend beschafft werden, um einen kuppelbaren Fahrzeugpool zu bilden. Dies beinhaltet auch entsprechende Reservefahrzeuge, deren Zahl sich ggf. reduzieren ließe. Ein Verzicht auf Pönalzahlungen würde die Attraktivität der Aufrechterhaltung des Betriebs bei Fahrzeugausfall und den Anreiz zur Beschaffung kuppelbarer Fahrzeuge steigern.

Die Beseitigung technischer Hemmnisse umfasst die Erarbeitung eines Standards für die E-Kupplung und der zu übertragenden Funktionen. Die meisten Funktionen könnten über digitale Bussysteme (oder ähnlich) zusammengefasst werden. Eine Analyse ergab, dass nur wenige Funktionen hoch sicherheitsrelevant sind, sodass diese über einen speziellen hoch sicherheitsrelevanten Bus geführt werden könnten. Weniger sicherheitskritische Funktionen könnten in einem entsprechend weniger sicheren Bus gebündelt werden. Funktionen, die nicht ausschließlich dem Fahren dienen, wie das FIS sollten lokal auf dem Fahrzeug ausgeführt werden und direkt mit der Zentrale kommuniziert werden. So ließen sich die Zahl der Kontakte reduzieren und der Aufbau abwärts- wie aufwärtskompatibel gestalten. Die Datenprotokolle sollten standardisiert werden, damit eine einheitliche Übertragung gewährleistet werden kann. Hierzu könnten Gateways die Schnittstelle zur Fahrzeuleittechnik bilden, um die Informationen zu übersetzen.

Als allgemeine Handlungsempfehlung wurde ausgesprochen, wegen der Komplexität der Thematik weitere Nachfolgeprojekte zu initiieren. Es wurde vorgeschlagen, die notwendigen Akteure im System Bahn einzubeziehen, um die entsprechende Fachexpertise nutzen zu können. Die Zulassung sollte dabei stets parallel mitbetrachtet werden.

7.2 Zusammenfassung zu betrieblichen Aspekten

Mittels eisenbahnbetriebswissenschaftlicher Verfahren wurden die Auswirkungen einer MKB untersucht. Dabei kamen ein konstruktiver Ansatz sowie ein Kapazitätsplanungsansatz zur Anwendung. Die Grundlage für diese Ansätze bildete in allen Betrachtungsfällen eine fahrdynamische Simulation, mit deren Hilfe die entsprechenden Fahrzeiten und Trajektorien der Züge ermittelt wurden. Darauf aufbauend wurden unter Berücksichtigung der eisenbahnbetrieblichen Vorgaben aus der Infrastruktur und der Sicherheitstechnik die entsprechenden Sperrzeiten und im Mehrzugmodell die dazugehörigen Mindestzugfolgezeiten gebildet.

Für die Untersuchung wurden spezifische betriebliche Parameter ausgewählt. Je nach Szenario wurden unterschiedliche Gesichtspunkte adressiert, bspw. Trassenkapazität, Trassenverfügbarkeit, Gleisbelegung im Knoten oder der Fahrzeugbedarf. Für den Aufbau der Modellsysteme wurden zahlreiche Eingangsparameter bestimmt. Dazu zählen z. B. Infrastrukturparameter wie Halteplatz- und Bahnsteiglängen, aber auch Fahrzeugparameter wie Höchstgeschwindigkeit, Länge und Masse. Zudem bildet das jeweilige Betriebsprogramm mit dem Zugmix aus SPNV, SPFV und SGV eine wichtige Eingangsgröße für die Berechnungen und Simulationen.

Als Untersuchungsgebiet dienten sowohl SPNV-Strecken rund um den Knoten Offenburg (bis Straßburg, Ottenhöfen, Bad Griesbach, Oberharmersbach-Riersbach, Biberach, Hornberg) als auch Abschnitte der Rheintalbahn zwischen Offenburg und Achern. Innerhalb dieses Untersuchungsgebiets wurden die folgenden Szenarien hinsichtlich der Auswirkung einer MKB analysiert:

- Linienbündelung bzw. Durchbindung zweier Linien im Knoten Offenburg
- Vereinigung mehrerer Linien vor dem Knoten Offenburg (im Bahnhof Biberach)
- Kupplung eines Batterieelektrischen Fahrzeugs (BEMU) mit einem Elektrotriebwagen (EMU) auf der Rheintalbahn zwischen Achern und Offenburg

Anschließend wurden mithilfe einer (asynchronen) Fahrplankonstruktion im Untersuchungsgebiet auf Basis des Deutschlandtaktes 2030 die vorhandenen Zeitfenster für den Einsatz einer MKB ermittelt und ein entsprechender Fahrplan konfliktfrei konstruiert bzw. angepasst. Innerhalb der Knoten wurde zusätzlich anhand von Gleisbelegungsplänen die konstruktive Machbarkeit überprüft.

Neben der Konstruktion wurde ein analytischer Ansatz auf Basis der Warteschlangentheorie für die betrachteten Strecken und den unmittelbaren Zulauf des Knotens Offenburg gewählt. Dieser diente zur Ermittlung der vorliegenden Restleistungsfähigkeit, welche sich durch den Einsatz einer MKB ergibt.

Bei den o. g. Szenarien konnte gezeigt werden, dass sich durch den Einsatz einer MKB sowohl betriebliche Vorteile als auch entsprechende Herausforderungen ergeben. Zunächst konnte durch den konstruktiven Ansatz dargelegt werden, dass in den betrachteten Szenarien eine Umsetzung der MKB innerhalb des Fahrplangefüges des Deutschlandtaktes 2030 umsetzbar ist. Dabei stellt die größte identifizierte betriebliche Herausforderung die Kuppelzeit innerhalb der Bahnhöfe und die damit verbundene Gleisbelegungszeit dar. Insbesondere in Szenario 2 wurde deutlich, dass ein Kupplungsvorgang an einem Bahnsteig des durchgehenden Hauptgleises einen erheblichen Nachteil für die Leistungsfähigkeit der Strecke hat, da aufgrund der gegebenen Örtlichkeiten eine Umfahrung des zum Kuppeln belegten Gleises nicht

möglich ist. Daher sind zusätzliche Bahnsteige oder Nebengleise für den Kupplungsvorgang vorzusehen. Insbesondere für die Umsetzung des Deutschlandtaktes 2030, bei welchem sich alle Züge zur Taktzeit innerhalb des Knotens befinden, stellt dies eine besondere Herausforderung dar. Bei bestimmten Fahrrelationen kann es für Fahrgäste zu Fahrzeitverlängerungen gegenüber dem bisherigen Fahrplan kommen, da notwendige Kuppelzeiten abgewartet werden müssen, welche ohne MKB nicht aufgetreten sind (hier 5 min längere Haltezeit). Es ist daher zu überprüfen, ob insbesondere im Deutschlandtakt 2030 noch Fahrzeitreserven zwischen zwei Halten eingeplant werden können, um diese verlängerte Reisezeit auszugleichen.

Bei Kuppelmanövern im Rahmen der MKB kann es zu einer Verspätungsübertragung auf einen bislang pünktlichen Zug kommen, welcher auf einen verspäteten Zugteil warten muss. Die Leistungsfähigkeit von Eisenbahnknoten kann eingeschränkt sein, da die Einfahrgeschwindigkeiten insbesondere der zweiten Zugteile aufgrund der Einfahrt in besetzte Bahnsteiggleise reduziert sind. Eine weitere Herausforderung bei der Einführung der MKB ist die Sicherstellung der entsprechenden Kupplungsinfrastruktur. Dazu gehören insbesondere eine angepasste Leit- und Sicherungstechnik sowie ausreichende Kuppel- und Bahnsteiggleise. Bei der Einbindung in bestehende Fahrplankonzepte wie dem Deutschlandtakt 2030 ist zu bedenken, dass es durch die aufgrund der MKB vermehrt auftretenden Kuppelvorgänge zu längeren Haltezeiten kommt. Damit geht eine Verlängerung der Kantenfahrzeiten einher, was Auswirkungen auf bisherige Taktknoten haben kann (Anschlussverluste, aufwendige Anpassung von Taktknoten etc.).

Größere identifizierte betriebliche Nutzenaspekte bei Einführung einer MKB sind die Erhöhung der Zahl von Direktverbindungen aufgrund des Durchbindens einzelner Linien (auch bei unterschiedlichen Teilnetzen). Durch die MKB entsteht dadurch eine Erhöhung der Fahrgastkapazitäten, da mehrere Zugteile im Verbund verkehren und die zugehörigen Umstiege für die Reisenden entfallen. Ferner kann eine Reduktion der Bahnsteigbelegung durch das Zusammenlegen einzelner Linien erreicht werden, da nun mindestens zwei Zugteile an einem Bahnsteig gemeinsam im Zugverbund halten. Jedoch ist hierbei die entsprechend benötigte Bahnsteiglänge als Eingangskenngröße zu berücksichtigen. Ein großer betrieblicher Nutzen der MKB ist der Aspekt, dass unterschiedliche Fahrzeuge einander ersetzen können. Dadurch können Ersatzverkehre schneller und reibungsloser organisiert werden. Teilausfälle bei Mehrfachtraktionen können mittels MKB sehr gut kompensiert werden. Darüber hinaus gestalten sich Linienetzanpassungen deutlich flexibler. Die Liniennetzkonzeption ist mithilfe der MKB schneller als bisher an aktuelle Bedarfe anpassbar. Nachfrageabhängige Flügelzugkonzepte (i. d. R. Vereinigung von parallel verlaufenden Linien vor dem Großknoten) lassen sich mittels MKB besonders vorteilhaft umsetzen, insbesondere bei bislang unterschiedlichen Fahrzeugbaureihen pro Linie. Hinsichtlich der Trassenkapazität kann die MKB einen Beitrag dazu leisten, stark frequentierte Schienenkorridore zu entlasten.

Bei den Szenarien wurde das Augenmerk auf die Einsparung von möglichen Fahrplantrassen durch das Zusammenlegen von Linien gelegt. Durch die untersuchte Fahrtenbündelung anstelle von zwei separaten SPNV-Zugfolgen unmittelbar hintereinander konnte eine Trasseneinsparung von einer Trasse pro Stunde und Richtung erreicht werden.

Ein letzter Bewertungsaspekt war die Überprüfung eines verminderten Fahrzeugbedarfs, welcher sich durch die MKB ergeben kann. Hierbei wurde der Fokus auf eine exemplarische Berechnung der Reservefahrzeuge gelegt sowie der zu erreichenden Einsparung, wenn die Fahrzeuge nicht nur linienscharf, sondern universell in größeren Teilnetzbereichen eingesetzt werden können. Je nach Größe des Teilnetzes liegt die Einsparung zwischen einem und 4,8 Prozent.

Die betrieblichen Beispielszenarien haben gezeigt, dass die Umsetzung der MKB innerhalb des Deutschlandtaktes 2030 möglich ist. Die Etablierung einer MKB führt zu einer Erhöhung der Zahl der Direktverbindungen und damit zu weniger Umstiegen für die Fahrgäste. Des Weiteren kann die Fahrgastkapazität insbesondere vor und nach wichtigen Knoten erhöht werden (mehrere Zugteile in einem Zugverband

gekuppelt). Durch den Kupplungsvorgang entstehen allerdings längere Haltezeiten, die es in den bisherigen Fahrplan zu integrieren gilt. Die Wahl des Kupplungsgleises hat entscheidenden Einfluss auf die Kapazität des Streckenabschnitts bzw. des Bahnknotens. Eine Einsparung von Fahrplantrassen ist möglich, allerdings sind die Kapazitätsgewinne vom Betriebsprogramm, vom Fahrzeugeinsatz und von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass Fahrzeugeinsatz und -reserve durch eine Nutzung der MKB verringert werden können.

Abschließend ist hervorzuheben, dass die hier untersuchten Beispielszenarien immer nur einen Teilausschnitt des deutschen Streckennetzes abbilden können. Auf Basis der Abhängigkeiten der Fahrzeugwahl zu den infrastrukturellen Gegebenheiten sind diese Erkenntnisse und Aussagen aus der betrieblichen Kuppelbarkeit nur begrenzt auf andere Knoten und Streckenabschnitte übertragbar. Wenn bspw. zukünftig durch den Einsatz einer MKB mehr Kupplungsvorgänge im Schienennetz umgesetzt werden, ist gerade vor großen Taktknoten zu überprüfen, wie die Umsetzung innerhalb des Fahrplankonstrukts Deutschlandtakt 2030 im konkreten Fall möglich ist. Anhand der vorliegenden Reserven für die Kantenfahrzeit ist dann zu ermitteln, ob eine Einbindung in das Fahrplangefüge reibungslos möglich ist.

7.3 Fazit zur Einführung einer MKB

Wie die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, ist eine MKB grundsätzlich sehr sinnvoll. Zahlreiche Vorteile konnten aufgezeigt werden. Bis zur Einführung einer MKB müssen allerdings einige Hürden genommen werden: Die technischen Aspekte zur Umsetzung der MKB sind dringend zu klären. Andernfalls kann eine MKB nicht erreicht werden. Es sollte außerdem ein Akteure-Management betrieben werden, um insbesondere bei den Aufgabenträgern für die Sinnhaftigkeit der MKB zu werben. Weitere Akteure wie bspw. die Fahrzeughersteller sollten unbedingt beteiligt werden. Diese Hürden müssen zeitnah angegangen werden, damit die MKB in naher Zukunft umgesetzt werden kann. Grundsätzlich sollten Erfahrungen aus anderen Bereichen genutzt werden. So bieten sich die gewonnenen Erkenntnisse der (aktuellen) DAK-Migration zu deren Nutzen, Umsetzung und Einführung an, die sich ggf. auf die MKB im SPNV übertragen lassen.

Es bietet sich an, die MKB in parallel laufende Großvorhaben wie den Deutschlandtakt 2030 und andere Infrastrukturprojekte (z. B. Digitale Schiene Deutschland) vor allem in Knotenbereichen einzubinden. Eine mögliche MKB sollte stets und ab sofort mitgedacht werden, auch wenn sie erst in einigen Jahren verfügbar sein wird. Hierzu ist ein Stufenplan zur Einführung der MKB zu erstellen, ähnlich wie beim Deutschlandtakt 2030, um möglichst schnell erste Modellprojekte bzw. Anwendungen sichtbar machen zu können (z. B. Modellregionen für die MKB definieren, ähnlich wie beim Deutschlandtakt 2030). Hierzu muss geklärt werden, wo die MKB in wenigen Jahren bereits umgesetzt werden kann (vgl. analog dazu Deutschlandtakt-2030-Umsetzung: Schienenpersonenfernverkehr Hamburg–Berlin als Pilotprojekt für Halbstundentakt). Letztlich muss ein Masterplan zur Einführung und Etablierung einer flächendeckenden MKB erstellt werden.

Die Thematik bedarf weiterer Studien, Untersuchungen und tiefergehender Detailbetrachtungen, bei denen einzelne der genannten Aspekte explizit bearbeitet werden. Die MKB wird von großen Teilen der Bahnbranche befürwortet. Jetzt gilt es, die Sinnhaftigkeit einer MKB in der gesamten Bahnbranche sowie bei den politischen Entscheidungsträgern deutlicher und nachhaltiger zu verankern, um Bewegung in das Vorhaben zu bekommen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Scharfenbergkupplung Typ 10	15
Abbildung 2: Beispiele ausgeführter E-Kupplungen: v. l. n. r.: H01, era2, era4.....	16
Abbildung 3: Beispiele für übertragene Signale und die entsprechende Pinbelegung.....	18
Abbildung 4: Spannungsfeld der Ursachen für nicht freie Kuppelbarkeit.....	20
Abbildung 5: Beispiel für ausschreibungsgebundene Fahrzeuge	21
Abbildung 6: Kuppelbarkeitsmatrix (gesamt)	24
Abbildung 7: Kuppelbarkeitsmatrix, Netz Rhein-Ruhr.....	25
Abbildung 8: Kuppelbarkeitsmatrix, Netz Rhein-Main	26
Abbildung 9: Betrieblich potenziell sinnvolle Kuppelbarkeit.....	28
Abbildung 10: Führungsmöglichkeiten zweier Linien im Zulauf auf einen Taktknoten	32
Abbildung 11: Spurplanskizze zur Einfahrt in ein besetztes Gleis (reduziertes Format, eigene Darstellung in Anlehnung an Nr. [42–44])	34
Abbildung 12: Vorschlag für Kupplungskontakte.....	43
Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Auslastung und Qualität (in Anlehnung an Nr. [60])	52
Abbildung 14: Ausschnitt des Streckennetzes im Untersuchungsraum Offenburg und Umgebung	54
Abbildung 15: Linienkonzeptscenario 1	57
Abbildung 16: Spurplan Lahr (Schwarzwald) (reduzierter Inhalt).....	58
Abbildung 17: Spurplan Offenburg Hbf (reduzierter Inhalt)	59
Abbildung 18: Gleisbelegungsplan Offenburg Hbf (RailSys) in der Zeit von 7:30 bis 8:30 Uhr, Vergleich der Bahnsteigkapazitäten (oben ohne MKB, unten mit MKB)	60
Abbildung 19: Linienkonzeptscenario 2	62
Abbildung 20: Spurplanausschnitt Biberach.....	63
Abbildung 21: Kapazitätsmaße in Richtung Offenburg	64
Abbildung 22: Kapazitätsmaße in Richtung Biberach.....	64
Abbildung 23: Einfluss der Kupplungszeit auf die Restkapazität in Richtung Offenburg	65
Abbildung 24: Einfluss der Kupplungszeit auf die Restkapazität in Richtung Biberach.....	66
Abbildung 25: Vergleich der Infrastrukturbelastung (Zugzahlen) im südlichen Bahnhofskopf von Offenburg Hbf bei getrennter (links) und gekuppelter (rechts) Ein-/Ausfahrt.....	67
Abbildung 26: Vergleich der Infrastrukturbelastung (Belegungsgrad) im südlichen Bahnhofskopf von Offenburg Hbf bei getrennter (links) und gekuppelter (rechts) Ein-/Ausfahrt.....	67
Abbildung 27: Linienkonzeptscenario 3	69
Abbildung 28: Streckenabschnitt Offenburg–Achern in RailSys in der Zeit von 08:30 bis 09:30 Uhr, Vergleich der Bildfahrpläne in Szenario 3 ohne MKB (oben) und mit MKB (unten)	70
Abbildung 29: Spurplan Bahnhof Achern in RailSys, Kupplungsvorgangscenario 3, BW 10 Ex in Hellblau, OSB 1X in Dunkelrot, MKB-Zugverband in Lila.....	71
Abbildung 30: Taktknoten Achern, Auswirkungen auf Nebenstrecke durch geplante MKB.....	72
Abbildung 31: Linienkonzeptscenario 4	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Signale und elektrische Spannungsebenen, die über die Kupplung übertragen werden, geordnet nach ihren Kategorien.....	17
Tabelle 2: Strecken im Untersuchungsraum mit jeweils für die Simulation ausgewählten Streckenabschnitten.....	53
Tabelle 3: Betrachtete SPNV-Linien im Untersuchungsraum (Fahrplan D-Takt 2030, dritter Entwurf)	54
Tabelle 4: Ergebnisse der Knotenanalyse des südlichen Bahnhofskopfes von Offenburg Hbf mithilfe des Verfahrens der Verkettung nach Schwanhäußer	68
Tabelle 5: Fahrzeugbedarf der Durchbindung Straßburg–Offenburg–Freiburg (Szenario 1).....	74
Tabelle 6: Einsparungen bei der Fahrzeugreserve durch MKB über mehrere Netze	75

Schlüssel der zitierten Experteninterviews

- [E1] Leitung Flottenmanagement eines EVU
- [E2] Leitung Werkstatt eines EVU
- [E3] Systemingenieur Fahrzeugtechnik (E-Technik) und Lokführer
- [E4] Referent Fahrzeuge eines Aufgabenträgers
- [E5] Systemingenieur eines Fahrzeugherstellers
- [E6] Projektmanager eines EVU im Rahmen eines Projekts bei Shift2Rail
- [E7] Systemingenieure eines Fahrzeugherstellers
- [E8] Leitung Baureihenmanagement eines EVU
- [E9] Flottenoptimierung und Fahrzeugtechnologie eines EVU
- [E10] Flottenoptimierung und Fahrzeugtechnologie eines EVU
- [E11] Wissenschaftlerin im Bereich Fahrzeugzulassung
- [E12] Chief Technical Officer eines EVU

Quellenverzeichnis

- [1] ReDI – Regionale Datenbank-Information Baden-Württemberg. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter <https://perinorm-s.reidi-bw.de/perinorm/home/default.aspx?ReturnUrl=%2fperinorm%2fsearch.aspx>
- [2] Internationaler Eisenbahnverband (Union Internationale des Chemins de Fer, UIC). Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter <https://uic.org/>
- [3] Eisenbahn-Bundesamt. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter https://www.eba.bund.de/Shared-Docs/Downloads/DE/GesetzeundRegelwerk/TSI/TSI_Uebersicht.xls?__blob=publicationFile&v=4
- [4] DIN EN 15020:2006+A1:2010 – Bahnanwendungen – Abschleppkupplung – Leistungsanforderungen, spezifische Schnittstellengeometrie und Prüfverfahren, 2011.
- [5] DIN EN 15551:2009+A1:2010 – Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Puffer, 2011.
- [6] DIN EN 15566:2016-12 – Bahnanwendungen – Schienenfahrzeuge – Zugeinrichtung und Schraubenkupplung, 2016.
- [7] DIN EN 16019:2014 – Bahnanwendungen – Automatische Kupplung – Leistungsanforderungen, spezifische Schnittstellengeometrie und Prüfverfahren, 2014.
- [8] 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, Brüssel 2014.
- [9] UIC-Merkblatt 558: Fernsteuer- und Informationsleitung – Technische Einheitsmerkmale für die Ausrüstung der RIC-Reisezugwagen, Paris 1996 (aufgehoben).
- [10] UIC-Merkblatt 568: Lautsprecheranlagen und Fernsprecheinrichtungen – Technische Einheitsmerkmale für die Ausrüstung der RIC-Reisezugwagen, Paris 1996.
- [11] IRS-Standard 50558: Railway Application – Rolling Stock – Remote control and data cables interfaces – Standard technical features, Paris 2017.
- [12] DIN IEC/TS 61375 (alle Teile) – Elektronische Betriebsmittel für Bahnen – Zug-Kommunikations-Netzwerk (TCN), 2017.
- [13] DIN EN 50128:2012-03 / VDE 0831-128:2012-03 – Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme, 2012.
- [14] Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO) vom 1. August 2019.
- [15] Rüschi, Franziska (2018): Zukunftskonzept Virtuelle Kupplung – Ein innovativer Lösungsansatz für die baureihen- und herstellerübergreifende Kuppelbarkeit von Triebfahrzeugen. Dissertation, TU Berlin, Berlin.

- [16] García, Cristina Rico; Lehner, Andreas, Strang, Thomas, Frank, Korbinian (2008): Channel Model for Train to Train Communication using the 400 MHz Band. Proceedings of the 67th IEEE Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2008, 11-14 May 2008, Singapur.
- [17] Stuhr, Helge Johannes (2013): Untersuchung von Einsatzszenarien einer automatischen Mittelpufferkupplung. Dissertation, TU Berlin.
- [18] Shift2Rail: CONNECTA-2. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter https://projects.shift2rail.org/s2r_ip1_n.aspx?p=CONNECTA-2
- [19] Bahn-Report: Die SPNV-Karte. Welches EVU erbringt wo SPNV-Leistungen im Fahrplan 2020? Stand: 15.12.2019. Zugriff am 28.06.2021. Verfügbar unter <https://bahn-report.de/docs/leseproben/main.htm>
- [20] Drehscheibe-online.de: Neubautriebwagen der DB. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter <https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?032,6948696>
- [21] Drehscheibe-online.de: Dieseltriebwagen deutscher Privatbahnen. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter <https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?032,4650712>
- [22] Drehscheibe-online.de: Elektrotriebwagen deutscher Privatbahnen. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter <https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?032,4648677>
- [23] Flege, Mario: Revisionsdaten.de. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter www.revisionsdaten.de
- [24] Eisenbahn-Kurier-Aspekte 44 (2021): DB-Lokomotiven und Triebwagen. Stand 1. Juli 2021. EK-Verlag, Freiburg.
- [25] Informationen und Daten der J. M. Voith SE & Co. KG, Salzgitter/Kiel.
- [26] Deutsche Bahn (2004): Triebfahrzeuge bedienen, BR 423-426 – Triebzug bedienen lernen, 2004.
- [27] Technische Beschreibungen der era-contact GmbH Germany. Zugriff am 12.01.2022. Verfügbar unter <https://www.era-contact.com/de/produkte/automatische-kupplungen/>
- [28] Beispielhafter Auszug aus dem European Register of Authorised Types of Vehicles (ERATV). Zugriff am 16.02.2022. Verfügbar unter <https://eratv.era.europa.eu/Eratv/Home/View/13-130-0005-9-001-001>
- [29] 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, Brüssel 2013.
- [30] Bundesverband SchienenNahverkehr e. V. (vormals Bundesarbeitsgemeinschaft der Aufgabenträger des SPNV e. V. (BAG SPNV)): Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren für Mitglieder der BAG-SPNV. 3. Ausgabe. Berlin 2016. Zugriff am 16.02.2022. Verfügbar unter https://www.schienennahverkehr.de/wp-content/uploads/2021/07/2016-02-23-Fahrzeuganforderungen_final_gesamt.pdf
- [31] Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg mbH (NVBW): Fahrzeuglastenheft. Muster, Version 3, 22.05.2014. Zugriff am 06.12.2021. Verfügbar unter https://www.nvbw.de/fileadmin/user_upload/PDF/landesdesign/Lastenheft_Fahrzeuge_Muster.pdf

- [32] Riechers, Daniel (1998): Regionaltriebwagen. Neue Fahrzeuge für Deutschlands Nahverkehr. Transpress Verlag, Stuttgart.
- [33] Goullon, Katrin (2014): Auf der Schiene des Erfolgs – Der Flirt in 3. Generation. In: Eisenbahntechnische Rundschau, Jahrgang 63, Ausgabe 01 + 02, S. 46–52.
- [34] Rellstab, Mathias (2015): Flirt und Kiss fahren gemeinsam. In: Schweizer Eisenbahn-Revue, Jahrgang 38, Ausgabe 5, S. 238–239.
- [35] Block, Katrin (2015): Luxemburgische Staatsbahn CFL vergibt Folgeauftrag an Stadler. In: Eisenbahntechnische Rundschau, Jahrgang 64, Ausgabe 07 + 08, S. 84.
- [36] Bundesamt für Justiz, Kompetenzzentrum Rechtsinformationssystem des Bundes: Gesetz zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen (Schienenlärmschutzgesetz – SchlärmschG), Bonn, 01.07.2021, Zugriff am 30.03.2022. Verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/schl_rmschg/index.html
- [37] Müller, Christoph (2019): Deutsche Bahn: ICE für 320 km/h und bimodale Lokomotiven für Cargo. In: Rail Business, Jahrgang 12, Ausgabe 41, S. 5.
- [38] Müller, Christoph (2021): DB Fernverkehr: Kuppelbarkeit 407 und 408 wird nicht weiterverfolgt. In: Rail Business, Jahrgang 14, Ausgabe 33, S. 6.
- [39] Münchow, Claudia: Wiederaufbau nach der Flut: Zugverkehr in der Eifel zwischen Trier-Ehrang und Auw an der Kyll startet, DB AG, 07.02.2022, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter <https://www.deutschebahn.com/pr-frankfurt-de/Update-Wiederaufbau-nach-der-Flut-Zugverkehr-in-der-Eifel-zwischen-Trier-Ehrang-und-Auw-an-der-Kyll-startet-6946708>
- [40] Tkatzik, Sabine: Erste Bilanz zum Übergangsfahrplan, VRR, Gelsenkirchen, Köln, Unna, 20.02.2022, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter <https://www.vrr.de/de/presse/stabiler-betrieb-auf-abellio-linien-gewaehrleistet/>
- [41] Tkatzik, Sabine: Kurzzeitige Ausfälle und Schienenersatzverkehre beim Übergang der Abellio-Linien, VRR, Gelsenkirchen, Köln, Unna, 26.02.2022, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter <https://www.vrr.de/de/presse/kurzzeitige-ausfaelle-und-schienenersatzverkehre-beim-uebergang-der-abellio-linien/>
- [42] DB Netz AG: Richtlinie 819. LST-Anlagen planen, Berlin 2008.
- [43] DB Netz AG: Richtlinie 408. Fahrdienstvorschrift Bahnbetrieb, Abschnitt 408.0451 Züge fahren; Geschwindigkeiten im Einfahrgleis beschränken, Einfahrweg begrenzen, Frankfurt, 15.12.2019.
- [44] DB Netz AG: Richtlinie 408. Fahrdienstvorschrift Bahnbetrieb, Abschnitt 408.1451 Züge fahren; Einfahrt in Stumpfgleise oder teilweise besetzte Gleise, Einfahrweg begrenzen, Halteplatz im Befehl vorschreiben, Frankfurt, 15.12.2019.
- [45] Westfälischer Anzeiger (2018): Bahn-Pläne: Künftig alle halbe Stunde nach Berlin, 08.09.2018. Zugriff am 12.01.2022. Verfügbar unter <https://www.wa.de/hamm/plaene-deutschen-bahn-kuenftig-alle-halbe-stunde-nach-berlin-kein-kuppeln-hamm-10221832.html>
- [46] Verordnung (EU) Nr. 1299/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Infrastruktur“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, Brüssel 2014.

- [47] DB Netz Richtlinie Fahrdienstvorschrift 408.2445, § 1 (3), Fassung vom 15.12.2019.
- [48] Vergabeunterlagen Netz „Linienstern Mühldorf“ der Bayerischen Eisenbahngesellschaft (BEG). Zugriff am 26.01.2022. Verfügbar unter <https://beg.bahnland-bayern.de/de/wettbewerb/ausschreibungen/linienstern-m%C3%BChldorf>
- [49] Vergabeunterlagen Netz „Regensburg/Donautal“ der Bayerischen Eisenbahngesellschaft (BEG). Zugriff am 26.01.2022. Verfügbar unter <https://beg.bahnland-bayern.de/de/wettbewerb/ausschreibungen/regensburg-donautal>
- [50] Vergabeunterlagen Netz „Kinzigtal“ der Rhein-Main-Verkehrsverbund GmbH (RMV). Zugriff am 26.01.2022. Verfügbar unter <https://www.vergabe-rmv.de/browseVerdingungsunterlagen.html#ELVISID:E48273198>
- [51] Wende, Dietrich (2003): *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*, Verlag Vieweg + Teubner, Stuttgart
- [52] Happel, O. (1959): Sperrzeiten als Grundlage der Fahrplankonstruktion. In: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jahrgang 8, Ausgabe 2, S. 79–80.
- [53] Gröger, Thomas Andreas (2002): *Simulation der Fahrplanerstellung auf der Basis eines hierarchischen Trassenmanagements und Nachweis der Stabilität der Betriebsabwicklung*, Dissertation, Technische Hochschule Aachen. Verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/57201>
- [54] Schwanhäußler, W. (1974): *Die Bemessung der Pufferzeiten im Fahrplangefüge der Eisenbahn*, Verkehrswissenschaftliches Institut der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- [55] DB Netz AG: Richtlinie 405. Fahrwegkapazität, Frankfurt, 13.02.2009.
- [56] Nießen, N., Hansen, I. A., Pachl, J. (Hg.) (2014): *Timetable Stability Analysis*. In: *Railway Timetabling & Operations*, S. 117–131.
- [57] Wendler, E. (2007): *The scheduled waiting time on railway lines*. In: *Transportation Research, Part B: Methodological*, Jahrgang 41, Ausgabe 2, S. 148–158.
- [58] Weik, N., Niebel, N., Nießen, N. (2016): *Capacity analysis of railway lines in Germany – A rigorous discussion of the queueing based approach*. In: *Journal of Rail Transport Planning & Management*, Jahrgang 6, Ausgabe 2, S. 99–115, doi: 10.1016/j.jrtpm.2016.06.001.
- [59] Janecek, D.; Weymann, F.; Schaer, Th. (2010): „LUKS – integriertes Werkzeug zur Leistungsuntersuchung von Eisenbahnknoten und -strecken“, in: *Eisenbahntechnische Rundschau*, Jahrgang 59, Ausgabe 1 + 2, S. 25–32.
- [60] Meirich, Christian (2017): *Berechnung und Bewertung der Gesamtleistungsfähigkeit von Eisenbahnnetzen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Verkehrswissenschaftliches Institut. Verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/696083/files/696083.pdf>
- [61] OpenRailwayMap, OpenStreetMap-Mitwirkende, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter <https://www.openstreetmap.org/copyright>, <https://www.openrailwaymap.org/>
- [62] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: *Zielfahrplan Deutschlandtakt, Dritter Gutachterentwurf, Fernverkehr*, Zugriff am 14.01.2022. Verfügbar unter https://assets.ctfassets.net/scbs508bajse/55FqSU1scLy5OcgIKTo4QH/c5cd6c048b5d10d2a0d7876f8f17a34a/Netzgrafik_3._Entwurf_Fernverkehr.pdf

[63] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Zielfahrplan Deutschlandtakt, Dritter Gutachterentwurf, Baden-Württemberg, Zugriff am 14.01.2022. Verfügbar unter https://assets.ctfassets.net/scbs508bajse/1ssn0EHt8g8050FF5VbO27/2eae782f035704938a49617b82294726/Netzgrafik_3_Entwurf_Baden-Wu__rttemberg.pdf

[64] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Zielfahrplan Deutschlandtakt, Dritter Gutachterentwurf, Güterverkehr Süd, Zugriff am 14.01.2022. Verfügbar unter https://assets.ctfassets.net/scbs508bajse/2mLk4Xik7SzIhp6EJUrbEB/7bec63a7a728f44dea4208554311de4f/Netzgrafik_3_Entwurf_SGV_Su__d.pdf

[65] Neumann, Edgar: Land bestellt erstmals batterieelektrische Züge, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, 17.03.2020, Zugriff am 07.12.2021. Verfügbar unter <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/land-bestellt-erstmal-batterieelektrische-zuege/>

[66] Hinz, Wiebke: Batterieelektrische Züge für den Niederrhein und das westliche Münsterland, VRR, 14.07.2021, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter <https://www.vrr.de/de/magazin/batterieelektrische-zuege-fuer-den-niederrhein-und-das-westliche-muensterland/>

[67] Zeitung für kommunale Wirtschaft: Niedersachsen ersetzt Dieselbahnen durch Hybrid- und Wasserstoffzüge, VKU Verlag GmbH München/Berlin, 09.03.2020, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter <https://www.zfk.de/mobilitaet/e-mobilitaet/niedersachsen-ersetzt-dieselbahnen-durch-hybrid-und-wasserstoffzuege>

[68] Voß, Jens-Oliver: Deutsche Bahn baut erstmals Oberleitungsinseln für Regionalverkehr mit Akku-Zügen, DB AG, 14.03.2022, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-baut-erstmal-Oberleitungsinseln-fuer-Regionalverkehr-mit-Akku-Zuegen-7343070

[69] Garstenauer, Klaus: Der integrierte Taktfahrplan als Grundlage der Bedienung im öffentlichen Verkehr, ÖBB-Personenverkehr AG, 08.01.2020, Zugriff am 17.03.2022. Verfügbar unter https://vowi.fsinf.at/images/7/72/TU_Wien-%C3%96ffentlicher_Verkehr_RV_%28Emberger%29_-_2020-01-08_garstenauer.pdf

[70] Schwanhäußer, W. (1978): Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von großen Fahrstraßenknoten und von Teilen des Eisenbahnnetzes, Archiv für Eisenbahntechnik 33.

[71] Nießen, Nils (2008): Leistungskenngrößen für Gesamtfahrstraßenknoten. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Verkehrswissenschaftliches Institut. Verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/687127>

Anhang

Anhang 1: Notizen zu den Experteninterviews.....	91
Anhang 2: Liste mit den enthaltenen Recherchequellen	96
Anhang 3: Tabelle zu technischen Daten der Fahrzeuge	97
Anhang 4: Gesamtübersicht mit den recherchierten Fahrzeugen je Streckennetz.....	98
Anhang 5: Übersicht der Fahrzeuge in den Großräumen Rhein/Ruhr und Rhein/Main mit Ausführung der E-Kupplung	99
Anhang 6: Analyse der Fahrzeuglastenhefte und Ausschreibungsunterlagen hinsichtlich der Anforderungen an Fahrzeuge	100
Anhang 7: Kategorisierung der Funktionen.....	101
Anhang 8: Bewertung der Funktionen hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen	102
Anhang 9: Kupplungszeiten Deutschlandtakt	103

Anhang 1: Notizen zu den Experteninterviews

[E1] Leitung Flottenmanagement eines EVU – 29.10.2021/11.11.2021

- Lastenheft definierbar, aber teuer
- Transmitter evtl. als Lösung für Nachrüstung möglich mit standardisierten Protokollen und Schnittstelle am Fahrzeug
- unterschiedliche Kräfte bei Entgleisung -> unbekannte Werte
- Verkehrsverträge geben Reserve + Fahrzeuge vor
- Fremde BR auf Netz -> Strafe -> Zugausfall günstiger
- Kuppelbarkeit wäre wünschenswert: aus wirtschaftlichen Gründen Zuführung in Instandhaltung, Abschleppen wegen fehlender Sifa o. ä.
- wegen Netzgebundenheit aber aktuell kein Thema für EVU
- Umrüsten Bestandsflotte nicht wirtschaftlich

[E2] Leitung Werkstatt eines EVU – 09.11.2021/19.01.2022 (via E-Mail)

Die Leittechnik der beiden Baureihen X und Y unterscheidet sich sowohl bei Hard- als auch hieraus folgend in Softwarethemen so grundlegend voneinander, dass es schlichtweg nicht wirtschaftlich ist [, eine Kuppelbarkeit beim Hersteller] zu beauftragen. Immerhin liegen zwischen den beiden Entwicklungen XX Jahre und mit dieser Zeit auch eine Veränderung der Vorschriftenlage, insbesondere wurden die Rückfallebenen von der Soft- auf die Hardwareseite gelegt.

Es gab den Versuch der Herstellung der Kuppelbarkeit zwischen BR X und BR Z, der meines Wissens – außer viel Geld gekostet zu haben – zu keinem Erfolg geführt hat.

BR X und BR Y sind nicht frei kuppelbar. Für den Abschleppfall sind diese Baureihen aber mechanisch und pneumatisch kuppelbar.

BR X ca. 2000 in Betrieb genommen, BR Y ca. 2014 in Betrieb genommen: Die Kuppelbarkeit beschränkt sich auf den Abschleppfall. Eine Datentechnische Verbindung ist nicht möglich, da auch die Pinbelegungen unterschiedlich sind.

BR X und BR Y sind innerhalb der Baureihe frei kuppelbar. Bei einem neuen Aufspielen von Software, welche die Kuppelbarkeit betrifft, kann es sein, dass erst alle Fahrzeuge bespielt werden, aber die Software zu einem bestimmten Datum aktiviert wird.

BR W und BR V sind frei kuppelbar untereinander. Über Änderungen einer freien Kuppelbarkeit untereinander konnte ich nichts erfahren. Eine Kupplung BR X mit BR W ist nur mechanisch und pneumatisch möglich, nicht elektrisch.

[E3] Fachingenieur Fahrzeugtechnik (E-Technik) und Lokführer – 03.11.2021

- Zulassungsprobleme, z. B. Drei- und Vierteiler (Stromabnehmer)
- Kupplungshöhe: Luftfeder voll/leer ca. +/- 5 cm
- Ausschreibungen Fahrzeugbeschaffung: Lastenhefte so schreiben, dass keine Interna [techn. Details] preisgegeben werden -> steht Kuppelbarkeit entgegen
- Schnittstellentransparenz oder -definition erforderlich
- Kuppelbarkeit bietet aktuell keinen Mehrwert für Besteller [durch Losvergabe]

[E4] Referent Fahrzeuge eines Aufgabenträgers – 17.11.2021/03.02.2022

- Aufgabenträger schreibt Einbauhöhe der SchaKu vor
- Hauptproblem: Leittechnik + Diagnosesysteme; Hersteller hüten Geheimnisse.
- Normung der Schnittstelle wäre gut -> *neutrale* Person/Stelle, die sich darum kümmert, mit Nachdruck
- Ursprünglich war universelle Kuppelbarkeit in Ausschreibung vorgesehen, aber Fristen für Lieferung der Fahrzeuge damit nicht haltbar.
- Kuppelbarkeit auch seitens VDB wünschenswert, aber Umsetzung will niemand angehen („dickes Brett“).
- Fahrzeugtyp X mit Nachfolger Y nicht kuppelbar wegen Softwareinkompatibilität; Fahrzeugtyp Y eines Betreibers hat anderes FIS als eines anderen Betreibers -> inkompatibel! -> Schnittstellen definieren; Protokolle vorgeben!
- BAG SPNV gibt Einbauhöhe der SchaKu in Empfehlungen vor.
- Problem Finanzierungsmodelle: Fahrzeuge werden von EVU beschafft, daher keine Rücksicht auf Kuppelbarkeit -> Ansatz könnte zentrale Beschaffung der Fahrzeuge sein.
- genaue Ausgestaltung der Fahrzeuge durch EVU
- BAG-Empfehlungen aus Fahrgastsicht geschrieben, wird aktuell überarbeitet, aber nur Empfehlungen, Aufgabenträger sind nicht daran gebunden.
- in Lastenheften zukünftig mehr technische Vorgaben machen
- kein zukünftiger Einsatz von VT auf nicht elektrifizierten Strecken mehr
- Kuppeln von ET + VT problematisch wegen unterschiedlicher Antriebsstränge; Problem sollte bei BEMU/HEMU nicht mehr auftreten.

[E5] Systemingenieur eines Fahrzeugherstellers – 08.12.2021

- interessantes Thema
- Kuppelbarkeit nur für selben Typ vorgesehen
- auch technisch sehr ähnliche Fahrzeuge oft nicht kuppelbar
- Kuppelbarkeit technisch machbar; herstellerübergreifend: gemeinsame Entwicklung -> aufwendig, zeitintensiv -> Lösungsidee: Zustände kommunizieren; Master/Slave-Prinzip; Fahrzeuge weitestgehend autark
- Protokoll muss gleich sein: Signale, Auflösung, Übertragungsraten ...
- Kein Kunde wünscht Kuppelbarkeit.
- Bremsversuche für Zulassung notwendig
- FIS nicht sicherheitsrelevant, ist außerhalb des TCMS.
- „anonymisierte Schnittstelle“ denkbar
- Standard wäre schön, aber für *alle* Fahrzeuge wegen Eigenarten schwierig; Totlast im Bus vermeiden
- 1. Schritt: Zwei Hersteller entwickeln eine Lösung, danach als Norm erweitern.
- wenn Leittechnikarchitektur ähnlich, ist das machbar; CAN + Ethernet allerdings sehr aufwendig
- Signale: CAN-Fahrzeugbus, Türfreigabe + Grünschleife usw. separat

[E6] Projektmanager eines EVU im Rahmen eines Projekts bei Shift2Rail – diverse Aussprachen

- Verschiedene Bauweise eines Fahrzeugtyps weisen unterschiedliche Softwarestände auf -> nicht elektrisch kuppelbar
- Kuppelbarkeit muss auf Bundesebene koordiniert werden mit allen Akteuren am Tisch, sonst nicht umsetzbar

[E7] Systemingenieure eines Fahrzeugherstellers – 14.12.2021

- Kompatibilität ist teuer in Entwicklung.
- Wer definiert den Standard? Technisch und organisatorisch sehr komplex
- nicht unmöglich, aber dickes Brett und teuer (man braucht gute Leute mit Entscheidungsbefugnis)
- Schnittstellendefinition machbar, aber alle Kombinationsmöglichkeiten schwer umsetzbar
- Softwareupdates können zu Problemen führen.
- Hersteller: Innovationen wie treiben, wenn Kupplung standardisiert?
- Kunden wünschen Innovationen -> Änderung der Schnittstelle erforderlich
- Fahrzeuge haben oft unterschiedliche Bedienphilosophien (Anzahl Bedienelemente, Touch-Bildschirm vs. Tasten etc.)
- technisch machbar; aber ist jemand bereit, dafür zu zahlen?
- Schnittstelle müsste immer weiterentwickelt werden -> Abwärtskompatibilität?
- Betreiber + Besteller müssen sich auch einigen (Betriebsabläufe, Fahrzeugausschreibungen).
- Kapazitätssteigerung anders auch einfacher möglich
- Welcher Mehrwert würde erreicht und was bringt das monetär?

[E8] Leitung Baureihenmanagement eines EVU – 10.01.2022

- Diversifikation der Flotte ist Problem.
- Der Fall, Kuppelbarkeit ist technisch möglich, aber nicht zugelassen, existiert auch.
- rein kommerzielles Problem
- Fahrzeuge werden nicht vom EVU in Rahmenverträgen gekauft, sondern nur je Netz.
- Fahrzeuge vertraglich gebunden, kein Mehrwert durch Kuppelbarkeit
- Aufgabenträger helfen sich nicht gegenseitig.
- Es gibt keinen etablierten Gebrauchtfahrzeugmarkt im NV
- Kuppelbarkeit normativ vorgeben
- Jedes Subsystem hat eigene Software.
- Kuppelbarkeit ist zulassungsrelevant -> Umrüsten Bestandsflotte bedingt in diesem Bereich Neuzulassung.
- Neue Fahrzeuge müssen andere Normen erfüllen als ältere Fahrzeuge derselben Baureihe -> Anpassungen der Bestandsflotte ggf. erforderlich für Kuppelbarkeit -> Neuzulassung?
- WTB-Protokolle auch bei Wendezügen nicht einheitlich
- Aufgabenträger haben unterschiedliche Ausstattungswünsche -> sollten sich einigen!
- danach technische Normung anstoßen (teuer!)
- Betreiber wären bereit, gleiche Züge zu kaufen, aber aktuell kein Mehrwert vorhanden
- Ausschreibungen fordern oft Neufahrzeuge, obwohl Bestandsfahrzeuge oft günstiger wären.

[E9] Flottenoptimierung und Fahrzeugtechnologie eines EVU – 11.01.2022/21.02.2022

- Im NV ist jede Lok mit jedem Wagen kuppelbar -> es geht also!
- Alt- und Neufahrzeuge kombinierbar (Lok + Wagen) -> übertragbar auf Triebzüge -> Kupplung = Kuppelpunkt; Verbindung Lok/Wagen über genormtes UIC-Kabel; Subsysteme müssen kommunizieren können.
- Problematik: Schnittstelle
- keine Standards bei WTB/RS485/Ethernet (hier Standardisierung im Gange) -> Busprotokolle müssen standardisiert sein.
- Neu- und Altfahrzeuge: abwärtskompatibel gestalten
- Komponenten- + Schnittstellenstandardisierung fehlen.

- Auch Gebrauchtfahrzeuge erfahren Umbauten -> nicht mehr mit anderen Altfahrzeugen kuppelbar
- Problem ist historisch gewachsen.
- überregionale Flotten kuppeln nicht nötig
- herstellerübergreifende Abstimmung notwendig
- Standardisierung schränkt Hersteller ein; Flexibilität fehlt -> wie mit Änderungen umgehen?
- Zulassung aufwendig geworden durch viertes Eisenbahnpaket
- Stufenplan für Standardisierung erstellen (Wer muss beteiligt sein, unabhängig geleitet ...)
- Systeme kategorisieren: Komfortcharakter: aufwendig, komplex, teuer, da individuell
- Bei Leittechnik macht jeder, was er will -> erst Architektur definieren, dann Protokolle mit Funktionen!
- WTB nur SIL 2, SIL-4-Funktionen müssen außerhalb WTB sein. -> Einigung auf hoch zuverlässiges Bussystem -> Verfügbarkeit Rechner-technik? Zuverlässigkeit? Wirtschaftlichkeit?
- Wagenebene – wagenübergreifend strikt trennen -> technisch machbar, aber der Wille muss da sein!
- Anforderungen der Aufgabenträger, v. a. FIS/Ortung: Standard nicht sinnvoll. Wenn lokal, wie Korrektheit der Informationen überwachen? -> wettbewerbsneutral über Aufgabenträger normen? Neue Funktionen reservieren? -> Unterscheidung Regelbetrieb/Störfall -> wie umsetzen?
- Kuppelbarkeit bei alternativen Antrieben gleich mitdenken
- Zugbildung nach TSI typgenehmigungspflichtig? -> Zulassung immer mitdenken! -> Folgeprojekte!
- Standard kann hemmen, aber auch Chance sein.

[E10] Flottenoptimierung und Fahrzeugtechnologie eines EVU – 24.01.2022

- ZMS + Ethernet in Loks neu eingebaut -> eigene Zulassungsdurchführung
- Wunsch: Schnittstelle definieren (Hardware + Software)
- Lok + Wagenzüge: FIS nur lokal auf Wagen, nicht auf Lok -> reduziert Komplexität
- Zulassung in der Schweiz: Loks artrein kuppelbar -> Schnittstellenspezifikation auf artreiner Ebene, für gemischtes Kuppeln „Erweiterung der Einsatzbedingungen“ notwendig
- Triebzüge: Kuppelbarkeit via Zugbus machbar, Hardwareschaltungen sehr fahrzeugspezifisch -> Umbau und Sicherheitsnachweise aufwendig
- FIS: kurze Lebensdauer, aufwendige Pflege -> lokal auf Fahrzeuge; Kommunikation direkt mit Leitstelle unabhängig vom Tf -> Funktion nicht auf Kupplung erforderlich, außer normale Durchsagen
- Klimatisierungsregelung auch lokal auf Fahrzeug, nur Störungsmeldung an Führerstand -> definierte Protokolle auf Bus mit Information, welche Störung vorliegt, z. B. „Fahrzeug 2: Traktionsausfall“
- Mehrfachtraktion: Zug- und Bremskräfte müssen abgestimmt sein; Sollwertvorgabe von Master + Rückmeldung aller Slaves, ob erfüllt -> Kupplungssignale: Was braucht man wirklich?
- leere Pins für zukünftige Funktionen vorsehen
- Alle Akteure sollten sich mit ihren Fahrzeugen identifizieren.

[E11] Wissenschaftlerin im Bereich Fahrzeugzulassung – 16.02.2022

- Standardisierung einer technischen Lösung -> in TSI aufnehmen
- Zulassung nach Art. 15/16 Durchführungsverordnung (EU) 2018/545 -> Fahrzeug ist zugelassen, Sicherheitsnachweis für Anwendungsfall vorhanden (CSM-RA)
- Neuzulassung: alle TSI erfüllen (NoBo) / alle NNTR erfüllen (DeBo) / alle Sicherheitsnachweise (AsBo)

- CSM-RA, Art. 4: wenn signifikante Änderung, dann Neuzulassung erforderlich -> ist Multi-kupplbarkeit signifikante Änderung? Müsste geprüft werden!
- Änderung der Einsatzbedingungen -> Liste in CSM-RA, Art. 4 -> mehrere zugelassene Teilsysteme kombinieren? Neuzulassung erforderlich? -> signifikante Änderung oder nicht? -> ggf. neuer Sicherheitsnachweis erforderlich -> vermutlich Neuzulassung erforderlich / neuer Fahrzeugtyp
- Alle erdenklichen Fahrzeugkombinationen müssten berücksichtigt werden -> jeweils eigener neuer Sicherheitsnachweis erforderlich -> derzeit unerschwinglich

[E12] CTO eines EVU – 09.03.2022

- Schweiz: gemischte Mehrfachtraktion Re 465/Traxx1/Vectron/Eurodual möglich
- Eurodual: 45 ESC-Versionen von ETCS für sechs Länder benötigt
- DAK: verteilte Mehrfachtraktion angedacht -> 15–18 Leitungen ziehen nicht sinnvoll! -> Lösung: neu konfigurierter Datenbus
- Standardisierung auf höherem Layer nötig -> Systemhäuser müssen Adapter entwerfen -> Offenlegung des Systemwissens in begrenztem Umfang nötig wegen Sicherheitsnachweis
- Befehle müssen sicher weitergegeben werden.
- DAK: muss sicherheitsrelevante Daten verarbeiten -> Problem noch nicht gelöst
- Standard nicht für ewig wegen Abwärtskompatibilität -> Technologie kann sich ändern -> Verschlüsselung der Daten auf Softwareebene
- Triebzüge: Zugkraft- und Bremskurven müssen passen, v. a. bei nicht angetriebenen Endwagen beachten (vgl. leerer Güterwagen)
- Schweiz: sieben verschiedene Fahrleitungstypen -> alle unterschiedliches Schwingungsverhalten -> Raster für Stromabnehmerabstände einführen (wird bei artreinen Fzg. bereits geprüft)
- 500 A für Güterzüge -> Netzkapazität nicht ausreichend -> maximale Stromstärke muss mitbedacht werden gemäß Fahrprofil.
- DAK: Powerline-Lösung: 16 Mbit/s Datenvolumen inkl. Sicherheit und Redundanz -> SIL 4! -> Bildübertragung möglich, für normale Zugsteuerung also ausreichend! -> Ethernet: 10 Mbit/s nur Notwendiges für Zugsteuerung auf Kupplung
- „Spaßelektronik“ dezentral bzw. lokal auf Fahrzeug, nicht standardisieren -> Sim-Karte und mobile Router auf Fzg. -> eigenes Netzwerk pro Fahrzeug -> Obsoleszenz: Komponenten sind tauschbar! -> Flügelung berücksichtigt, Vorheizen erfolgt automatisch -> Verknüpfung zu Bahnhofsanzeigen gegeben -> Umsetzung bei SBB
- DAK: drei Pins Powerline + Erde (nicht über Schiene wg. Gleisfreimeldeanlagen) -> große Pins mit großer, zuverlässiger Kontaktfläche -> Funktionen werden auf mehreren Frequenzen gesendet.
- Physical Layer von Funktionen trennen!

Anhang 2: Liste mit den enthaltenen Recherchequellen

Bereich	Quelle	Titel	kurze Beschreibung	Art	Link
Fahrplan	BMVI	D-Takt Netzgrafiken, Bsp. Netzgrafik 3. Entwurf Nord	bietet Taktfahrplan-Abfahrtszeiten auch für den SPNV	Karte	https://assets.ctfassets.net/scbs508baise/6wVikPslG47nWjw5MHEhn/a0dbf1f255f2cfd6b1033941280da2ba/Netzgrafik_3_Entwurf_Nord.pdf
Fahrplan	DB	Kursbuch DB mit umfangreichen Fahrplantabellen	Das elektronische Kursbuch bietet detaillierte und	Tabelle	http://kursbuch.bahn.de/hafas/kbvview.exe
Fahrplan	DB Regio	Wagenreihung SPNV-Züge, Bsp. DB Regio BW	in einzelnen Ländern kann die aktuelle Wagenreihung	Webseite	https://marudor.de/Lahr/Schwarzlw
Fahrplan	BEG	Kursbücher der einzelnen Bundesländer, Bsp. Bayern	Fahrplantabellen für den gesamten Nah- und Fernverkehr	Tabelle	https://bahnländ-bayern.de/de/informaterial/uebersicht/bayern-kursbuch
Fahrplan	DB Regio	Wagenreihung SPNV-Züge, Bsp. DB Regio BW	in einzelnen Ländern kann die aktuelle Wagenreihung	Webseite	https://dbf.finalreind.org/Lahr/Schwarzlw
Fahrplan	Fernbahn	D-Takt Fahrplantabellen	auch mit SPNV	Tabelle	https://www.fernbahn.de/datenbank/
Infrastruktur	OpenRailwayMap	OpenRailwayMap	Karte mit zahlreichen Infrastrukturdaten, insbesondere	Karte	https://www.openrailwaymap.org/
Infrastruktur	OpenStreetMap	OpenStreetMap Verkehrskarte (Layer)	Karte auf OSM-Basis mit Angaben zu Liniennummer	Bericht	https://www.osm.org
Infrastruktur	OpenStreetMap	ÖPNV-Karte	Karte auf OSM-Basis mit Angaben zu Liniennummer	Karte	http://www.xn--pnvkarte-m4a.de/
Infrastruktur	Knut Rosenthal	reaktivierungen.spnv-deutschland.de	aktuelle Übersicht über geplante SPNV-Streckenreparaturen	Tabelle	https://reaktivierungen.spnv-deutschland.de/
Infrastruktur	DB Netz	Trassenfinder	mächtiges Infrastruktur-Online-Tool mit zahlreichen	Karte	https://trassenfinder.de/
Infrastruktur	DB	Liniennetzkarten des Nahverkehrs	Übersicht zu den SPNV-Linien pro Bundesland, mit	Karte	https://www.bahn.de/service/fahrplaene/streckennetz
Infrastruktur	Wikipedia	Artikel zu SPNV-Netzen, Beispiel Hellweg-Netz		Artikel	https://de.wikipedia.org/wiki/Hellweg-Netz
Infrastruktur	Wikipedia	Artikel zu SPNV-Linien, Beispiel Ems-Leine-Express	oft mit Angaben zum aktuellen SPNV-Betrieb	Artikel	https://de.wikipedia.org/wiki/Ems-Leine-Express
Infrastruktur	Wikipedia	Artikel zu SPNV-Strecken, Beispiel Bahnstrecke Hannover-Braun	oft mit Angaben zum aktuellen SPNV-Betrieb	Artikel	https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnstrecke_Hannover%2F380%93Braunschweig
Infrastruktur	Wikipedia	Liste deutscher Tarif- und Verkehrsverbände	hilfreich bei der Erfassung von SPNV-Netzen	Liste	https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_deutscher_Tarif-_und_Verkehrsverb%C3%BCnde
Infrastruktur	EBA	Liste der aktiven EIU in DE		Tabelle	https://www.schiennahverkehr.de/wp-content/uploads/2021/09/Wettbewerbsfahrplan_2021_Bundesverband-Schiennahverkehr.pdf
SPNV-Betreiber	Bahn-Report	SPNV-Karte	aktuelle Übersicht über SPNV-EVU und SPNV-Netze	Karte	https://bahn-report.de/docs/leseproben/http_download.inc.php?dat=SPNV-Karte2020.pdf
SPNV-Betreiber	Bundesverband	Wettbewerbsfahrplan 2021	Langfristplanungen der Aufgabenträger des SPNV, i	Tabelle	https://www.schiennahverkehr.de/wp-content/uploads/2021/09/Wettbewerbsfahrplan_2021_Bundesverband-Schiennahverkehr.pdf
SPNV-Betreiber	Bundesverband	Vergabekalender	aktuelle Übersicht über bereits laufende und in den	Liste	https://www.schiennahverkehr.de/aktuell/vergabekalender/
SPNV-Betreiber	Bundesverband	Aufgabenträger & Eisenbahnverkehrsunternehmen 2021	aktuelle Übersicht über SPNV-EVU in DE	Karte	https://www.schiennahverkehr.de/wp-content/uploads/2021/07/Aufgabentraeger_Eisenbahnverkehrsunternehmen_2021.pdf
SPNV-Betreiber	Bundesverband	Aufgabenträger & Wettbewerbsnetze 2021	aktuelle Übersicht über SPNV-Netze in DE	Karte	https://www.schiennahverkehr.de/wp-content/uploads/2021/07/Aufgabentraeger_Wettbewerbsnetze_2021.pdf
SPNV-Betreiber	Bundesnetzagentur	Marktuntersuchung Eisenbahnen	aktuelle Untersuchung zum SPV-Wettbewerbsmarkt	Bericht	https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Eisenbahnen/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/start.html
SPNV-Betreiber	Knut Rosenthal	wettbewerb.spnv-deutschland.de	aktuelle Übersicht zu Ausschreibungen der SPNV-N	Tabelle	https://www.wettbewerb.spnv-deutschland.de/
SPNV-Betreiber	Wikipedia	Liste der SPNV-Linien in den Bundesländern, Beispiel NRW	Übersicht zu den SPNV-Linien pro Bundesland, mit	Liste	https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_SPNV-Linien_in_Nordrhein-Westfalen
SPNV-Betreiber	EBA	Liste der aktiven EVU in DE		Tabelle	https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Eisenbahnunternehmen/eisenbahnunternehmen_node.html;jsessionid=1602B9E3FA0B7368CA4ADC228D777048.live!21304#doc1527822bodyText1
SPNV-Fahrzeuge	DSO	Bestellte Neufahrzeuge in Deutschland - Übersicht	nahezu alle EVU und Netze seit 2014, nach Jahren g	Liste	https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?322.7314339
SPNV-Fahrzeuge	DSO	Neubautriebwagen DB AG	Aufgelistet sind Fahrzeuge, welche sich derzeit in d	Liste	https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?322.6948696
SPNV-Fahrzeuge	DSO	Dieseltriebwagen deutscher Privatbahnen	Aufgeführt werden alle Dieseltriebwagen in Deutschl	Liste	https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?322.4650712
SPNV-Fahrzeuge	DSO	Elektrotriebwagen deutscher Privatbahnen	Aufgeführt werden alle Elektrotriebwagen in Deutschl	Liste	https://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?322.4648677
SPNV-Fahrzeuge	Mario Fliege	revisionsdaten.de	Datenbank Triebfahrzeuge, Filtermöglichkeit nach E	Datenbank	https://www.revisionsdaten.de/
SPNV-Fahrzeuge	ERA	VKM - Vehicle Keeper Marking Register	The Vehicle Keeper Marking Register (VKM Register)	Liste	https://www.era.europa.eu/registers/vkm_en
SPNV-Fahrzeuge	Wikipedia	Artikel zu Fahrzeugen, Beispiel Stadler Flirt	umfangreiche Angaben zur jeweiligen SPNV-Baurei	Artikel	https://de.wikipedia.org/wiki/Stadler_Flirt
SPNV-Fahrzeuge	Wikipedia	Artikel zu SPNV-Betreibern/EVU, Beispiel GoAhead	umfangreiche Angaben zum jeweiligen SPNV-Betrei	Artikel	https://de.wikipedia.org/wiki/Go-Ahead_Verkehrsgesellschaft_Deutschland
SPNV-Fahrzeuge	Wikipedia	Liste der Lokomotiv- und Triebwagenbaureihen der Deutschen	grundlegende Übersicht zu den Baureihen der DB, r	Liste	https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Lokomotiv-_und_Triebwagenbaureihen_der_Deutschen_Bahn
SPNV-Fahrzeuge	Wikipedia	Liste der Baureihen im deutschen Fahrzeugsinstellungsregister	grundlegende Übersicht zu den Baureihen im deuts	Liste	https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Baureihen_im_deutschen_Fahrzeugsinstellungsregister

Anhang 4: Gesamtübersicht mit den recherchierten Fahrzeugen je Streckennetz

Nr.	Betreiber	Region	Netz	Fahrerstatus	Baureihe	Eigenschaften	Anzahl
1	Arriva DE	SN/OK	Niebuß-OK	LINT 41	648		
2	DB Regio Nord	SN/HT	Netz West	LINT 54	622		
3	DB Regio Nord	SN	Netz Nord Ost I	LINT 41	648		
4	Loosbabin	SN	Netz Nord Ost II	LINT 41	648		
5	DB Regio Nord	SN/HT	Netz Mitte	TWINDEX VV	645	Viersteller	17
6	DB Regio Nord	SN/HT	Netz Ost	FLIRT	648		
7	Loosbabin	SN/HT	Netz Nord Ost I	FLIRT	1420, 1430	Funk- und Sechsteller	15
8	Arriva	SN/HT	Netz Ost	LINT 54	622		
9	AKN	SN/HT		VTA		acht Zweifert-EV	18
10	S-Bahn Hamburg	SN/HT/NI	S-Bahn Hamburg		627		
11	S-Bahn Hamburg	SN/HT/NI	S-Bahn Hamburg		690		
12	DB Regio Nordost	MV/CH	Ost-West	LINT 41	623		
13	DB Regio Nordost	MV	Wismar	E-Talent	442, 2		23
14	DB Regio Nordost	MV	Wismar	Desiro	642		24
15	ODEG	MV	Westmecklenburg	TALENT			24
16	ODEG	MV	Westmecklenburg	PKS	0600	Schraubenkupplung	5
17	DB Regio Nordost	MV/BB/NE	Neustadt	TWINDEX VV	645	Fünfsteller	2
18	ODEG	MV	Ostseeküste Ost	Desiro ML II	4746		7
19	DB Regio Nordost	MV	(Lübeck)	LINT 27	600		1
20	DB Regio Nordost	MV		GTW ZV6	646, 0	erste Generation	30
21	PRESS	MV	Rügenische Bäderbahn	RS1	0600	Schuku	1
22	HANS	MV/BB	Elbe-Alster	NEB1	626	Schraubenkupplung	2
23	HANS	MV/BB	Elbe-Alster	LVT/5	627	Schraubenkupplung	6
24	HANS	BB/ST	(Stendal)	LINT 27	640		1
25	HANS	MV/BB/ST		RS1	0600	Schraubenkupplung	1
26	ODEG	MV/BB/NE	Netz Stadtbahn Los 2	RS5	0445, 0446		15
27	ODEG	MV/BB/NE	Netz Stadtbahn Los 2	GTW ZV6	646, 0	vierte Generation	5
28	ODEG	MV/BB/NE	Netz Stadtbahn Los 2	RS1	0600	Schraubenkupplung	15
29	DB Regio Nordost	BB	Nordostbrandenburg	LINT 41	623		2
30	NEB	BB/SA	Neubauniederlande	PKS Link II	622		21
31	NEB	BB/SA	Ostbrandenburg Los 1/2	TALENT	643		8
32	NEB	BB/SA	Ostbrandenburg Los 1/2	RS1	0600	Schraubenkupplung	15
33	NEB	BB/SA	Neubauniederlande	TALENT	643		1
34	DB Regio Nordost	BB/NE	Netz Stadtbahn Los 1/2	E-Talent	442, 1, 442, 3		48
35	S-Bahn Berlin	BB/NE	S-Bahn Berlin		480		1
36	S-Bahn Berlin	BB/NE	S-Bahn Berlin		481		1
37	S-Bahn Berlin	BB/NE	S-Bahn Berlin		485		1
38	DB Regio Südost	ST/BB/NI	E-Netz Sachsen-Anhalt Nord		625		1
39	ARRA	ST/BB/NI/TH	Deisenhuet Sachsen-Anhalt	LINT 41	1468		1
40	Evras	NI	Deisenhuet Niedersachsen Südost Los 2	LINT 54	622		1
41	Evras	NI	Deisenhuet Niedersachsen Südost Los 2	LINT 41	648		1
42	DB Regio Nord	NI/TH	Deisenhuet Niedersachsen Südost Los 1	LINT 41	648		1
43	Evras	NI	Elektronet Niedersachsen Ost	Coradia Cont	1440, 1	Viersteller	24
44	EVV	NI/BB	Weser-Eber	LINT 41	648		1
45	EVV	NI/BB			628		2
46	NWB	NI/BB	Regio S-Bahn Bremen/Niedersachsen	Coradia Cont	440, 2, 440, 3	Dei- und Fünfsteller	35
47	NWB	NI/BB		LINT 41	648, 1648		1
48	Arriva NL	NI/BB		GTW ZV6	(N6)		1
49	WVB (DNL)	NI/WW	Emsland	FLIRT	1428		15
50	Beschmer Eisenbahn	NI	(Beschmer Eisenbahn)	LINT 41	1468		1
51	NW/WW	NI/WW/NL	Freiburger Wald-Netz	FLIRT	0427, 0428, 0429, 2429	vgl. Helweg	7
52	Neubahn	NI/WW	Deisenhuet OWL, Los Nord	TALENT	643		1
53	NWB	NI/WW	Deisenhuet OWL, Los Süd	TALENT	643		35
54	WVB (DNL)	NI/WW	Mittelland	KISS	0445, 0446		13
55	DB Regio Nord	NI	S-Bahn Hannover		424	2011 ausgemustert?	1
56	DB Regio Nord	NI	S-Bahn Hannover		425		1
57	NWB	NW	Weser- und Landerbahn	LINT 41	648, 1648		32
58	ARRA	NW	RRX Vorlauf	0462			1
59	NX	NW	RRX Vorlauf	0462			51
60	NX	NW	Rhein-Weser-Schnee	E-Talent	0442		25
61	Neubahn	NW	Weser	FLIRT	0427, 0428, 0429, 2429	Dei-/Zwei-/Fünfsteller in allen Netzen	43
62	DB Regio NRW	NW/NL	Netz Westliches Münsterland	TALENT	643		1
63	NWB	NW	Westliches Münsterland	TALENT			1
64	DB Regio NRW	NW	Haard-Achse	FLIRT	1428		7
65	DB Regio NRW	NW	Sauerland	PKS Link Int	632, 633		36
66	ARRA	NW/NL	Niederrhein	FLIRT	1428		21
67	NWB	NW	Niers-Rhein-Emscher	LINT 41	648, 1648		1
68	Neubahn	NW/NL	Mias-Rhein-Lippe	FLIRT	0427, 0428, 0429, 2429	vgl. Helweg	1
69	ARRA	NW	Emscher-Ruhr	LINT 41	1427, 1428	zwei, 17 Drei- und 24 Fünfsteller, vgl. S-Bahn	1
70	ARRA	NW	Emscher-Ruhr	LINT 41	1468		1
71	ARRA	NW	Ruhr-Sieg	FLIRT	0426, 0427	8 Zwei- und 9 Dreifsteller	17
72	DB Regio NRW	NW	RRX Vorlauf		425		1
73	Vias Rail	NW	Erft-Schwan	LINT 41	623		1
74	Vias Rail	NW	Erft-Schwan	LINT 49	622		1
75	Arriva NL	NW/NL	(Aachen-Maastricht)	FLIRT	(N6)	Dreifsteller	8
76	Neurobahn	NW	RB 38 Süd	TALENT		beide RB 38 Süd -> Kuppelbar??	1
77	DB Regio NRW	NW	RB 38 Süd	TALENT	644	beide RB 38 Süd -> Kuppelbar??	1
78	RTB	NW		LINT 54	622		1
79	RTB	NW		RS1	0600	Schraubenkupplung	5
80	DB Regio NRW	NW/BB	Deisenhuet Köln	LINT 41	622		1
81	DB Regio NRW	NW/BB	Deisenhuet Köln	LINT 81	620		1
82	DB Regio NRW	NW	Rhein-Sieg-Region	E-Talent	442, 442, 3		10
83	DB Regio NRW	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr Los A		422		1
84	ARRA	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr Los B	FLIRT	3427, 3429	3x1, 17 Drei- und 24 Fünfsteller	41
85	DB Regio NRW	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr Los C	Coradia Cont	1440, 3	Dreifsteller	28
86	ARRA	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr Los D	LINT 41	1468		1
87	RRB Süd-Rhein-Bahn	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr S38	TALENT			26
88	Evras	NW/BB	Niederrhein	Desiro ML II	460		17
89	DB Regio NRW	NW/BB	Regio C	Coradia Cont	1440, 2, 1440, 3	Dei- und Fünfsteller	12
90	DB Regio NRW	NW/BB	Regio Z	RS 27	425		1
91	HLB	HE/W/WW/BB	Eifel-Westenwald-Sieg Los 2	LINT 27	640		1
92	HLB	HE/W/WW/BB	Eifel-Westenwald-Sieg Los 2	LINT 41	648, 1648		1
93	DB Regio Mitte	HE/W/WW/BB	Deisenhuet Eifel-Westenwald-Sieg Los 1	LINT 27	640		1
94	DB Regio Mitte	HE/W/WW/BB	Deisenhuet Eifel-Westenwald-Sieg Los 1	LINT 41	648		1
95	DB Regio Mitte	HE/W/WW/BB	Deisenhuet Eifel-Westenwald-Sieg Los 1	TALENT	643		1
96	HLB	HE/BB		GTW ZV6			1
97	HLB	HE/BB	Main-Lahn-Sieg	FLIRT	427, 429	13 Stk alle Netze zusammen	13
98	HLB	HE/BB	Main-Lahn-Sieg	GTW ZV6	646, 4		30
99	HLB	HE/BB	Main-Lahn-Sieg	LINT 41	648, 1648		1
100	HLB	HE/BB	Main-Lahn-Sieg	VLT 2E			207
101	HLB	HE/BB	Main-Lahn-Sieg	Desiro	642		6
102	DB Regio Mitte	HE	Niederrhein	E-Talent	442, 1, 442, 2		21
103	KHB (DB)	HE/WW			642		1
104	KHB (DB)	HE/WW		GTW ZV6	646, 2	erste Generation	13
105	RTB	HE/WW	Regioam Kanari	Regio/Talios			1
106	Lantus	HE/NI/TH	Nordosthessen	FLIRT	427, 428	Dei- und Viersteller	23
107	HLB	HE	Lahn-Vogelsberg-Rhön	LINT 41	648		1
108	DB Regio Südost	HE/TH	Deisenhuet Nordhungen	Desiro	642		1
109	DB Regio Südost	HE/TH	Deisenhuet Nordhungen		641		1
110	ARRA	TH/BB	Deisenhuet Saale-Thuringen-Saargau	E-Talent	8442, 8, 8442, 3	20 Drei- und 25 Fünfsteller (Straßenbahn)	35
111	SWN	TH	Härter-Straßenbahn	Combi			1
112	LEB	TH/ON	Deisenhuet Osthungen	RS1	0600	Schuku/Schraubenkupplung	60
113	LEB	TH	Deisenhuet Osthungen	RS1	0600	Schuku	37
114	Oberwiesbacher Bahnen	TH			641		1
115	DB Regio Südost	TH/ST	Eisler-Gemetal Los 2	LINT 41	429		2
116	DB Regio Südost	ST/ON	S-Bahn Mitteldeutschland II	E-Talent	1442, 1, 1442, 2		29
117	DB Regio Südost	ST/ON	S-Bahn Mitteldeutschland	E-Talent	1442, 1, 1442, 2		5
118	DB Regio 2	ON			641		1
119	DB Regio 2	BB/ON	Cottbus-Lepzig	E-Talent	442, 0, 442, 2		6
120	DB Regio Südost	ON	Elbe-Esler	E-Talent	442, 1, 442, 3		1
121	DB Regio Südost	BB/ON	Elbe-Esler	E-Talent	442, 1		8
122	MFB	SN	E-Netz Mittelsachsen	TALENT	643	Dreifsteller	1
123	MFB	SN	E-Netz Mittelsachsen	RS1	0600	Schraubenkupplung	1
124	MFB	SN	E-Netz Mittelsachsen	Coradia Cont	1440, 2, 1440, 3	Dei- und Fünfsteller	28
125	ODEG	SN	E-Netz Mittelsachsen	Coradia Cont	1440, 2, 1440, 3	Dei- und Fünfsteller	28
126	ODEG	SN	Spreew-Nieße	Desiro	642	Ochatz-Grosen	6
127	ODEG	BB/ON	Spreew-Nieße	RS1	0600	Schraubenkupplung	6
128	ODEG	BB/ON	Spreew-Nieße	RS1	0600	Schraubenkupplung	6
129	Trn	SN/ST	Ostachsen II	Desiro	642		26
130	Trn	SN/ST	Ostachsen II	Desiro	642		26
131	Trn	SN/ST		RS1	0600	Schraubenkupplung	10
132	SCG	SN			642		1
133	DB Regio Südost	SN/ST	U28	Desiro	642		1
134	TDH	SN	Deisenhuet VVO	Desiro	642		15
135	SCG	SN			642	Radiburg DD-Konrad	3
136	FEQ	SN		RS1	0600	Schraubenkupplung	3
137	EGD (DB)	SN	Erzgebirgsbahn	Desiro	642		1
138	SCG	SN	Erzgebirgsbahn 2	Desiro	642		1
139	LEB	SN	City-Bahn Chemnitz	Carolino		Verlängerung Erwerb	6
140	LEB	SN	City-Bahn Chemnitz	RS1	0600	Schraubenkupplung	6
141	LEB	SN	City-Bahn Chemnitz	Verobahn			1
142	EGD (DB)	SN		Desiro	642		5
143	VNB	SN/ST/ST		RS1	0600	Schuku	7
144	OPB	SN/ST/ST	Hof-AB	RS1	0600		7
145	OPB	SN/ST/ST	Hof-AB	LINT 41	14487		38
146	OPB	BY	Deisenhuet Oberfranken	RS1	0600	Schraubenkupplung	8
147	OPB	BY/ST	Regioabgabe Ostbayern (Eberfeldbahn)	RS1	0600	Schuku	13
148	OPB	BY	Regioabgabe Ostbayern (Münchberg)	RS1	0600		7
149	Waldthun	BY	Regioabgabe Ostbayern (Waldthun)	RS1	0600	Schraubenkupplung	10
150	DB Regio Bayern	BY/TH	E-Netz Franken	E-Talent	442, 1, 442, 2, 442, 3		22
151	DB Regio Bayern	BY	RSO II Ost		612		27
152	DB Regio Bayern	BY	RSO II Ost		641		1
153	DB Regio Bayern	BY	S-Bahn Nürnberg	E-Talent	42, 2	Viersteller	42
154	DB Regio Bayern	BY	S-Bahn Nürnberg	Coradia Cont	1440, 3		27
155	DB Regio Bayern	BY	Deisenhuet Nürnberg	LINT 41	628		1
156	DB Regio Bayern	BY	Deisenhuet Nürnberg	LINT 54	622		1
157	DB Regio Bayern	BY/HE	E-Netz Würzburg	Coradia Cont	440, 0, 440, 3	Dei- und Viersteller	31
158	DB Regio Bayern	BY/HE	E-Netz Würzburg	Coradia Cont	425		1
159	DB Regio Bayern	BY/HE	E-Netz Würzburg	TWINDEX VV	426		12
160	DB Regio Bayern	BY/HE	Neuen-Straßen	RS1	0600	Schuku/Schraubenkupplung	12
161	EB	BY/TH	Königsgr Stern	RS1	0600	Schuku/Schraubenkupplung	12
162	WB (DB)	BB/BB/NE	Hohenlohe-Franken-Unterrain	Desiro	642		1
163	WB (DB)	BB/BB/NE	Hohenlohe-Franken-Unterrain	Desiro	642		1
164	DB Regio Mitte	HE	Niddertal	Desiro	642		18
165	VVB (DB)	HE	Mittelrheinhahn	FLIRT	427, 428	Dei- und Viersteller	18
166	Rheinw. Vertrie	HE		RS1	0600	Schraubenkupplung	3
167	DB Regio Mitte	RP/SL	Koblenz-Trier	E-Talent	442, 0, 442, 2		13
168	CFI	RP/SL	Elz-Neer-Südwest	FLIRT	(C11)		2
169	CFI	RP/SL	Elz-Neer-Südwest	KISS	(C11)		8
170	CFI	RP/SL	Elz-Neer-Südwest	FLIRT	(C11)		1
171	DB Regio Mitte	RP/SL/WW	Elz-Neer-Südwest	FLIRT	425, 3		1
172	DB Regio Mitte	RP/SL	E-Netz Saar RB Los 1	Coradia Cont	1440, 0	Viersteller	25
173	LEB	SL	E-Netz Saar RB Los 2	Talent 3	8442	Dreifsteller	21
174	DB Regio Mitte	SL			642		1
175	Saarbahn	SL/2	Saarbahn				1
176	DB Regio Mitte	RP/SL	West- und Südpfalz	Desiro	642		1
177	DB Regio Mitte	RP/SL	West- und Südpfalz	TALENT			2
178	DB Regio Mitte	RP/SL	West- und Südpfalz	Desiro	628		7
179	DB Regio Mitte	RP/SL	S-Bahn Rhein-Neckar	Desiro	425		1
180	LEB	RP/SL/BB	Deisenhuet Südwest Los 2	LINT 54	622		1
181	LEB	RP/SL/BB	Deisenhuet Südwest Los 2	LINT 81	620		1

Anhang 5: Übersicht der Fahrzeuge in den Großräumen Rhein/Ruhr und Rhein/Main mit Ausführung der E-Kupplung

Nr.	Betreiber	Region	Netz	Fahrzeugtyp	Baureihe	Nummernreihe	Eigenschaften	Anzahl	Informationen zur Eku		
									Position	Baugröße	Bestückung
Großraum Rhein-Ruhr											
58	ABRN	NW	RRX Vorlauf	Desiro HC	0462	462 001-015; 050-065; 084	RE1+RE11	32	obenliegend	era4	K08 2x27 Stift-Buchse Kontakte Ag K08 2x 9 Stift-Buchse Kontakte Au K23/15 2x 2 era Quartax-Stift-Buchse
59	NX	NW	RRX Vorlauf	Desiro HC	0462	462 016-049; 066-082; 085	RE4+5+6	51	obenliegend	era4	K08 2x27 Stift-Buchse Kontakte Ag K08 2x 9 Stift-Buchse Kontakte Au K23/15 2x 2 era Quartax-Stift-Buchse
60	NX	NW	Rhein-Wupper-Schiene	E-Talent	9442	9442 151-160; 351-375		35	obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au
61	eurobahn	NW	Hellweg/Teutoburgerwald	FLIRT	0427, 0428, 0429, 2429	0427 109-122; 0428 100-124; 0428 125-128; 0429 001-005; 1429 031-035; 2429 011-018	Drei-/Vier-/Fünfteler in allen Netzen	43	obenliegend	era2	K08 2x63 Stift-Buchse Kontakte Au K10 2x10 Stift-Buchse Kontakte Ag
62	DB Regio NRW	NW/NL	Netz Westliches Münsterland	TALENT	643	643 034-036; 038; 040; 042; 044-045; 048-049; 051-053; 054-075			obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au
63	NWB	NW	Emscher-Münsterland	TALENT		643 118-120; 129; 272; 339-345; 360-361;			obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au
64	DB Regio NRW	NW	Haard-Achse	FLIRT	1428	1428 001-014		7			
65	DB Regio NRW	NW	Sauerland	PESA Link II-III	632, 633	632 101-120; 633 101-116		36	obenliegend	era3	K08 2x23 Druck-Festkontakt Ag K08 2x16 Stift-Buchsenkontakt Au K23/15 2x2 Stift-Buchse Quartax
66	ABRN	NW/NL	Niederrhein	FLIRT	1429, 2429	1429 008-021; 2429 001-007	Flirt 3, Fünfteilr	21	obenliegend	era2	K08 2x63 Stift-Buchse Kontakte Au K10 2x10 Stift-Buchse Kontakte Ag
67	NWB	NW	Niers-Rhein-Emscher	LINT 41	648, 1648	648 420-447				era1	2x48 Stift-Buchse Kontakt Au
68	eurobahn	NW/NL	Maas-Rhein-Lippe	FLIRT	0427, 0428, 0429, 2429	0429 006-019;	vgl. Hellweg				
69	ABRN	NW	Emscher-Ruhrtal	FLIRT	3427, 3429	3429 001-024					
70	ABRN	NW	Emscher-Ruhrtal	LINT 41	1648	1648 001-009 ?					
71	ABRN	NW	Ruhr-Sieg	FLIRT	0426, 0427	0426 100-107; 0427 100-108	8 Zwei-/9 Dreiteiler	17	obenliegend	era2	K08 2x63 Stift-Buchse Kontakte Au K10 2x10 Stift-Buchse Kontakte Ag
72	DB Regio NRW	NW	RRX interim	TALENT	644	644 001-032 ? Oder ab 044 ?			obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au K10 21x2x5B Au
73	VIAS Rail	NW	Erft-Schwalm	LINT 41	648	1648 251-253					
74	VIAS Rail	NW	Erft-Schwalm	LINT 54	622	622 261-269	Kuppelbar mit LINT 41?				
75	Arriva NL	NW/NL	(Aachen-Maastricht)	FLIRT	(NL)	??	Dreiteiler	8			
76	leuregiobahn (DB)	NW	RB 38 Süd	TALENT		643 201-226	beide RB 38 Süd -> Kuppelbar??		obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au
77	DB Regio NRW	NW	RB 38 Süd	TALENT	644	644 001-032 ? Oder ab 044 ?	beide RB 38 Süd -> Kuppelbar??		obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au
78	RTB	NW	?	LINT 54	622	622 270-272					
79	RTB	NW	?	RS1	0650	650 083-085; 740-744	Schraubenkupplung	5			
80	DB Regio NRW	NW/RP	Dieselnetz Köln	LINT 54	622	622 001-007					
81	DB Regio NRW	NW/RP	Dieselnetz Köln	LINT 81	620	620 001-049					
82	DB Regio NRW	NW	Rhein-Sieg-Express	E-Talent	442.2, 442.3	442 254-261; 301-302		10			
84	ABRN	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr Los B	FLIRT	3427, 3429	3427 001-008	3XL, 17 Drei- und 24 Fünfteler	41			
85	DB Regio NRW	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr S5, S8	Coradia Contir	1440.3	1440 300-327; 221-236; 371-380	Dreiteiler	28	obenliegend	era4	K08 2x 50 Stift-Buchse Kontakte Ag K08 2x 4 Stift-Buchse Kontakte Au K23/15 2x 2 era Quartax Stift-Buchse
86	ABRN	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr S7	LINT 41	1648	1648 001-008					
87	RBE Sub Regio-Bahn	NW	S-Bahn Rhein-Ruhr S28	TALENT		siehe RB 38 Süd					
88	trans regio	NW/RP	Mittelrheinbahn	Desiro ML II	460	460 001-017		17			keine VTSK Eku
89	DB Regio NRW	NW/RP	RE 8	Coradia Contir	1440.2, 1440.3	1440 221-236; 300-327; 371-380	Drei- und Fünfteler	26			
90	DB Regio NRW	NW/RP	RB 27		425	425 091-104; 106; 108 ?					
Großraum FFM											
97	HLB	HE/RP	Main-Lahn-Sieg	FLIRT	427, 429	427 123-125; 429 041-046; 429 047-050	13 Stk alle Netze zusammen	13			
98	HLB	HE/RP	Main-Lahn-Sieg	GTW 2/6	646.4	646 401-415; 419-421		30			
99	HLB	HE/RP	Main-Lahn-Sieg	LINT 41	648, 1648	648 010-032;					
100	HLB	HE/RP	Main-Lahn-Sieg	VT 2E		VT2E 1-9 ; 11-21		20?			
101	HLB	HE/RP	Main-Lahn-Sieg	Desiro	642	642 401-406		6			
102	DB Regio Mitte	HE	Mittelhessen	E-Talent	442.1, 442.2	442 109-113; 200; 202-208; 278-279; 281; 283-284; 287-289; 291-293		22	obenliegend	era3	K10 40x2x5B Ag K10 21x2x5B Au
160	DB Regio Bayern	BY/HE	Main-Spessart	TWINDEXX VA	445	0445 043-066	Drei- und Vierteler	12			
162	WFB (DB)	BW/BY/HE	Hohenlohe-Franken-Untermain	Desiro	642						
163	WFB (DB)	BY/HE	Kahlgrund	Desiro	642	640 001-005; 007; 012; 017; 019; 021; 026; 027; 061; 063-064; 066 usw.					
164	DB Regio Mitte	HE	Niddertal	Desiro	642						
165	VIAS Rail	HE/RP	(Mittelrheinbahn)	FLIRT	427, 428	427 149-123	Drei- und Vierteler	19			
180	vlexx	RP/SL/HE	Dieselnetz Südwest Los 2	LINT 54	622	622 401-445					
181	vlexx	RP/SL/HE	Dieselnetz Südwest Los 2	LINT 81	620	620 401-418					
182	DB Regio Mitte	RP/BW/HE	Dieselnetz Südwest Los 1	LINT 41	623	623 001-014					
183	DB Regio Mitte	RP/BW/HE	Dieselnetz Südwest Los 1	LINT 54	622	622 001-009; (010-018 -> Umbau in BR 620)					
184	DB Regio Mitte	RP/BW/HE	Main-Neckar-Ried	TWINDEXX VA	446	0446 001-048	Drei- und Vierteler	24			
185	DB Regio Mitte	HE	Dreieich	PESA Link II-III	632, 633	632 032-034; 633 002-008		10			
186	HLB	BY/HE	Südhessen-Untermain	Coradia Contir	1440.1, 1440.3	1440 154-170; 194-188; 341-353	Drei- und Vierteler	35			
187	VIAS Rail	HE/BW	Odenwald	Itino	0615	615 101-126		26			
191	DB Regio Mitte	HE/RP	S-Bahn Rhein-Main			425 425 023; 028; 030-035; 037; 066; 070 usw.					
193	DB Regio Mitte	HE/RP	S-Bahn Rhein-Neckar			425 425 015-020; 026-027; 029; 036; 038-041; 054; 063; 068-069 usw.					

Anhang 6: Analyse der Fahrzeuglastenhefte und Ausschreibungsunterlagen hinsichtlich der Anforderungen an Fahrzeuge

die Kupplung betreffende Aspekte		LH BAG (2016)	LH BW (NVBW, 2014)	Ausschreibung BEG Mühldorf (2021) Los M-MÜ (Mindestanforderungen)	Ausschreibung BEG Mühldorf (2021) Los M-PA (Mindestanforderungen)	Ausschreibung BEG Mühldorf (2021) Los LA-SR (Mindestanforderungen)	Ausschreibung BEG Mühldorf (2021) Los Rest (Mindestanforderungen)	Ausschreibung BEG Regensburg (2020) Los N-R-Plattl. (Mindestanforderungen)	Ausschreibung RMV Kinzigtal (2022) (Mindestanforderungen an die Fahrzeuge)
	Neu-/Gebrauchtfahrzeuge möglich	x	x	gebraucht, fahrdrahtunabh.	neu mit H2-Antrieb	gebraucht, fahrdrahtunabh.	gebraucht, fahrdrahtunabh.	Neu, elektrisch	fabrikneu, elektrisch
	Lokbespannte Züge / Triebzüge	x	x	lokbespannte DoSto			Triebzüge fahrdrahtunabh.		
Fahrzeuganzahl	Reservefahrzeuge müssen kuppelbar sein		x						
	alternativ andere Fzg, die vollwertigen Ersatz bieten		(x)						
	Fahrzeugreserve min xx % der benötigten Flotte	10-15	15						
	davon min. 2 sofort einsetzbar und 1 innerhalb 6 h		(x)						
Fahrzeug-Nachbestellungen nur zeitlich begrenzt möglich	x								
Allgemeines	Einhaltung aktueller Normen	x	x						
	Netzzugang	x	x						
Betrieb	Vmax min 140 km/h	(x)	(x)						160 km/h
	Zweirichtungsfahrzeuge	(x)	x						
	Mehrfachtraktion möglich, vollumfänglich kompatibel	x	x						
	zeitlich befristete Zusage zu betrieblicher Kuppelbarkeit		(x)						
	Kuppelbarkeit mit Gebrauchtfahrzeugen nicht erforderlich		(x)						
	min 50 % Antriebstechnik		(x)						
	Mg-Bremsen erforderlich		x						
	Ein-Mann-Betrieb möglich	x	x						
	Zugfunk und Zugbeeinflussung gemäß Netzzugang	x	x						
	Brandschutz	x	x						
Mischtraktionen (ET+VT) explizit fordern	x								
Fahrzeugausstattung	Sitzplatzkapazität	(x)	x	x	x	x	x	x	
	Durchgängigkeit, Mindestmaße	x	x						x
	Erfüllung TSI PRM	x	x	(x) nur WC/Einstiegshilfe genannt	(x) nur WC/Einstiegshilfe genannt	(x) nur WC/Einstiegshilfe genannt	(x) nur WC/Einstiegshilfe genannt	(x) nur WC/Einstiegshilfe genannt	Einstiegshilfe gemäß TSI PRM; Rampe / Hublift genau spezifiziert
	WC - Statusanzeige im Fahrstraum	x	x						x
	WC - Notrufeinrichtung	x	x						gemäß TSI PRM
	Steckdosen im Fahrstraum	(x)	x						x
	Videoüberwachung des Fahrstraums, Speicherung 72 h		x						x ohne Vorgaben zur Speicherzeit
	Rauchmelder inkl Warnhinweis	x							
	Fahrscheinautomaten	(x)							
	zusätzlich ggf. erf. Trittstufen	(x)	x						
Einstiege	Türsteuerung seitenselektiv, gesteuert	x	x						
	Bahnsteiglängenabhängige Türsteuerung	x	(x)						
	Türbedienung: Anforderungsschalter PRM		x						x
	Haltewunschschalter	(x)	(x)						
	Fahrgastzählsystem	(x)	(x)						x
	Rückspiegel oder Seitenfenster für "Serviceblick"	x							
	Heizungs-Lüftungssteuerung	x	x						x
FIS	FIS - Außenanzeigen: Zugzielanzeige Front/Heck	x	x						x
	FIS - Außenanzeigen: Zuglauf Seite	x	x						x
	FIS - Außenanzeigen: Produkt, Linie, Fahrziel, Fahrtroute	x	x						x
	FIS - Außenanzeigen: Darstellung Flügelung	x	x						x
	FIS - Innenanzeigen: dynamische, optische Anzeigen mit Produkt, Liniennummer, Linienbezeichnung, Fahrziel, aktuelle Uhrzeit	x	x	"statische und dynamische Informationen (optisch sowie akustisch) im Fahrzeug"				"Dynamische Information (Anzeiger, Durchsagen) im Fahrzeug"	x
	FIS - Innenanzeigen: Zielbahnhof und nächster Halt		x						x
	FIS - manuelle Unterdrückung muss möglich sein	x	x						x
	FIS - Anzeigen Mehrsprachigkeit		x						
	FIS - Aktuelle Informationen einsehbar sein	(x)	x						x
	Sprechstelle je Führerstand	x	x						x Sprechstelle im Mehrzweckraum
	Innen- und Außenbeschallungsanlage (seitenlektiv)	x	x						x
	FIS - akustisches Informationssystem	x	x						x
	FIS - selektive Beschallung von Zugteilen bei Flügelung	x	x						x
	FIS - Programmierung durch Betreiber möglich sein		x						
	FIS - Bedienung muss bei Mehrfachtraktion vom führenden Triebzug aus erfolgen können		x						
	FIS - Digitalisierte Sprachausgabe	(x)							x
	FIS - Baustellenverkehre / Sonderverkehre parallel integrierbar sein	x							
Kommunikation via VDV Schnittstellen 453, 454	x		"Lieferung von Soll- und Echtzeitdaten sowie von Tarifdaten an den bayernweiten Datenpool für Auskunftssysteme (DEFAS Bayern)"				"Lieferung von Soll- und Echtzeitdaten an den bayernweiten Datenpool für Auskunftssysteme (DEFAS BAYERN)"	XML-Schnittstelle	
Infotainment ins FIS integrierbar		x						(x)	
Fahrzeugortung via GPS [BAG: satellitengestützt]	x	x							
WLAN für Fahrgäste [ausführlich beschrieben]/ [BAG: allgemeiner]	x	x	x	x	x	x	x	x	
Sitzplatzreservierung	(x)								
(Notruf)sprechstellen	x	x						x	
Kupplung	Zugbildung mittels automatischer Kupplung	x	x						
	Schaku Typ 10	x	x						
	Einbauhöhe 1040 mm +/- 20 mm über SO	x	x						
	Automatisches Kuppeln der HL und HBL	x	x						
	Automatisches, deaktivierbares Kuppeln der E-Kontakte	x	x						
Gebrauchtfahrzeuge: Schraubenkupplung zulässig	(x)	(x)							
Elektronisches Fahrgeldmanagement (EFM)								x	

x Aussage vorhanden
(x) Aussage als Option/abgeschwächt vorhanden

Anhang 7: Kategorisierung der Funktionen

	Fahrzeugsteuerung	Bremung	Türsteuerung	Kupplung	Federung/Stromabnehmer	Meldungen	Beschallung	FIS	sonst	Bordnetz	aus Lastenheften	in IBIS integrierbar
einzelige Kontakte	Fahrzeugsteuerungsgeräte (ZWS)/ Fahrzeugsteuerungsgeräte (FMZ)/ Fahrzeugsteuerungsgeräte (ZMS)/ Fahrzeugsteuerungsgeräte (ZDS) Fahren Bremsen CAN Powerline A (4) CAN Powerline B (4) RS485 Train Bus (4) UIC train BUS (16) Warnsignal Prüfung NBS (3) Einschaltschleife (Aufgerüstet) Fahrtrichtung 1 Fahrtrichtung 2 Notfahrt Hilfsfahrt Traktionssperre Zug-besetzt-Meldung Eihermet (4) Zugidentifikationskontrolle	Schnellbremse 1 Schnellbremse 2 Störung Bremse Federspeicher gelöst Federspeicher anliegen Fahrgasnotbremse Notbremsüberbrückung Notbremse Führerstand Not-AUS Status no emergency brake	Zentralverriegelung Zentralverriegelung AUS Grünschleife links Grünschleife rechts Türfreigabe links Türfreigabe rechts Türen schließen Schiebetritt Anforderung Tür Anforderung Auslösung Nothahn	Kupplungskontrolle mechanisch Kupplungskontrolle elektrisch el. Gek. A1 el. Gek. B2 el. Gek. B1 el. Gek. + Entkuppeln quittieren	Federüberwachung Notsenken	Feuer-/Brandalarm	Beschallung außen rechts Beschallung außen links Beschallung innen UIC 1 UIC 2 UIC 5 UIC 6 UIC 7 UIC 8 UIC 13 Fahrzeugindividuelle Beschallung gefordert. (Flügel)	IBIS Bus 1 IBIS BUS 2 WC-Notrufeinrichtung Sprechstellen	Beleuchtung ein Beleuchtung aus Vorheizen	Batteriestatus BAT EIN BAT AUS Spannungsversorgung 24 V Spannungsversorgung 36 V Erde Bus Bar 36 V+ (8) Bus Bar 36 V- (8) 36 V DC Sammelschiene 36 V+ (8) Sammelschiene 36 V- (8) Vers. ZSL + Vers. ZSL -	Mg-Bremse erf. -> via "Schnellbremse" Haltewunschtaaste x Fahrgestälhssystem x Fahrerscheinautomaten x Fahrerortung x Stipplplatzreservierung x el. Fahrgeldmanagement x	
mehrfache Kontakte (Eibene)	ETB A TX+ ETB A RX+ ETB A TX- ETB A RX- Betriebsmetz A/B TX+/- RX+/-	ETB B TX+ ETB B RX+ ETB B TX- ETB B RX-										
Summe benötigter Kontakte	Zugsteuerung (4) Warnsignal (1) Einschaltsverr (1) Notfahrt (1) Hilfsfahrt (1) Traktionssp (1) Zug-besetzt (1) Zugidentiff (1) Fahrtrichtung (2)	Schnellbr (2) Störung Bremse (1) Federspeicher (2) Fahrgasnotbr (1) NBS (1) Notbr FS (1) Not-Aus (1) Status keine Notbr (1)	Zentralverr (2) Grünschleife (2) Türfreigabe (2) Türen schließen (1) Schiebetritt (1) Türanforderung (1) Auslösung Nothahan (1) Tür 1/letzte Tür deaktivieren ? (2)	Kupplungskontr (2) Entkuppeln Quitt (1)	Federüberwachung (1) Notsenken (1)	Feuer-Brandal (1)	Beschallung außen (2) UIC-Leitungen (7)	IBIS (2) Notrufeinrichtung (1) Sprechstellen (1)	Beleuchtung (2) Vorheizen (1)	Batteriestatus (1) Batterie ein/Aus (2) Sammelschiene + (1) Sammelschiene - (1) Erde (1)		
mit Redundanz (x2)	26	20	24	6	4	2	18	2 / (8)	(6)	6 / (12)		
Summe	108 / (126)											

Reserve 1 bis x

Diagnosesystem

Anhang 8: Bewertung der Funktionen hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen

	Fahrzeugsteuerung	Bremnung	Türsteuerung	Kupplung	Federung/Stromabnehmer	Meldungen	Beschallung	FIS	sonst	Bordnetz
einzelige Kontakte	Fahrzeugsteuersignale über Bus UIC train BUS (16) Warnsignal Einschaltverriegelung (Aufgerüstet) Fahrtrichtung 1 Fahrtrichtung 2 Notfahrt Hilfsfahrt Traktionssperre Zug-besetzt-Meldung Zugidentifikationskontrolle	Schnellbremse 1 Schnellbremse 2 Störung Bremse Federspeicher gelöst Federspeicher anliegen Fahrgaststobremse Notbremsüberbrückung Notbremse Führerstand Not-AUS Status no emergency brake	Zentralverriegelung Zentralverriegelung AUS Grünschleife links Grünschleife rechts Türfreigabe links Türfreigabe rechts Türen schließen Schiebetritt Anforderung Tür Anforderung Auslösung Nothahn Bahnsteiglängenanb. Türsteuerung	Kupplungskontrolle mechanisch Kupplungskontrolle elektrisch Entkuppeln quittieren	Federüberwachung Notsenken	Feuer-/Brandalarm	Beschallung außen rechts Beschallung außen links Beschallung innen UIC 1 UIC 2 UIC 5 UIC 6 UIC 7 UIC 8 UIC 13 Fahrzeugindividuelle Beschallung gefordert. (Flügel)	IBIS Bus 1 IBIS BUS 2 WC-Notrufeinrichtung Sprachstellen	Beleuchtung ein Beleuchtung aus Vorheizen	Batteriestatus BAT EIN BAT AUS Spannungsversorgung +24 V / +36 V Spannungsversorgung -24 V / -36 V Erdung
Zusammenlegen auf Bus	4 Adern		4 Adern			4 Adern + 3 Adern Spannungsversorgung				

Legende

Basintegrität
SIL1
SIL2
SIL3
SIL4
keine Bewertung möglich

Anhang 9: Kupplungszeiten Deutschlandtakt

Geplante Kuppel- und Entkuppelvorgänge im Zielfahrplan Deutschlandtakt, Planfall 2030+, 3. Gutachterentwurf (nur SPNV)

Ort	Linie	Zugtyp (ohne Gewähr)	Takt	Kuppeln				Entkuppeln			
				Haltezeit Zug 1	Haltezeit Zug 2	Haltezeit Zug 1	Haltezeit Zug 2	Kuppelzeit	Zugfolgezeit	Haltezeit	Puffer
BB Potsdam Goltm	N 22 BB	Talent 3	60 min	6 min	3 min	4 min	5 min	2 min	3 min	1 min	-1 min
BB Potsdam Goltm	N 21 BB	Talent 3	60 min	8 min	3 min	8 min	2 min	5 min	1 min	0 min	
BW Friedrichsfeld	HeX 6.1/6.2	Twindexx o. ä.	60 min	7 min	4 min	3 min	5 min	3 min	3 min	1 min	1 min
BW Friedrichsfeld	N60.1/60.2 HE	Twindexx o. ä.	60 min	8 min	5 min	3 min	5 min	4 min	3 min	1 min	2 min
BW Gottenheim	B5B 5/3a	Coradia Continental	30 min	5 min	3 min	2 min	3 min	2 min	2 min	1 min	1 min
BW Hausach	OSB 5.1/5.2	Mireo Plus B	60 min	6 min	2 min	2 min	4 min	1 min	4 min	1 min	0 min
BW Hochdorf (b Horb)	E 9.1/9.2	Mireo	60 min	10 min	4 min	3 min	8 min	3 min	6 min	1 min	1 min
BW Meckesheim	SRN 55.1/5.2	425	30 min	9 min	6 min	4 min	7 min	5 min	3 min	1 min	2 min
BW Müllheim	SB 10a	Mireo	60 min	7 min	3 min	3 min	6 min	2 min	4 min	1 min	0 min
BW Renningen	ST 60	423	30 min	8 min	3 min	8 min	3 min	2 min	5 min	1 min	0 min
BW Titisee	B5B 3a	Coradia Continental	60 min	7 min	4 min	2 min	4 min	3 min	3 min	1 min	2 min
BW Übstadt Ort	SR 3.1/3.2	S-Bahn KA	30 min	2 min	1 min	2 min	0,5 min	1 min	0,5 min	0 min	0 min
BY Aschaffenburg	E 5.a1/5.a2 BY	Twindexx o. ä.	60 min	11 min	6 min	3 min	5 min	4 min	5 min	2 min	3 min
BY Augsburg	E 14 BY	offen	60 min	8 min	5 min	3 min	8 min	3 min	3 min	2 min	2 min
BY Augsburg	E 14 BY	offen	60 min	8 min	5 min	3 min	8 min	3 min	3 min	2 min	2 min
BY Bamberg	E 8. c BY	Twindexx o. ä.	120 min	14 min	5 min	5 min	14 min	3 min	9 min	2 min	0 min
BY Coburg	E 8.01/8.b2 BY	Desiro HC Dosto Vmax	120 min	6 min	3 min	3 min	6 min	1 min	3 min	2 min	0 min
BY Dachau	S 2. a BY	423	60 min	6 min	3 min	3 min	7 min	2 min	3 min	1 min	0 min
BY Ebenhausen	E 4 BY	612?	120 min	6 min	3 min	2 min	4 min	2 min	3 min	1 min	1 min
BY Ebenhausen	N 4 BY	612?	120 min	6 min	3 min	4 min	6 min	2 min	3 min	1 min	-1 min
BY Garmisch-Partenkirchen	N 69 BY	Talent 3	60 min	6 min	3 min	3 min	6 min	1 min	3 min	2 min	0 min
BY Holzkirchen	N 66.a BY	BOB	60 min	6 min	3 min	3 min	6 min	2 min	3 min	1 min	0 min
BY Holzkirchen	N 66.b BY	BOB	120 min	8 min	5 min	9 min	12 min	4 min	3 min	1 min	-4 min
BY Immenstadt	E27/29 BY	612	60 min	15 min	3 min	2 min	14 min	2 min	12 min	1 min	1 min
BY Landshut	E 22 BY	offen	30 min	5 min	2 min	4 min	1 min	2 min	2 min	1 min	1 min
BY Lauf (r Pegnitz)	N33.a BY	offen	60 min	6 min	3 min	2 min	6 min	2 min	3 min	1 min	1 min
BY Markt Schwaben	S 3 BY	423	60 min	5 min	2 min	3 min	7 min	1 min	3 min	1 min	-1 min
BY Markredwitz	E 1.2a BY	612	120 min	12 min	3 min	2 min	11 min	2 min	9 min	1 min	1 min
BY Neuenmarkt-Wirsberg	E 7. a BY	611	120 min	6 min	3 min	2 min	5 min	2 min	3 min	1 min	1 min
BY Neuenmarkt-Wirsberg	E 7. b BY	611	120 min	5 min	3 min	2 min	4 min	2 min	2 min	1 min	1 min
BY Pegnitz	E 1.2a BY	612	60 min	7 min	3 min	2 min	6 min	2 min	4 min	1 min	1 min
BY Rosenheim	E 28.b BY	Flirt 3	60 min	6 min	3 min	2 min	4 min	1 min	3 min	2 min	1 min
BY Schäftlach	N 66.3 BY	BOB	60 min	7 min	4 min	2 min	5 min	3 min	3 min	1 min	2 min
BY Schäftlach	N 66.1 BY	BOB	60 min	8 min	5 min	8 min	11 min	4 min	3 min	1 min	-3 min
BY Selb-Plößberg	N 21 BY	650	60 min	7 min	4 min	2 min	4 min	3 min	3 min	1 min	2 min
BY Senden	N 75a BY	offen	120 min	5 min	3 min	2 min	6 min	2 min	2 min	1 min	1 min
BY Senden	N 105 BY	offen	60 min	6 min	3 min	2 min	5 min	2 min	3 min	1 min	1 min
BY Türkheim	N 120 BY	offen	120 min	8 min	3 min	3 min	2 min	3 min	3 min	1 min	0 min
HE Beienheim	N 31/32 HE	HZL?	60 min	8 min	6 min	3 min	5 min	5 min	2 min	1 min	3 min
HE Eichenberg	N 7.1/7.2 HE	Flirt 1	60 min	8 min	5 min	5 min	5 min	4 min	3 min	1 min	2 min
HE Frankfurt-Sossenheim	S 13 HE	Regio-S-Bahn	30 min	9 min	4 min	1 min	4 min	3 min	5 min	1 min	3 min
HE Gießen Hbf	HeEx 3	Twindexx o. ä.	60 min	8 min	5 min	3 min	7 min	3 min	3 min	2 min	2 min
HE Gießen Hbf	E 30.1 HE	425	60 min	8 min	5 min	3 min	6 min	3 min	3 min	2 min	2 min
HE Niederhöchstadt	S 3 HE	423	15 min	6 min	3 min	2 min	4 min	2 min	3 min	1 min	1 min
NI Vienenburg	N 60 NI	648	60 min	7 min	4 min	2 min	6 min	3 min	3 min	1 min	2 min
NRW Bestwig	E 57 NW	Pesa Link	60 min	8 min	4 min	2 min	7 min	3 min	4 min	1 min	2 min
NRW Dorsten	E 14.a NW	CAF Civity	60 min	8 min	4 min	3 min	9 min	3 min	4 min	1 min	1 min
NRW Dortmund	RRX 4 NRW	Desiro HC	60 min	8 min	3 min	3 min	7 min	1 min	5 min	2 min	0 min
NRW Eitorf	E 9 NW	Talent 3	60 min	9 min	5 min	3 min	7 min	4 min	4 min	1 min	2 min
NRW Erndtebrück	N 94 NW	offen	120 min	8 min	5 min	3 min	9 min	4 min	3 min	1 min	2 min
NRW Lage (Lippe)	blau?	642	60 min	9 min	4 min	2 min	6 min	3 min	5 min	1 min	2 min
NRW Letmathe	E 16 NW	Flirt 1	120 min	7 min	3 min	3 min	5 min	2 min	4 min	1 min	0 min
NRW Letmathe	N 91 NW	426	60 min	8 min	5 min	3 min	7 min	4 min	3 min	1 min	2 min
NRW Lindern	N 33 NW	Coradia Continental	60 min	6 min	4 min	3 min	4 min	2 min	1 min	1 min	0 min
NRW Löhne	E 7.a NI	Stadler KISS	60 min	6 min	4 min	4 min	6 min	3 min	2 min	1 min	0 min
NRW Ottbergen	N 70 NW	offen	60 min	7 min	5 min	3 min	5 min	4 min	2 min	1 min	2 min
NRW Stolberg	N19/20 NW	643	30 min	10 min	1 min	1 min	10 min	0 min	9 min	1 min	0 min
NRW Wesel	E 19.a NW	Flirt 3	60 min	7 min	5 min	5 min	8 min	4 min	2 min	1 min	5 min
RLP Mainz	N 33 RP	offen	60 min	12 min	5 min	5 min	13 min	2 min	8 min	2 min	-1 min
SH Elmshorn	N 8 SH	Twindexx o. ä.	60 min	9 min	4 min	2 min	10 min	3 min	5 min	1 min	2 min
SH Lübeck	E 6.1/5.2 SH	Twindexx	30 min	14 min	6 min	14 min	4 min	8 min	2 min	2 min	
SH Neumünster	E 2 SH	Twindexx	60 min	6 min	3 min	3 min	5 min	1 min	3 min	2 min	0 min
SN Bischofswerda	E 1 SA	offen	60 min	6 min	3 min	2 min	5 min	2 min	3 min	1 min	1 min
SN Bischofswerda	N 60 SA	offen	120 min	7 min	5 min	4 min	6 min	4 min	2 min	1 min	1 min
SN Gößnitz	E 1 TH	offen	120 min	6 min	3 min	3 min	5 min	2 min	3 min	1 min	0 min
SN Werdau	S 5.a SL	Talent 3	60 min	9 min	5 min	2 min	6 min	4 min	4 min	1 min	3 min
ST Halberstadt	E 4 ST	648	60 min	8 min	4 min	5 min	9 min	3 min	4 min	1 min	-1 min
ST Halle(S)	S 6.a SL	Talent 3	30 min	9 min	4 min	4 min	7 min	2 min	5 min	2 min	0 min
ST Naumburg	E 19 TH	Talent 3	60 min	8 min	4 min	2 min	6 min	3 min	4 min	1 min	2 min
TH Arnstadt	N 23 TH	offen	60 min	9 min	4 min	2 min	5 min	3 min	5 min	1 min	2 min
TH Grimmenthal	N 16.2 TH	612?	120 min	6 min	3 min	3 min	7 min	2 min	3 min	1 min	0 min
TH Sangerhausen	E 9 ST	offen	120 min	6 min	3 min	2 min	4 min	2 min	3 min	1 min	1 min
TH Weida	E 103.a TH	offen	120 min	11 min	3 min	2 min	4 min	2 min	8 min	1 min	1 min
TH Weida	E 103.b TH	offen	120 min	7 min	3 min	2 min	4 min	2 min	4 min	1 min	1 min
Gewählte Werte				5 min	3 min	2 min	4 min				
Mittelwert				7,6 min	3,7 min	2,8 min	6,4 min	2,5 min	3,9 min	1,2 min	0,9 min
ohne Extreme				7,1 min	3,6 min	2,7 min	5,9 min	2,5 min	3,4 min	1,2 min	0,9 min

Cutoff = + 3 min

Fahrplangrundlage: Zielfahrplan Deutschlandtakt, Planfall 2030+, 3. Gutachterentwurf