

Triebwagen für den zukünftigen Nah- und Regionalverkehr in Deutschland

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Thomas Künzel

von der

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

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Maas
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Beate Bender

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26.08.2019

Berlin 2019

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse, welche Fahrzeugkonzepte im Nah- und Regionalverkehr der Zukunft in Deutschland zur Anwendung kommen werden.

Anhand von verschiedenen Kennziffern wird untersucht, welche der betrachteten Fahrzeugkonzepte signifikante, konzeptionelle Vorteile gegenüber anderen Typen aufweisen. Aufgrund der ermittelten Kennziffern wird die These aufgestellt, dass es bei Schienenfahrzeugen kein hervorgehobenes Leichtbaukonzept gibt, welches zu einem besonderen Vorteil gegenüber anderen Konzepten führt. Diese These kann im Weiteren bestätigt werden, d.h. es wird nachgewiesen, dass das Fahrzeuggewicht in direkter Abhängigkeit von der Transportkapazität und spezifischen Ausstattungswünschen der Besteller ist und keines der untersuchten Fahrzeugkonzepte ein Beispiel für signifikanten, konzeptionellen Leichtbau darstellt. Um die These untermauern zu können, wurde ein Effizienzfaktor für Fahrzeugkonzepte eingeführt, welcher sich aus der längenbezogenen Masse, der Transportkapazität und der Zugänglichkeit zusammensetzt und eine übergreifende Bewertung verschiedener Fahrzeugkonzepte zulässt. Für den in dieser Arbeit verwendeten Effizienzfaktor werden individuelle Gewichtungsfaktoren festgelegt. Diese lassen sich, zum Beispiel bei einer Anwendung in öffentlichen Ausschreibungen, je nach Wunsch des Aufgabenträgers anpassen, um eine eindeutige, ganzheitliche Bewertung eines angebotenen Fahrzeugs zu erzielen. Auf Grundlage des Effizienzfaktors wird dann die zielgerichtete Ableitung eines zukunftsgerichteten Fahrzeugkonzepts für den Nah- und Regionalverkehr beschrieben.

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Ergebnisse und einer Untersuchung zur Entwicklung der Infrastruktur wird die Frage nach dem zukünftigen Antriebskonzept beantwortet. Neben den klassischen Antrieben, gespeist aus einer Fahrleitung und Dieselantrieben, werden auch neue Fahrzeugkonzepte mit Batterie- und/oder Brennstoffzellenantrieb in die Untersuchung einbezogen. Es kann dabei gezeigt werden, dass ausschließlich die elektrische Traktion in Zukunft noch zur Anwendung kommen wird, während die Traktion mit Verbrennungsmotoren auslaufen wird. Eine besondere Rolle spielt die Wasserstofftechnologie, da sie die Nachteile eines Batterieantriebes nicht aufweist und hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und insbesondere der Reichweite dem Dieselantrieb ebenbürtig ist.

Anschließend werden die Merkmale für ein zukünftiges Regionalbahnfahrzeug herausgearbeitet. Zu diesen Merkmalen gehört es, dass der Nah- und Regionalverkehr zweifellos benutzerfreundlicher wird. Die Benutzerfreundlichkeit drückt sich durch einen einfachen, ungehinderten Zugang zum Fahrzeug, angemessene ergonomische Sitzverhältnisse, leichte Verteilung der Reisenden im Fahrzeug, verbesserte Mitnahmemöglichkeiten für Fahrräder und Gepäck und somit einen insgesamt attraktiveren Verkehr aus.

Unter diesen Randbedingungen lassen sich weitere, unkonventionelle Fahrzeugtypen ableiten, die gegenüber heutigen Fahrzeugen die o. g. Vorteile für die Benutzer aufweisen. Insbesondere kann aufgezeigt werden, dass die Verwendung von Fahrwerken mit kleinen Rädern Fahrzeugkonzepte ermöglichen, die nicht nur die Kapazität erhöhen, sondern auch den Verkehr für den Benutzer attraktiver machen.

Auf Basis von standardisierten Fahrzeugmodulen und der eingeführten Effizienzbetrachtung für Fahrzeuge können vier besonders effiziente Fahrzeugvarianten ermittelt werden.

Die hierbei aufgezeigten Möglichkeiten, Fahrzeuge auf Basis von Fahrwerken mit kleinen Rädern zu gestalten, zeigt Potential zur Kapazitätserweiterung auf hochbelasteten Strecken. Durch zusätzliche Sitzplatzkapazität bei gleichzeitiger Verbesserung der Nutzbarkeit für mobilitätseingeschränkte Fahrgäste und einen verbesserten Zugang zu den Fahrzeugen bzw. den Wechsel zwischen den Wagen eines Zuges, wird erheblicher Mehrwert für die Fahrgäste aufgezeigt.

Summary

The main objective is to analyse, which kind of vehicle concepts will be applied in Germany for commuter and regional trains of the future.

Based on different evaluation criteria, it was evaluated, which vehicle concepts show significant, conceptual advantages compared to others. Due to these evaluation criteria, a thesis was elaborated, that there is no evidence of a particular lightweight concept for rail vehicles that generates a special advantage in comparison to others. This thesis is proven, which means that the vehicle weight depends directly on transport capacity and specific optional equipment chosen by the vehicle buyer rather than on a vehicle concept with significant, conceptual lightweight design. To support that thesis, an efficiency factor was defined, which considers the mass per length, the transport capacity and the accessibility to achieve an overall evaluation. Individual weighing factors are defined as well. These factors can be defined for example in public quotes as per buyer's opinion to obtain an overall, independent view of the offered vehicles. The efficiency factor is used for the evaluation of future vehicle concepts for commuter and regional traffic.

Under consideration of the before mentioned results and an investigation on the changes of the rail infrastructure, the question on the future propulsion system will be answered. Beside the classic drive systems, fed by catenary or Diesel engine, new vehicle concepts based on battery- and/or fuel cells are considered as well. It can be shown, that only electrical traction will be used in the future, while combustion engines will not be used anymore. A special role plays the hydrogen-technology, as it does not show the disadvantages of battery driven vehicles, especially regarding performance and as it plays on the same level as Diesel drives with regard to the operational range.

Based on the above, the main elements of a future regional vehicle have been elaborated. A significant part of these main elements is that public commuter and regional traffic needs to become more user friendly. This user friendliness is expressed by an easy, barrier-free access into the vehicle, appropriate ergonomically seat arrangements, easy distribution of the passengers inside the cars, optimised baggage and bicycle transport so overall in a much more attractive regional traffic.

Using this framework, conventional and unconventional vehicle types have been investigated in detail, whether the main elements of the future attractive regional traffic can be realised. Especially the use of bogies with small wheel diameters provides new vehicle concepts which improve the capacity and at the same time improve the attractiveness for the passengers.

On the basis of standardised vehicle modules for direct comparison of vehicle concepts and the introduced method of efficiency evaluation of vehicle concepts, four vehicle variants with high efficiency have been elaborated.

The possibility to design vehicles using bogies with small wheel diameters shows significant potential to increase the capacity on high loaded lines of the rail network. Providing additional seat capacity without reducing the passenger comfort and at the same time providing a better accessibility and an easy change between cars of a train for passengers with restricted mobility provides additional value to give more attractive regional traffic in the future.

Inhalt

Zusammenfassung.....	3
Summary	4
1. Einleitung	8
1.1 Die zukünftige Entwicklung der Mobilität	8
1.2 Regionalverkehr.....	8
1.3 Zukünftige Verkehrsentwicklung.....	10
1.4 Fahrzeugkonzept	12
1.5 Anforderungen	12
1.5.1 Anforderungen und Betrachtungsmaßstäbe.....	12
1.5.2 Anforderungen der Aufgabenträger	16
2. Stand der Technik	17
2.1 Fahrzeugtypen des Nah- und Regionalverkehrs.....	17
2.2 Zugrundegelegte Kenngrößen der betrachteten Fahrzeugbaureihen	20
2.3 Analyse der aktuellen Fahrzeugkonzepte	25
2.3.1 Kapazitätsvergleich	26
2.3.2 Einstiegsverhältnisse.....	32
2.3.3 Differenzbetrachtung zu den Sitzplätzen.....	36
2.3.4 Bewertung der Fahrzeugkonzepte im Hinblick auf die Masse	37
2.3.5 Blick über die Landesgrenze zu anderen Fahrzeugkonzepten.....	50
3. Auswertung zum Stand der Technik	56
3.1 Effizienz.....	56
3.2 Effizienzbewertung.....	65
4. Infrastrukturelle Randbedingungen	67
4.1 Fahrzeugbegrenzungslinie	67
4.2 Zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit	70
4.3 Streckenklassen	71
4.4 Energieversorgung.....	72
4.5 Schnittstelle zum Bahnsteig.....	72
4.6 Signaltechnik.....	73
4.7 Zusammenfassung der infrastrukturseitigen Anforderungen.....	74
5. Antriebsausrüstungen.....	76
5.1 Varianten der Antriebstechnik	77
5.2 Masse und installierte Leistung.....	79
5.3 Fahrdynamische Eigenschaften	82
5.4 Triebwagen mit Traktionsbatterie.....	87

5.5	Zusammenfassung zu den Antriebsausrüstungen	89
6.	Zwischenstand zur Bestandsaufnahme bei aktuellen Fahrzeugen, Infrastruktur und Antriebstechnik.....	90
7.	Ableitung eines zukünftigen Regionalbahnfahrzeugs auf Basis konventioneller Fahrzeugkonzepte.....	91
7.1	Wirtschaftliche und verkehrliche Randbedingungen	91
7.2	Gesetzliche / normative Randbedingungen	92
7.3	Bausteine für ein Fahrzeuglayout.....	93
7.4	Zugrundegelegte Masse für die Betrachtung der Fahrzeugkonzepte.....	97
7.5	Vorbetrachtungen zum Layout.....	98
7.6	Ableitung von Fahrzeugkonzepten.....	100
7.6.1	Einstöckige Triebfahrzeuge	101
7.6.2	Doppelstöckige Wagen	105
7.6.3	Doppelstöckige Triebfahrzeuge	110
7.6.4	Kombinationen aus ein- und doppelstöckigen Fahrzeugen	114
7.7	Auswertung.....	117
8.	Ableitung eines zukünftigen Regionalbahnfahrzeugs auf Basis unkonventioneller Fahrzeugkonzepte.....	122
8.1	Vorbemerkungen.....	122
8.2	Fahrzeuge mit kleinen Rädern.....	122
8.2.1	Fahrzeugvarianten.....	122
8.2.2	Freigängigkeit im Bogen	125
8.2.3	Innenraumnutzbarkeit	127
8.2.4	Übertragung der Ergebnisse auf einen Triebzug.....	132
8.2.5	Antrieb für einen Triebzug mit kleinen Rädern.....	145
8.2.6	Betrachtungen zu den Radaufstandskräften	147
8.3	Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken	149
8.3.1	Einleitende Betrachtungen.....	149
8.3.2	Variantenuntersuchungen	151
8.3.3	Bewertung	154
8.4	Ergänzende Innenraumlays.....	154
8.4.1	Optimierung des Fahrgastflusses und Gepäcktransport.....	154
8.4.2	Fahrradtransport	156
8.5	Schlussfolgerungen.....	160
9.	Weitere Entwicklungen.....	161
9.1	Absehbare Trends.....	161
9.2	Weiterer Ausblick	162

10.	Zusammenfassung (Langversion)	163
11.	Summary (full version).....	166
12.	Abkürzungsverzeichnis	168
13.	Literaturquellenverzeichnis	170
14.	Herangezogene Normen und Richtlinien	174
15.	Abbildungsverzeichnis	175
16.	Anlagen	179
16.1	Übersicht zu den bezogenen Werten im Kapitel 2 und 3	179
16.2	Vollständige Tabellen zu den Untersuchungen in den Kapiteln 7.6.1 bis 7.6.4 ..	183
16.2.1	Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.1.....	183
16.2.2	Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.2.....	189
16.2.3	Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.3.....	202
16.2.4	Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.4.....	213
16.3	Übersicht der ermittelten Werte aus den Kapiteln 7.6.1 bis 7.6.4 sowie 8.2.4 ..	218
16.4	Rechenweg zur Vergleichsspannung gemäß Kapitel 8.2.6	222

1. Einleitung

1.1 Die zukünftige Entwicklung der Mobilität

Das 20. Jahrhundert ist im Verkehrswesen geprägt durch eine immer stärker zunehmende Mobilität der Menschen, sowohl im Alltag als auch im Ferienverkehr. Lag die Arbeitsstätte der Menschen bis zur Mitte des letzten Jahrhunderts noch in einer Entfernung, die entweder zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden konnte, so wuchsen mit der zunehmenden Verbreitung des Kraftfahrzeuges auch die Distanzen, die täglich zurückgelegt werden konnten. Entsprechend erfolgten dann die Urlaubsfahrten oder Wochenendausflüge ebenfalls mit dem Kraftfahrzeug. Einhergehend mit diesem wachsenden Mobilitätsbedürfnis wuchs auch das Straßennetz, sowohl durch zahlreiche neue Bundesstraßen und –autobahnen, aber auch innerorts durch die Schaffung von großzügig ausgebauten, mehrspurigen Verkehrswegen.

Für den gleichen Zeitraum lässt sich ein drastischer Rückgang des Verkehrsaufkommens auf der Schiene beobachten. Das Streckennetz schrumpfte, die Schienenanbindung von kleineren Orten in der Region wurde häufig aufgegeben. Mit der Bahn fuhren überwiegend nur noch die Menschen, die auf sie angewiesen waren (Schüler oder Menschen ohne Auto) und wenige Bahn-Enthusiasten.

Seit dem Jahrtausendwechsel gibt es einen sich umkehrenden Trend, auch wenn dieser immer noch schwach ausgeprägt ist. Bedingt durch den Klimawandel und die auch in der Öffentlichkeit verstandene Problematik der Luftverschmutzung, aber auch durch die zunehmenden Staus aufgrund der Überlastung des Straßennetzes, verstärkt sich die Nachfrage nach modernen, schienengebundenen Verkehrsmitteln im Fernverkehr, aber insbesondere im Nah- und Regionalverkehr.

Damit ist die Grundlage vorhanden, dass mit einer Verbesserung der Attraktivität des schienengebundenen Verkehrs, die Bahn als das in Bezug auf Ökologie aber auch Ökonomie bessere Verkehrsmittel auch in der täglichen Nutzung angenommen wird. Die Bahn wird nicht mehr genommen, weil man mit ihr fahren muss, sondern weil man mit ihr fahren will.

In diesem Sinne soll diese Arbeit dazu beitragen, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie der schienengebundene Nah- und Regionalverkehr für den Benutzer ebenso wie für den Betreiber attraktiver gestaltet werden kann.

1.2 Regionalverkehr

Gegenwärtig bewegen wir uns im Verkehrssektor in einem Spannungsfeld zwischen den Grenzen des Individualverkehrs aufgrund ökologischer Veränderungen, insbesondere durch den Klimawandel und den Wünschen der Nutzer nach einem zuverlässigen und komfortablen öffentlichen Verkehrsangebot. Der Trend zur Akzeptanz des öffentlichen Verkehrs ist erkennbar, was allein fehlt ist ein attraktives Angebot. Während das Transportbedürfnis in den Großstädten durch Fahrräder, Straßenbahnen, Busse sowie U- und S-Bahnen hinreichend gut abgedeckt ist, stellt der Pendlerverkehr aufgrund der derzeitigen Unzulänglichkeiten in Bedienungshäufigkeit und Kapazität noch keine vorbehaltlos angenommene Alternative zum motorisierten Individualverkehr dar. Die Frage, wie dieser Transportbedarf zukünftig besser befriedigt werden kann, ist der wesentliche Betrachtungsschwerpunkt dieser Arbeit. Betrachtet wird die zukünftige Entwicklung des schienengebundenen Nah- und Regionalverkehrs in Deutschland, basierend auf den Weichenstellungen der Vergangenheit und unter Einbeziehung der technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Entwicklungen, wie sie sich gegenwärtig abzeichnen. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Wirtschaftsgütern langsamer ablaufenden Veränderungsprozesse im Schienenverkehr ist eine solche Prognose, basierend auf den Entwicklungen der Vergangenheit, möglich.

Die Unterscheidung in Nah- und Regionalverkehr entspricht keiner klaren und in der Fachwelt eindeutigen Definition. Nach [82] ist *„die S-Bahn eine Schnellbahn, die überwiegend die Infrastruktur der Eisenbahn benutzt und im Linienbetrieb nach Taktfahrplan verkehrt. Als Fahrzeuge kommen in der Regel*

elektrische Triebwagen und mit Lokomotiven bespannte Wendezüge zum Einsatz“. [1] hingegen definiert die S-Bahn oder Stadtschnellbahn mit den folgenden Kriterien:

- zweckbezogene Fahrzeuge mit hoher Beschleunigung
- schnellem Fahrgastwechsel bei kurzen Haltezeiten an 960 mm hohen Bahnsteigen
- Haltestellenabstand zwischen rund 500 m und 4000 m und
- in der Regel eigenem Gleiskörper

und letztlich nach außen durch die Verwendung des weißen S-Bahn-Symbols auf grünem Grund. Diese beiden Definitionen haben sich weitgehend durchgesetzt.

Für den Regionalverkehr gibt es solch prägnante und eindeutige Definition nicht.

Nach [2] ist der Regionalverkehr durch eine zurückgelegte Entfernung von 50 km definiert, nach [82] handelt es sich um ein „*Verkehrsangebot in einer begrenzten Region*“.

Über die Frage, wer den Regionalverkehr überwiegend nutzt, kann man sich aber ebenfalls einer Definition annähern. Neben dem reinen Ausflugs- und Wochenendverkehr sind dies überwiegend Berufspendler und Schüler. Nach [12] legen 17 % der Erwerbstätigen eine einfache Wegstrecke von 25 km und 4 % von mindestens 50 km für den Weg zur Arbeit bei einer Fahrzeit von bis zu 60 min zurück. Diese Angaben korrelieren somit teilweise mit der Definition nach [2], gelten aber nicht nur für den schienengebundenen Personenverkehr, sondern für alle Mobilitätsformen.

Für diese Arbeit wird der Regionalverkehr folgendermaßen definiert: Regionalverkehr ist der schienengebundene Personenverkehr, der durch öffentliche Aufträge der 16 deutschen Bundesländer bestellt wird. Grundlage ist damit das 1993 beschlossene und seit 1996 geltende Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs in Deutschland im Zuge der Bahnreform.

Im Rahmen dieses Gesetzes haben die Bundesländer über die Gründung verschiedener Verkehrsverbände ein System geschaffen, um Verkehrsleistungen für bestimmte Strecken, Gebiete oder sogar ganze Bundesländer auszuschreiben und für begrenzte Zeiträume zu bestellen.

Die Ausschreibung von Verkehrsleistungen mit teilweise sehr spezifischen Anforderungen hat letztlich zu der großen Menge von unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Fahrzeugkonzepten geführt, auf die im weiteren Teil dieser Arbeit noch eingegangen wird. Diese Arbeit bezieht sich ausschließlich auf den Nah- und Regionalverkehr im Vollbahnbereich. Der schienengebundene Nahverkehr mit Straßenbahnen, Untergrundbahnen oder straßenbahnähnlichen Stadtbahnen ist nicht Teil der Betrachtung. Ebenso wenig wird auf die sog. Leichttriebwagen eingegangen, wie sie ab Mitte der 1990iger Jahre zur Anwendung kamen. Der Grund hierfür liegt in dem Umstand, dass diese Fahrzeuge nach einer kurzen Euphorie nur noch wenig Anwendung finden und eine deutschlandweite Zulassung durch die mittlerweile umfassend zur Anwendung kommende europäische Gesetzgebung praktisch nicht mehr möglich ist. Ein Stichwort sei hier nur z.B. die Erfüllung der Anforderungen nach EN 15227 für die Crash-Sicherheit von Fahrzeugen, die mit Leichttriebwagen praktisch nicht erfüllbar sind und wo ein Nachweis gleicher Sicherheit durch die kompensatorisch hohe Bremsverzögerung auch nur noch schwer darstellbar ist.

Weiterhin werden die Neigetechnik-Fahrzeuge des Regionalverkehrs in die folgenden Betrachtungen nicht einbezogen, weil sie als Folge der Neigetechnik nur auf wenigen Strecken sinnvoll einsetzbar sind und somit eine Verallgemeinerung für den zukünftigen Nah- und Regionalverkehr in Deutschland nicht möglich ist. Es handelt sich um ein Nischenprodukt mit Relevanz für wenige Regionen.

1.3 Zukünftige Verkehrsentwicklung

Für die Verkehrsentwicklung in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten gibt es die Erwartung, dass der schienengebundene Verkehr grundsätzlich zunehmen wird. Allerdings gibt es hierbei erhebliche Unsicherheiten in den Annahmen und den damit verbundenen Auswirkungen.

Neben der grundsätzlichen wirtschaftlichen Entwicklung des Landes sind folgende Aspekte von Bedeutung für die Entwicklung des Verkehrs und insbesondere für den Modal Split, also die Verteilung des Verkehrs auf öffentliche oder individuelle Verkehrsformen:

- Entwicklung der Energiekosten, insbesondere bei den fossilen Brennstoffen
- Ökologische Aspekte, wie Erderwärmung oder Feinstaubbelastung
- Steuerungspolitische Aspekte, wie PKW-Maut, Kfz-Steuer oder Kraftstoffbesteuerung oder der teilweise geforderte kostenfreier ÖPNV in Ballungsräumen

Allein aus diesen drei genannten Aspekten heraus sind Prognosen zur Verkehrsentwicklung grundsätzlich schwierig.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist aber die Angebotsseite des öffentlichen Verkehrs. Verschiedene Regionen (beispielhaft sei hier nur der Raum Karlsruhe mit den Zweisystemfahrzeugen auf Basis von Straßenbahnen genannt) haben bereits deutlich gemacht, dass eine häufige Bedienung mit attraktiven Fahrzeugen bei gut geplanter Vernetzung oder gar die Bereitstellung umsteigefreier Verkehre einen ganz erheblichen Einfluss auf die Mobilitätsentscheidung der Menschen hat. In diesen Fällen ist wichtig, dass die Fahrgäste den öffentlichen Verkehr nutzen wollen und nicht bloß nutzen müssen.

Abbildung 1-1 zeigt die Anteile der einzelnen Verkehrsträger in den Jahren 2014 und 2016 in Deutschland nach [94].

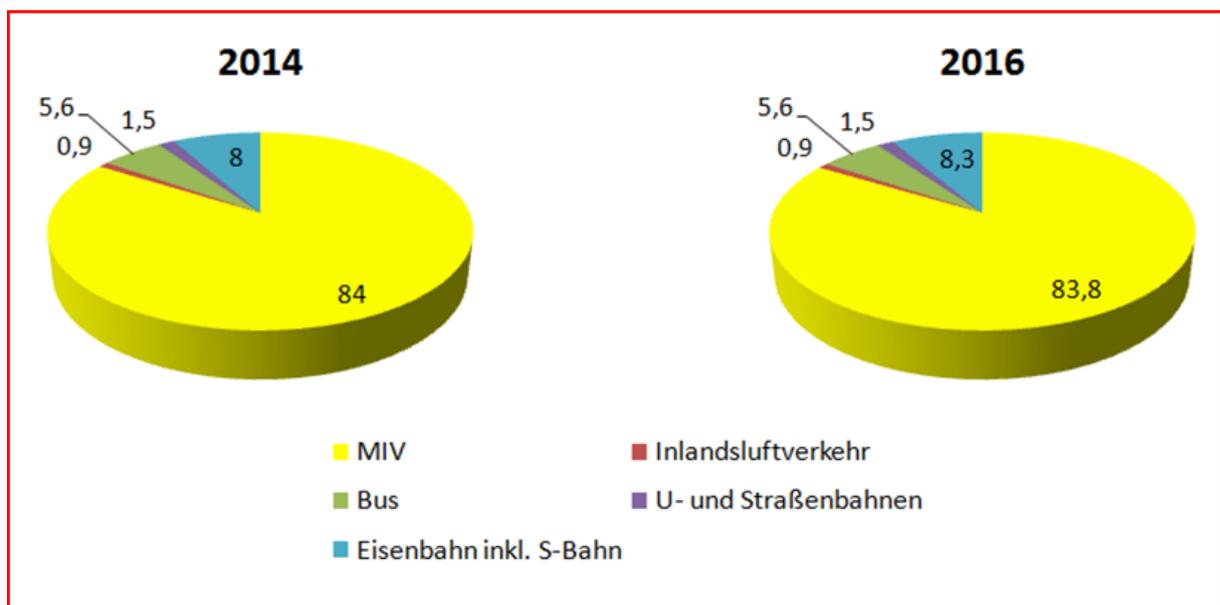


Abb.1-1: Anteile der Verkehrsträger am Personenverkehr in Prozent; Quelle: Internet-Veröffentlichung von „Allianz pro Schiene“ [94]

Erkennbar ist eine nur geringfügige Veränderung zugunsten der Schiene, wobei beachtet werden muss, dass die Verkehrsleistung insgesamt zwischen beiden Jahren gestiegen ist und somit die Verringerung des Anteils beim motorisierten Individualverkehr (MIV) noch keine deutliche Trendwende darstellt. Außerdem fehlen bei dieser Betrachtung die Anteile, die zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurückgelegt werden.

Betrachtet man die Daten ausschließlich für den schienengebundenen Nahverkehr in Deutschland, so stellt sich die Situation nach [100] gemäß Abbildung 1-2 dar. Dort ist eine Zunahme sowohl der

Fahrgastzahlen als auch der Verkehrsleistung zu erkennen. Die Fahrgastzahlen haben demnach zwischen 2005 und 2017, genauso wie die Verkehrsleistung um rund 33 % zugenommen.

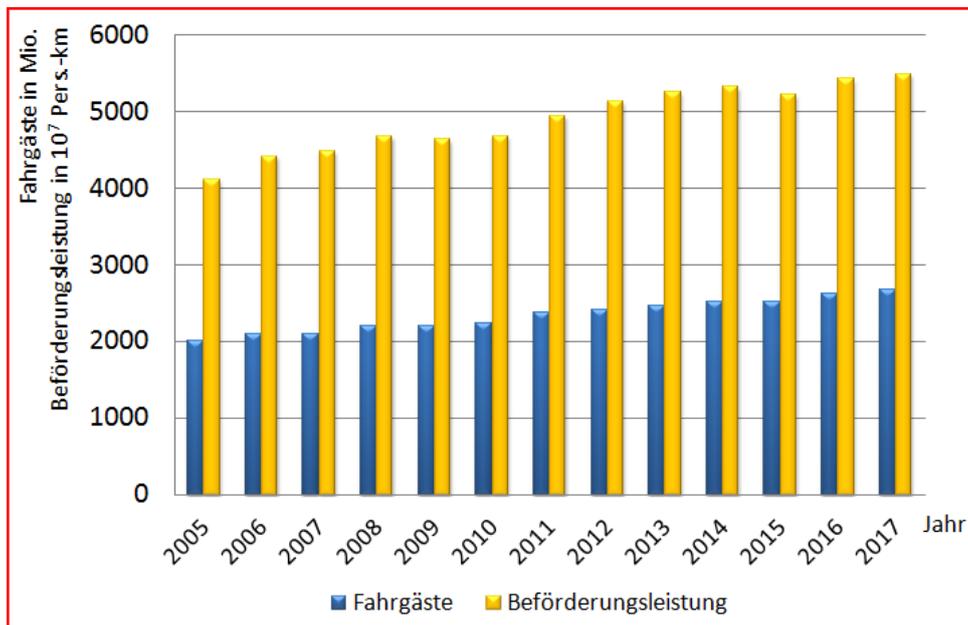


Abb.1-2: Entwicklung der Fahrgastzahlen und der Verkehrsleistung des SPNV in Deutschland [100]

Noch deutlicher sieht die Entwicklung nach [95] aus. Hierbei wird die Verkehrsentwicklung im Bundesland Nordrhein-Westfalen (NRW) betrachtet. Die Verkehrsleistung ist hierbei im Zeitraum von 1999 bis 2012 sogar um 85 % gestiegen, wobei gleichzeitig das Verkehrsangebot nur um 36 % angestiegen ist (siehe Abb. 1-3).

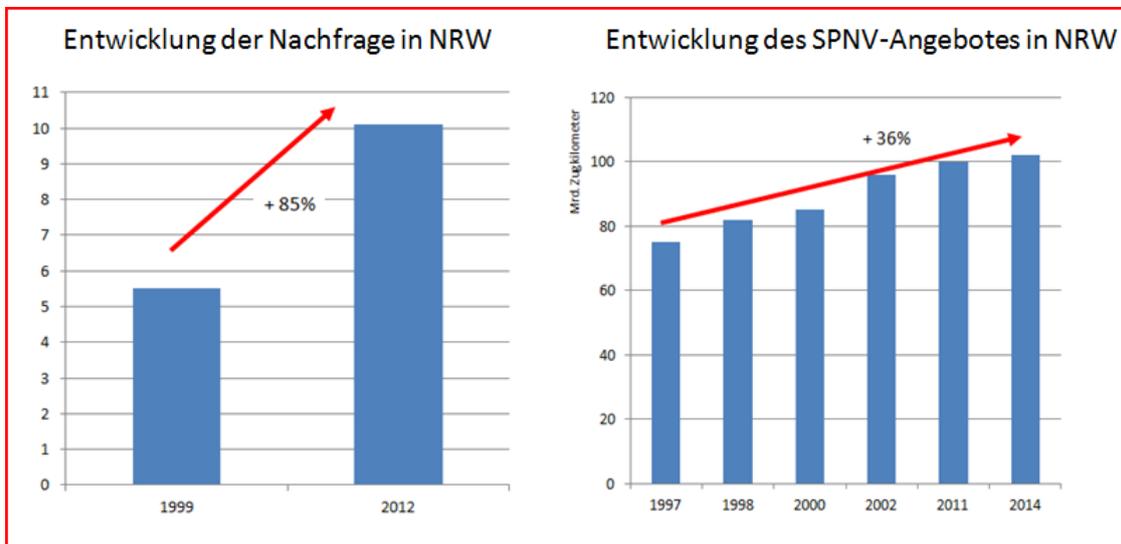


Abb.1-3: Nachfrage- und Angebotsentwicklung in NRW für den SPNV; Darstellung in Anlehnung an [95]

In [95] wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass diese Entwicklung nicht für den gesamten Bereich des SPNV gilt, sondern hier einzelne Strecken besonders von der hohen Nachfrage profitieren. Als zukünftige Nachfrageschwerpunkte bis zum Jahr 2030 werden dabei die Relationen Essen - Mülheim, Duisburg – Düsseldorf und Köln – Aachen mit weiteren Zuwächsen zwischen 9 und 21 % gesehen, wobei darauf hingewiesen wird, dass die erwartete Nachfrage durch die heute vorhandene Infrastruktur nicht abgedeckt werden kann.

Somit kann abgeleitet werden, dass es keinen allgemeinen, homogenen Zuwachs für den schienengebundenen Nah- und Regionalverkehr geben wird. Stattdessen wird es Strecken geben, auf denen das Verkehrsaufkommen stark wachsen wird, während weiterhin Strecken verbleiben, wo nur der Betrieb mit kleinen, kostengünstigen Fahrzeugen zu einer befriedigenden Wirtschaftlichkeit führen wird. Die heute bekannte Spanne zwischen kleinen Dieseltriebwagen und großen, doppelstöckigen Triebzügen bleibt also bestehen.

Der Trend zu mehr schienengebundenem Verkehr bei Schaffung eines entsprechenden Angebotes ist aber ebenso eindeutig aus dem Verlauf der letzten Jahre ableitbar.

1.4 Fahrzeugkonzept

Ein wesentlicher Teil der Arbeit ist der Auswahl eines geeigneten Fahrzeugkonzeptes gewidmet. Daher wird an dieser Stelle der Begriff des Fahrzeugkonzeptes im Sinne dieser Arbeit definiert. Das Fahrzeugkonzept ist der grundlegende Entwurf, wie der Fahrgastraum und die wesentlichen, zur Erfüllung der Transportaufgabe benötigten technischen Einrichtungen innerhalb eines Fahrzeugs angeordnet werden. Das Fahrzeug kann dabei aus mehreren, in der Regel betrieblich nicht trennbaren, miteinander verbundenen Wagen bestehen.

Die möglichst sinnvolle Anordnung und Aufteilung von z.B. Fahrwerken, Türen oder Fahrgastraumbereichen ist somit integraler Bestandteil eines Fahrzeugkonzeptes, die Auswahl des Wagenkastenmaterials (Stahl oder Aluminium) hingegen nicht oder nur dann, wenn eines von beiden Materialien z.B. einen Einfluss auf die zuvor genannten Bereiche hat. Die Verwendung von Ausstattungsoptionen wie WLAN oder Informationsdisplays ist hingegen nicht relevant für ein Fahrzeugkonzept.

1.5 Anforderungen

1.5.1 Anforderungen und Betrachtungsmaßstäbe

Die wesentliche Frage dieser Arbeit nach einem zukünftigen Fahrzeugkonzept kann nur umfassend beantwortet werden, wenn die Kriterien für eine Bewertung beschrieben sind. Die Kriterien sind aber nicht klar definiert, sondern variieren je nach Betrachtungswinkel. Dabei gibt es die folgenden acht direkt betroffenen Interessengruppen mit ihren jeweils eigenen Bewertungsmaßstäben:

- I. Fahrgäste, die den Regionalverkehr mehr oder minder regelmäßig nutzen und dabei zuverlässig, komfortabel und sicher reisen wollen,
- II. Aufgabenträger im Auftrag der jeweiligen Landesverkehrsministerien mit Schnittstellen zu Bundesministerien und Regionalbehörden, die auf Basis von langfristigen Planungen den Bedarf für Regionalverkehr erfassen und die Verkehrsströme sinnvoll lenken müssen,
- III. Landesregierungen, die die Zuteilung der finanziellen Mittel für vielfältigste Anwendungen, nicht nur im Verkehrsbereich, verantworten,
- IV. Betreiber, die auf der Basis von Verkehrsverträgen eine bestimmte Verkehrsleistung zuverlässig und im geplanten Kostenrahmen erbringen müssen,
- V. Wartungsfirmen (sofern nicht identisch mit dem Betreiber), die die Fahrzeuge mit möglichst geringem Zeit- und Kostenaufwand instandhalten müssen,
- VI. Netzbetreiber, denen die Infrastruktur gehört, welche durch den Bahnverkehr aber möglichst wenig abgenutzt werden soll,
- VII. Anwohner entlang der Bahnanlagen, die möglicherweise den Regionalverkehr nicht einmal nutzen wollen, von ihm aber durch vielfältige Emissionen (Geräuschentwicklung, Schwingungen, Abgase) beeinträchtigt werden
- VIII. und nicht zuletzt die Fahrzeugindustrie, die ein möglichst gut passendes, billiges, effizientes und zuverlässiges Fahrzeug liefern soll, damit alle diese einzelnen Interessengruppen zufrieden sind.

Der Vollständigkeit halber müsste die Gruppe der Fahrgäste nochmal in weitere Interessengruppen unterteilt werden, denn allein schon die Interessen von mobilitätseingeschränkten und nicht-mobilitätseingeschränkten Fahrgästen unterscheiden sich teilweise erheblich.

Nicht notwendigerweise müssen hier diametrale Interessenkonflikte vorliegen, es ist jedoch schwer, alle sich damit ergebenden Anforderungen mit einem Fahrzeug abdecken zu wollen. Während beispielsweise alle acht Interessengruppen der unspezifischen Anforderung „ein Fahrzeug soll möglichst leise sein“ zweifelsohne zustimmen würden, birgt die Frage nach dem Sitzkomfort schon Konfliktpotential. Ein Fahrgast möchte unbestritten ergonomische Sitze mit viel Beinfreiheit und Platz zum Nachbarn haben (ergänzt um freies WLAN und Lademöglichkeiten für Laptop oder Mobilfunkgerät), während der Betreiber möglichst viele Fahrgäste mit wenig Wagen transportieren will, so dass der Komfort hier tendenziell geringer ist. Abb. 1-4 visualisiert diese Interessenanteile, ohne hierbei jedoch schon eine inhaltliche Aussage zu möglichen Überschneidungen der Interessen vorzunehmen.

Daher gilt es, die grundlegenden Anforderungen genauer zu spezifizieren, um auf dieser Grundlage technisch umsetzbare Anforderungen zu definieren, an denen sich ein zukünftiges Fahrzeugkonzept messen lassen muss.



Abb.1-4: Interessenanteile an einem Fahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit würde es zu weit führen, alle Interessenanteile aufzuzählen und diese in eine Anforderungsspezifikation zu überführen, denn diese acht Interessengruppen unterscheiden sich auch noch je nach Bundesland in ihrer Ausprägung und Gewichtung. Eine qualitative Gegenüberstellung der Interessen und ihrer Bedeutung für die einzelnen Interessengruppen ist hingegen grundsätzlich möglich und Tabelle 1-1 zu entnehmen. Hierbei werden einzelne Kriterien den übergreifenden Zielen „Befriedigung des Transportbedürfnisses“, „Energie- und Umweltpolitik“ und „Wirtschaftlichkeit“ zugeordnet und deren Wichtigkeit für die jeweilige Interessengruppe von „wichtig“ über „neutral“ bis „unwichtig“ dargestellt.

Gleiche Wichtigkeit bedeutet aber nicht, dass es einen Konsens dahingehend gibt, welche einzelne Eigenschaft als richtig angesehen wird. Das obige Beispiel zum Sitzkomfort lässt sich für jedes Kriterium, je nach Sichtweise völlig anders bewerten. Darüber hinaus wird kein Kriterium von allen Interessengruppen als wichtig angesehen.

Qualitative Bewertung der übergeordneten Ziele „Befriedigung des Transportbedürfnisses“, „Energie- und Umweltpolitik“ und „Wirtschaftlichkeit“ durch detaillierte Kriterien nach Interessengruppe von

- + wichtig
- +/o tendenziell wichtig
- o neutral
- o/- tendenziell unwichtig
- unwichtig

Farblich hervorgehoben sind Interessen, die wichtig oder tendenziell wichtig sind.

Kriterium	Interessengruppe							
	Fahrgäste	Anwohner	Landesregierung	Aufgabenträger	Fahrzeugbetreiber	Netzbetreiber	Wartungsbetrieb	Fahrzeugindustrie
Befriedigung des Beförderungsbedürfnisses								
Beförderungskapazität	+	-	+	+	+	-	-	+
Sitzplätze	+	-	o	+	+	-	-	+
Einstiege	+	-	o	+	o	-	-	o
Gepäck- und Fahrradtransport	+	-	+	+	o	-	-	o
Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	+	-	+/o	+	+	+/o	+	+
Energie- und umweltpolitische Aspekte								
Umwelt	+/o	+	+	o/+	o	-	-	+
Geräusche	+	+	+	o/+	+	-	-	+
Schwingungen	+	+	+	o/+	o	+	-	+
Abgase	+/o	+	+	o/+	o/+	-	-	+
Energie	o/-	o/+	+	+	+	+	-	+
Geschwindigkeit	+	+	-	o/+	-	o	-	+
Beschleunigung	o	+	-	-	-	o	-	+
Masse	-	-	-	-	o	+	-	+
Wirtschaftlichkeit								
LCC	-	-	-	+	+	-	+	+
Streckenbelastung	-	+	-	-	o	+	-	o
Beschaffungskosten	-	-	+	+	+	-	-	+
Wartungs-/ Unterhaltungsaufwand	-	-	-	+	+	+	+	+/o

Tab.1-1: Qualitative Betrachtung der Wichtigkeit der Kriterien an die Fahrzeuge des Regionalverkehrs ohne Gewichtung nach Interessengruppen

Keines der Kriterien führt zu einem bestimmten Fahrzeugkonzept, sondern alle Kriterien sind allgemeingültig und universell. Ohne einzelnen Interessengruppen zu nahe zu treten, kann man postulieren, dass die Wichtigkeit der Kriterien davon abhängt, wie wirtschaftliche Beziehungen zueinander existieren. Die Tatsache, dass die Fahrzeugindustrie jedem Kriterium eine hohe Wichtigkeit zubilligt, hat ausschließlich mit der Erfüllung der Anforderungen im Rahmen einer Ausschreibung zu tun. Die Fahrzeugindustrie hat also nicht das Transportbedürfnis des Fahrgastes im Blick, sondern reagiert ausschließlich auf die Anforderungen des Bestellers, also der Landesregierung und dem von ihr beauftragten Aufgabenträger. Fahrzeugbetreiber, Netzbetreiber und Wartungsbetrieb haben ähnliche Interessenlagen, denn es geht ausschließlich um die gewinnbringende Erfüllung des Verkehrsvertrages, was nicht verwerflich ist, aber die Schwierigkeit aufzeigt, allgemeingültige und klare Anforderungen zu formulieren.

Das Ziel ist es also, die Bewertungskriterien des Aufgabenträgers zu erfüllen, wobei dieser, durch politische Vorgaben, bis zu einem gewissen Grade die Interessen der Fahrgäste und Anwohner abdeckt, aber sicher nicht in allen Fällen vollständig freiwillig.

Die Wirtschaftlichkeit des Betriebes hängt zunächst von der Konkurrenzsituation zum Zeitpunkt der Verkehrsausschreibung und der jeweiligen Kalkulation der Handelnden ab, jedoch nur nachrangig vom Fahrzeugkonzept. Zwei Fahrzeuganbieter aus zwei verschiedenen Lieferländern werden durch die individuelle Kostensituation ein identisches Fahrzeugkonzept nicht zum gleichen Preis anbieten können. Eine große Wartungsfirma wird durch entsprechende kommerzielle Rahmenverträge die Ersatzteile zu anderen Konditionen beschaffen können, als eine kleine Firma. Damit entfällt im Rahmen dieser Arbeit aber hier eine verlässliche Betrachtungsgrundlage zur monetären Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugkonzeptes. Sehr wohl kann jedoch die Komplexität von verschiedenen Konzepten betrachtet und bewertet werden.

Für die Kriterien zum Ziel „Energie- und Umweltpolitik“ gibt es einschlägige Gesetze und Vorschriften, die zugrundegelegt werden können, deren weitere Verschärfung in den nächsten Jahren aber zu erwarten ist. Vorrangig kann hier trotzdem der Leichtbau als Bewertungsmaßstab herangezogen werden, denn je leichter ein Fahrzeug ist, desto besser können Kriterien wie Emissionen, Energieverbrauch oder Beschleunigung erreicht werden. Insofern ist dies ein zentraler Untersuchungspunkt, aber auch bei der Betrachtung der Antriebskonzepte wird auf die Erfüllung dieser Kriterien eingegangen.

Damit liegt zunächst bei den weiteren Betrachtungen der Fokus dieser Arbeit auf der Befriedigung des Transportbedürfnisses mittels masseffizienter Fahrzeugkonzepte. Welche Fahrzeugkonzepte erlauben den Transport möglichst vieler Fahrgäste bei angemessenem Komfort, welche Konzepte unterstützen die zukünftigen energie- und umweltpolitischen Belange besser als andere und wie lassen sich beide Bereiche miteinander kombinieren?

Somit lassen sich für eine generelle Betrachtung von Fahrzeugkonzepten folgende Fragestellungen formulieren, deren Antworten im Rahmen einer Analyse zur Anforderungserfüllung als Maßstab herangezogen werden können und die trotzdem, je nach Interessenlage, bei entsprechender Gewichtung, eine universelle Anwendbarkeit ermöglichen:

- a. Unterstützt das Konzept nachhaltigen Leichtbau zum Zwecke des effizienten Ressourceneinsatzes?
- b. Bietet das Konzept bei gleichen Randbedingungen eine größere Nutzfläche?
- c. Bedeutet das Konzept eine Steigerung der Attraktivität des Schienenpersonenverkehrs?
- d. Kann das Konzept dazu beitragen, die örtlich entstehenden Emissionen (Schall, Schwingungen, Abgase) zu verringern?

Diese Fragestellungen werden in den folgenden Kapiteln des vorliegenden Dokuments untersucht.

1.5.2 Anforderungen der Aufgabenträger

Für die Besteller der Verkehrsleistung gibt es keinen allgemeingültigen Anforderungskatalog. Jeder Verkehrsverbund verfolgt sein eigenes Konzept und hat eigene Präferenzen für die Anforderungen an die zu beschaffenden Fahrzeuge. Allerdings sind in [90] wesentliche zu berücksichtigende Merkmale benannt, die je nach individuellen Erfordernissen durch den Besteller weiter zu detaillieren sind. An erster Stelle steht natürlich die Einhaltung der Zulassungsanforderungen, insbesondere auf die Anwendung von technischen Spezifikationen zur Interoperabilität (TSI) wird dabei verwiesen. Nachfolgend werden die in [90] explizit genannten, konzeptbeeinflussenden Werte für Regionalbahnfahrzeuge aufgelistet:

Eigenschaft	Vorgegebener Wert	Kapitel aus [90]
Besetzungsquote	15-20 % der Fahrgäste dürfen maximal 15 min. stehen	4.2
Anzahl der Türen	Zwei Türen (vier Türen) pro Fahrzeugseite	5.4
Lichte Türhöhe	2.100 mm (1.950 mm bei Doppelstockwagen)	5.4.1
Breite einer Türspur	650 mm	5.4.1
Lichte Türbreite	1.300 mm (zweispurige Tür) 1.850 mm (dreispurige Tür)	5.4.1
Anzahl der Türspuren	Üblicherweise 20 bis 35 Sitzplätze pro Türspur	5.4
Durchgangsbreite im Wagenübergang	mindestens 550 mm	8.1
Mindestgangbreite	450 mm auf Fußbodenhöhe 550 mm ab 1000 mm über FOK 800 mm für Rollstuhlfahrer	8.2
Sitzbreite	450 mm	8.4
Vis-à-vis-Sitzteiler	1.750 mm	8.4
Sitzteiler bei Reihenbestuhlung	800 mm	8.4
Anteil vis-à-vis-Sitze	mindestens 25 %	8.4
Anteil Festsitze je Fahrtrichtung	mindestens 40 %	8.4

Tab.1-2: vorgegebene Parameter nach [90] für Fahrzeugmindestanforderungen

2. Stand der Technik

Der Nah- und Regionalverkehr in Deutschland ist über einen langen Zeitraum mit einem einheitlichen Fahrzeugkonzept bedient worden, dem lokomotiv-bespannten Zug. Unterschiede gab es lediglich in der Leistungsfähigkeit der Lokomotive und der Größe und Anzahl der mitgeführten Wagen. Während in den Ballungsräumen überwiegend vierachsige Abteil- oder Durchgangswagen verwendet wurden, waren es im ländlichen Raum überwiegend zweiachsige Wagen, häufig ergänzt um Gepäckwagen. Nach dem ersten Weltkrieg hielten dann langsam Triebwagen Einzug, bis nach dem zweiten Weltkrieg die großen Stilllegungswellen bei den Regionalbahnen begannen. In vielen Fällen konnten die Stilllegungen durch den Einsatz von Schienenbussen jedoch verzögert oder sogar gänzlich vermieden werden.

In diese Zeit fällt die Einführung langer Regionalbahnwagen in der heute noch üblichen Länge von 26,4 m sowie teilweise auch von Doppelstockwagen. In einzelnen Ballungsräumen wurden die ersten elektrischen Triebwagen, optimiert für den Berufspendler-Verkehr wie z.B. die Baureihen ET 30 und ET 56, eingesetzt.

Im S-Bahn-Verkehr tat sich bis zu den Olympischen Spielen im Jahr 1972 wenig. Erst damals wurden die ersten Triebwagen der BR 420 verwendet und später in großen Stückzahlen gebaut. Die Gleichstrom-S-Bahn-Netze in Hamburg und Berlin mussten weiter über einen langen Zeitraum mit dem Vorkriegswagenmaterial, nur geringfügig ergänzt um die BR 472 in Hamburg, vorlieb nehmen.

Der nächste Entwicklungsschub mit einer Vielzahl von neuen Fahrzeugtypen kam erst mit der Regionalisierung in den 1990iger Jahren.

Aber auch dieser Entwicklungssprung ist jetzt schon wieder fast 30 Jahre her und so setzt diese Arbeit auf dem maßgeblich durch die Regionalisierung betriebenen Entwicklungssprung auf. Die heute in Deutschland eingesetzten Fahrzeuge des Nah- und Regionalverkehrs beruhen auf den in den 1990iger Jahren entwickelten Fahrzeugkonzepten, auch wenn technisch seit dieser Zeit viele Veränderungen eingeführt wurden, wie z.B. die GTO- und IGBT-Stromrichter.

2.1 Fahrzeugtypen des Nah- und Regionalverkehrs

Während im S-Bahn Verkehr ausschließlich elektrische Triebfahrzeuge zum Einsatz kommen (wenn man z.B. die vom Marketing inspirierte Benennung der regionalen Breisgau-S-Bahn mit Dieseltriebwagen hier außer Acht lässt), werden im Regionalverkehr neben den reinen Elektrotriebwagen auch Brennkrafttriebwagen (weitgehend konventionelle Dieseltriebwagen) sowie seit kurzem auch Brennstoffzellen-Triebwagen und neuerdings auch Fahrzeuge mit zusätzlichen Batterien für fahrdrahtunabhängigen Verkehr eingesetzt. Hinzu kommen sowohl im S-Bahn- als auch im Regionalbereich weiterhin Lokomotiv-bespannte Züge mit ein- und doppelstöckigen Wagen. Daraus ergibt sich eine Vielzahl von gegenwärtig verwendeten Fahrzeugkonzepten gemäß Abb. 2-1:

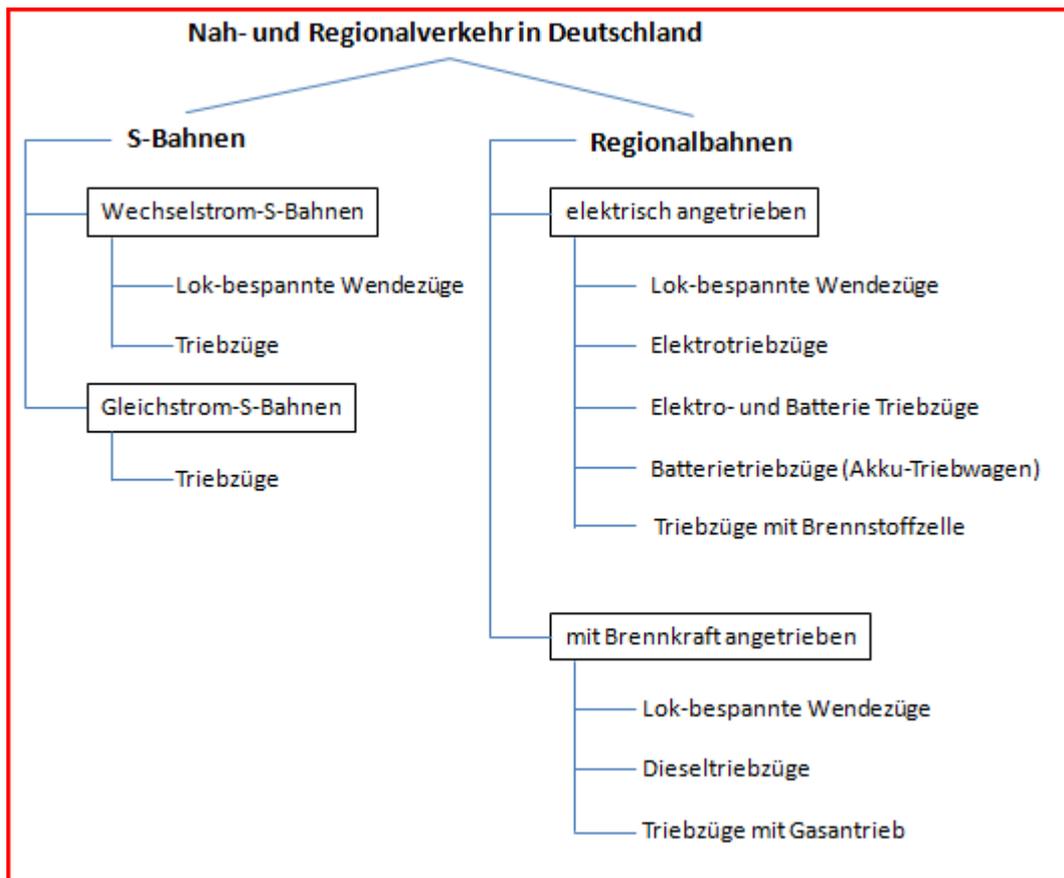


Abb.2-1: Übersicht der Fahrzeuggattungen des schienengebundenen Nah- und Regionalverkehrs in Deutschland

Die vier Hauptgattungen der Nah- und Regionalverkehrsfahrzeuge entsprechend Abb. 2-1

- Wechselstrom-S-Bahnen
- Gleichstrom-S-Bahnen
- elektrisch angetriebene Regionalbahnen sowie
- mit Brennkraft angetriebene Regionalbahnen

werden in den Tabellen 2-1 bis 2-5 gelistet und mit Blick auf das Fahrzeugkonzept und ihren Beitrag zur Transportleistung mit ihren wesentlichen Parametern verglichen.

Als für die grundsätzliche Fahrzeugkonzeption markanten Daten werden zunächst verglichen:

- Länge
- Kapazität
- Einstiegsverhältnisse
- Sitzteiler
- Türspuren
- Einstiegshöhe und
- Höchstgeschwindigkeit

Den Unterschieden und Gemeinsamkeiten bei der Energieversorgung, den Traktionsarten und der Beschleunigung ist ein eigenes Kapitel gewidmet.

Anmerkung: Der überwiegende Teil der hier aufgeführten technischen Fahrzeugdaten entstammt den Produktdatenblättern der einzelnen Hersteller. Diese werden hier nicht einzeln referenziert, da die Hersteller auf den Datenblättern keine Dokumentennummern oder Ausgabestände vermerkt haben. Lediglich Daten, die der Fachliteratur entnommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet und finden sich im Literaturverzeichnis wieder.

Einzelne Werte für die Dienstmasse von Fahrzeugen wurden, da sie nicht vorliegen bzw. trotz Anfrage bei den Herstellern nicht beschaffbar waren, geschätzt. Diese geschätzten Werte in den Tabellen 2-1

bis 2-5 sowie 2-7.1 und 2-7.2 sind kursiv geschrieben und zusätzlich mit einem () gekennzeichnet. Sie wurden dann aus vergleichbaren Fahrzeugen gleicher Bauart abgeleitet.*

Aufgrund der Besonderheiten bei der Zugbildung von S-Bahnen werden die Daten für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeuggröße betrachtet. Dies ist letztlich jedoch nur für die Baureihen 481 und 485 der Berliner S-Bahn relevant, da diese durch das sog. Viertelzugkonzept nur in Doppeltraktion eingesetzt werden können.

Bei den Fahrzeugkonzepten mit Wagen und Lokomotive werden die Daten für die häufigste Konfiguration mit drei und mit fünf Wagen für die Betrachtungen herangezogen, sofern es nicht eine festdefinierte Konfiguration gibt.

Auf eine weitere Normierung bezüglich einer maximal betrieblich einsetzbaren Fahrzeugkonfiguration wurde verzichtet. Allerdings ist die Mehrfachtraktion bei einigen Fahrzeugen auf maximal vier Einheiten begrenzt, teilweise sind es aber auch lokale Besonderheiten, wie z.B. die Bahnsteiglänge, die die Fahrzeuglänge beeinflusst. Diese Spezifika bringen für eine Untersuchung konzeptioneller Art an dieser Stelle aber keinen weiteren Nutzen, sodass darauf verzichtet wird.

Die Hauptfrage, die hier zunächst untersucht wird, ist, ob es signifikante Unterschiede zwischen den Fahrzeugkonzepten gibt, welche einen Einfluss auf die Transportleistung oder die Einsatzbarkeit im Nah- und Regionalverkehr entsprechend der Vorbetrachtungen im Kapitel 1 dieser Arbeit haben.

2.2 Zugrundegelegte Kenngrößen der betrachteten Fahrzeugbaureihen

Lfd. Nr.	Bauart/Baureihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatzkapazität	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegshöhe in mm	Anzahl FGR-Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Türspuren pro Fzg.-Seite	Sitzteiler in mm	Dienstmasse in t	Max. Radsatzlast in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Einsatzgebiet
1.1	480	36,8	96	196	1.100	6	12	1.700	60	-	100	ohne	Doppeltriebwagen	Berlin
1.2	481/482	73,6	188	400	1.000	12	24	1.700 1.850	118	11,7	100	ohne	Zwei-Wagen-Zug nur als Vier-Wagen-Zug betrieblich nutzbar	Berlin
1.3	483 (2-teilig)	36,8	80	188	1.000	6	12	-	62*	13,5	100	ohne	Doppeltriebwagen; Klimaanlage	Berlin
1.4	484 (4-teilig)	73,6	184	404	1.000	12	24	-	121*	13,5	100	ohne	Klimaanlage	Berlin
1.5	485/885	72,4	200	408	1.120	16	32	1.630	120	-	90	ohne	Zwei-Wagen-Zug nur als Vier-Wagen-Zug betrieblich nutzbar	Berlin
2.1	472/473	65,82	196	304	1.120	11	22	1.594 1.735	114,4	-	100	ohne	Dreiteiliger Triebzug ohne Wagenübergänge	Hamburg
2.2	474/874	66	208	303	1.020	9	18	1.700	100	-	100	ohne	Einsystemfahrzeuge	Hamburg
2.3	474/874	66	208	303	1.020	9	18	1.700	106	-	100	ohne	Zweisystemfahrzeuge	Hamburg
2.4	490/1490	66	190	279	990	9	18	1.700	127,2	16	100	ohne	Klimaanlage; Einsystemfahrzeuge	Hamburg
2.5	490/1490	66	190	279	990	9	18	1.700	133,8	16	140	ohne	Klimaanlage; Zweisystemfahrzeuge	Hamburg

Tabelle 2-1: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter aktueller Gleichstrom-S-Bahn Baureihen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

Lfd. Nr.	Bauart/ Bau-reihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatz-kapazität*	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegs-höhe in mm	Anzahl FGR-Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Tür-spuren	Sitzteiler in mm	Dienst-masse in t	Max. Radsatz-last in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Vorwiegende Einsatz-gebiete
3.1	420 [19]	67,4	194	264	1.030	12	24	1.650	154	16,4	120	ohne	einstöckig	Frankfurt, München, Stuttgart
3.2	422 [22]	69,43	192	340	995	12	24	1.650	112	18	140	ohne	Klimaanlage	Rhein-Ruhr
3.3	423 [21]	67,4	192	352	995	12	24	1.650	105	18	140	ohne	Klimaanlage	München
3.4	424	67,5	206	246	798	8	16	1.650	113,3	18	140	ohne	Klimaanlage	Hannover
3.5	430 [18]	68,3	184	310	1.030	12	24	1.650	118,8	18,1	140	ohne	Klimaanlage	Frankfurt, Stuttgart
3.6	442	72,3	221	247	800	6	12	1.770, 1.700 850	135	18	160	1 U-WC	Klimaanlage	Nürnberg
3.7	1442 (3-teilig)	56,2	150	191	600	4	8	1.740, 1.830 820, 1.900	107	18	160	1 U-WC	Klimaanlage	Leipzig
3.8	1442 (4-teilig)	72,3	200	243	600	6	12	1.740, 1.830 820, 1.900	135	18	160	1 U-WC 1 S-WC	Klimaanlage	Leipzig
3.9	1442 (5-teilig)	88,4	287	275	380 600	5	10	1.765, 1.780 1.830, 815 1.950	163,5	18	160	U-WC S-WC	Klimaanlage	Rostock
3.10	Lok plus 3 Do-Wagen	99,77	327	385	600 1.150	6	16	1.780, 840, 890, 1.800	83+146 = 229	20,8/18	140	3 S-WC	4-teiliger Zug mit Lok BR 146.1 und je einem 765.5DBpbzf, 758DABpz und 752DBpz	z.B. Dresden
3.11	Lok plus 5 Do-Wagen	153,37	563	630	600 1.150	10	24	1.780, 840, 890, 1.800	83+240 = 323	20,8/18	140	5 S-WC	6-teiliger Zug mit Lok BR 146.1 und einem 765.5DBpbzf und je zwei 758DABpz und 752DBpz	z.B. Dresden
3.12	Lok plus 3 x-Wagen [3], [4], [23]	91,01	222	319	1.000	9	18	1.700	83+86,7 = 169,7	20,8/16	140	2 S-WC	4-teiliger Zug mit Lok BR 111 und je einem Bx, ABx und Bxf-Wagen	Nürnberg, Rhein-Ruhr
3.13	Lok plus 3 x-Wagen [3], [4], [23]	140,01	382	533	1.000	15	30	1.700	83+142,7 = 225,7	20,8/16	140	2 S-WC	6-teiliger Zug mit Lok BR 111 und zwei Bx, zwei ABx und einem Bxf-Wagen	Nürnberg, Rhein-Ruhr

Tabelle 2-2: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter aktueller Wechselstrom-S-Bahn Baureihen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

Lfd. Nr.	Bauart/ Bau-reihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatz-kapazität	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegs-höhe in mm	Anzahl FGR-Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Tür-spuren	Sitzteiler in mm	Dienst-masse in t	Max. Radsatz-last in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Vorwiegendes Ein-satzgebiet
4.1	ET 425 [21]	67,5	206	228	798	8	16	1.650	113,3	18	160	1 U-WC	einstöckig	diverse
4.2	ET 426 [21]	36,5	100	112	798	4	8	1.645	63,3	16	160	1 U-WC	einstöckig	diverse
4.3	Desiro ML [6]	70,93	252	240	800	6	12	1.650, 750	133	17	160	1 U-WC	einstöckig	Mittelrheinbahn
4.4	427 (Flirt)	90,378	241	251	600	5	10	-	145	-	160	1 U-WC	einstöckig	Teilnetz Ost, Ostsee-küste
4.5	Flirt (DB Regio)	90,8	270	280	780	4	8	1.800, 2.000	156	-	160	1 U-WC 1 S-WC	einstöckig	Rheinland-Pfalz
4.6	Flirt 3 (Veolia)	58,6	158	226	780	4	8	1.800, 2.000	114	-	160	1 U-WC	einstöckig	München-Rosenheim
4.7	Flirt 6 (Veolia)	106,9	333	365	780	6	12	1.800, 2.000	179	-	160	1 U-WC 3 S-WC	einstöckig	München-Rosenheim
4.8	Flirt 4 (DB Regio)	74,7	225	220	780	4	8	1.800, 2.000	132,9	-	160	1 U-WC 1 S-WC	einstöckig	Haard-Achse
4.9	Coradia Continental (3-teilig)	57,8	200	180	760	3	6	1.750, 1.975, 825, 975	113	20	160	2 U-WC	einstöckig	E-Netz Regensburg
4.10	Coradia Continental (4-teilig)	74,2	264	232	760	4	8	1.750, 1.975, 825, 975	138	20	160	2 U-WC	einstöckig	E-Netz Regensburg
4.11	Coradia Continental (5-teilig)	90,6	328	284	760	5	10	1.750, 1.975, 825, 975	164	20	160	2 U-WC	einstöckig	Passau
4.12	Coradia BR 1440 (4-teilig) [7]	73,3	192	257	800	4	8	1.700, 1.750, 800, 850	144	20	160	1 U-WC	einstöckig	ENNO-Netz
4.13	iLINT	54,27	180	204*	800	4	8	-	92	-	140	1 U-WC	Brennstoffzellen-antrieb	Niedersachsen
4.14	BR 442 (2-teilig)	40,1	119	109	800	2	4	1.790, 1.710 750, 850	77	18	160	1 U-WC	einstöckig	Moselbahn
4.15	BR 442 (3-teilig)	56,2	160	191	775	3	6	1.730, 1.830, 800, 820,	107	18	160	-	einstöckig	Berlin-Brandenburg
4.16	BR 442 (4-teilig)	72,3	250	220	800	4	8	1.790, 1.710 750, 850	137	18	160	1 U-WC	einstöckig	Moselbahn
4.17	BR 442 (5-teilig)	88,4	300	282	800	5	10	1.730, 820, 1.650, 800, 1.770	163,5	18	160	-	einstöckig	Berlin-Brandenburg

Tabelle 2-3: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter aktueller elektrisch angetriebener Regionalbahn-Triebwagen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

Lfd. Nr.	Bauart/ Bau-reihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatzkapazität	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegs-höhe in mm	Anzahl FGR-Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Tür-spuren	Sitzteiler in mm	Dienst-masse in t	Max. Rad-satz-last in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Vorwiegendes Ein-satzgebiet
5.1	BR 141 plus 3 n-Wagen [24], [25]	94,82	262	-	-	6	11	1.670	66,4 + 94,5 = 160,9	16,6 / 18,12	120/ 140	5 S-WC	4-teiliger Zug mit Lok BR 141 und zwei Bnrzb 724 und einem BDnrzf 740	diverse
5.2	BR 141 plus 5 n-Wagen [24], [25]	147,62	458	-	-	10	19	1.670	66,4 + 156,6 = 222,9	16,6 (Lok) 15,6 (Wa- gen)	120/ 140	9 S-WC	6-teiliger Zug mit Lok BR 141 und zwei Bnrzb 724 und einem BDnrzf 740	diverse
5.3	RRX (Desiro HC) [5]	105,25	400	462	800	8	20	1.750, 1850 800, 850	198	18	160	1 U- WC 2 S-WC	ein- und doppel-stö- ckig	Rhein-Ruhr Express
5.4	KISS (Odeg, 4-teilig)	105,22	428	-	580	8	16	-	205,8	-	160	1 U- WC 2 S-WC	einstöckig	Berlin-Brandenburg
5.5	445 (4-teilig) [8]	105,55	350	-	600	8	16	875, 890 1.800 1.000, 2.100	2 x 66 + 2 x 48 = 228	21	160	1 U- WC 3 S-WC	doppelstöckig	Netz Schleswig-Hol- stein
5.6	445 (4-teilig) [8]	105,55	420	-	600	8	16	840, 1780 920, 1890	2 x 66 + 2 x 48 = 228	21	160	1 U- WC 3 S-WC	doppelstöckig	VBB Netz Nord-Süd (Mecklenburg, Berlin, Brandenburg)
5.7	446 (5-teilig) [8]	132,35	504	-	600	10	20	840, 1.780 920, 1.890	2 x 66 + 3 x 48 = 276	21	160	1 U- WC 3 S-WC	doppelstöckig	VBB Netz Nord-Süd (Mecklenburg, Berlin, Brandenburg)

Tabelle 2-4: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter aktueller elektrisch angetriebener Regionalbahn-Triebwagen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

Lfd. Nr.	Bauart/ Bau-reihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatz-ka-pazität	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegs-höhe in mm	Anzahl FGR-Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Türspu-ren	Sitzteiler in mm	Dienst-masse in t	Max. Rad-satz-last in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Vorwiegendes Ein-satzgebiet
6.1	Regio Shuttle RS 1 [20]	25,36	74	80	600	2	4	-	42	14	120	ohne	Dieselmeh. Antrieb	Strogäubahn
6.2	Regio Shuttle RS 1 [20]	25,0	79	85	600	2	4	-	42	14	120	1 U-WC	Dieselmeh. Antrieb	Rurtalbahn
6.3	BR 640, Lint (1-teilig)	27,26	73	69	580	2	4	-	41	15	120	1 U-WC	Dieselmeh. Antrieb	diverse
6.4	BR 614 (3-teilig) [10]	79,46	228	-	638	6	10	1.200 2.000 1.670	124	16,6	140	3 S-WC	Dieselhydr. Antrieb	diverse
6.5	BR 628.4 [11]	46,4	146	-	-	3	4	1.794, 1.800 2.099, 1.000 814, 825	70,4	14,56	120	1 S-WC	Dieselhydr. Antrieb	diverse
6.6	BR 642 Desiro Classic	41,7	123	90	575	2	4	1.650, 825	68,2	-	120	1 U-WC	Dieselmeh. Antrieb	diverse
6.7	BR 648.0, Lint (2-teilig)	41,81	129	103	780	2	4	-	65	18	120	1 U-WC	Dieselhydr. Antrieb	diverse
6.8	BR 648.1, Lint (2-teilig)	41,81	130	107	780	2	4	1.850, 1.650, 730	66,5	18	120	1 U-WC	Dieselhydr. Antrieb	Sauerland-Netz
6.9	BR 648.2, Lint (2-teilig)	41,81	128	107	580	2	4	1.850, 1.650, 730	65	18	120	1 U-WC	Dieselhydr. Antrieb	Drei-Länder-Eck
6.10	BR 648.3, Lint (2-teilig)	41,81	137	129	580	2	4	-	67	18	120	1 U-WC	Dieselhydr. Antrieb	Bayern
6.11	BR 620 (3-teilig) [9]	80,92	300	306	800	6	12	-	138	18	140	-	Dieselmeh. Antrieb	Kölner Dieselnetz
6.12	BR 622 (2-teilig) [9]	54,27	180	204	800	4	8	-	98	18	140	-	Dieselmeh. Antrieb	Kölner Dieselnetz
6.13	BR 646.0 GTW 2/6 (DB Re-gio)	38,66	108	104	760	2	4	-	54	-	120	1 U-WC	Dieselelekt. Antrieb	Berlin-Brandenburg
6.14	BR 646.1 GTW 2/6 (UBB)	38,66	126	91	585	2	4	-	54	-	120	1 U-WC	Dieselelekt. Antrieb	Insel Usedom
6.15	BR 646.0 GTW 2/6 (Odeg)	40,89	100	158	780	2	4	1.720, 815 1.820, 850	70	-	140	1 U-WC	Dieselelekt. Antrieb	Berlin-Brandenburg
6.16	BR 643	48,86	137	150	590	3	6	1.750	73	-	120	1 S-WC	Dieselmeh. Antrieb	diverse
6.17	BR 644	52,16	161	150	800	6	12	1.650	84,3	-	120	1 S-WC	Dieselelekt. Antrieb	diverse
6.18	Itino RMV	39,47	119	113	600	2	4	1.700	79	17	140	1 U-WC	Dieselmeh. Antrieb	Odenwald
6.19	Integral [16],[17]	53,43	180	190	780	4	8	1.720, 810 1.800, 895	84	19,8	140	1 S-WC	Dieselhydr. Antrieb	Bayerisches Oberland
6.20	Pesa Link	43,73	140	110	600	2	4	-	86,5*	-	140	-	Dieselmeh. Antrieb	Niederbarnim
6.21	BR 632 [49]	43,73	140	110	760	2	4	-	86,5	18,2	140	-	Dieselmeh. Antrieb	Raum Dortmund
6.22	BR 633 [49]	57,13	210	170	760	3	6	-	120,4	18,9	140	-	Dieselmeh. Antrieb	Raum Dortmund

Tabelle 2-5: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter aktueller nicht-elektrisch angetriebener Regionalbahn-Triebwagen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

2.3 Analyse der aktuellen Fahrzeugkonzepte

Die in den Tabellen 2-1 bis 2-5 dargestellten Fahrzeuge lassen sich, unabhängig von ihrer Antriebsart, Türanordnung, Einstiegshöhe und ihrer individuellen Konfiguration in neun Fahrzeugkonzepte gemäß Abb. 2-2 einteilen.

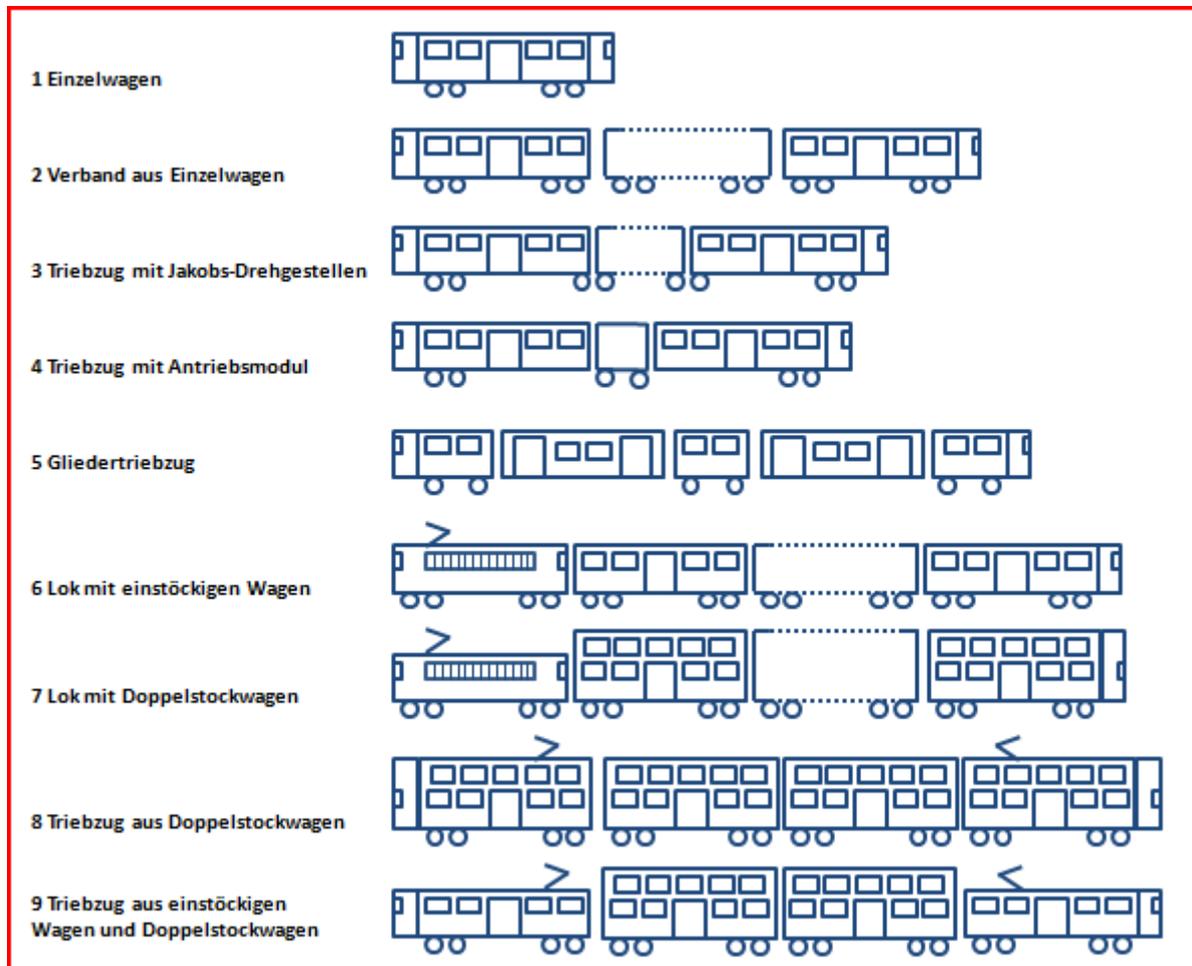


Abb. 2-2: Gegenüberstellung der betrachteten Fahrzeugkonzepte

Als ein eigenständiges Fahrzeugkonzept wird dabei die Bereitstellung des Fahrgastraumes in Verbindung mit einer spezifischen Anordnung von Wagenkästen, Fahrwerken und Antriebsausrüstung betrachtet. Die Varianz von Hauptabmessungen, installierter Leistung oder Höchstgeschwindigkeit stellt hingegen kein Kriterium für ein eigenes Fahrzeugkonzept dar.

Die in den Tabellen 2-1 bis 2-5 aufgelisteten Baureihen repräsentieren die in Deutschland eingesetzten Fahrzeuge des modernen Nah- und Regionalverkehrs im Jahre 2018. Lediglich die Fahrzeuge der Baureihen 483 und 484 befinden sich noch nicht im Betriebseinsatz, sind in der Literatur aber schon hinreichend gut beschrieben, um hier auch schon berücksichtigt werden zu können. Für einen Teil der Fahrzeuge erfolgte die Betriebseinführung ab Mitte der 1990iger Jahre sowie ab dem Jahr 2000. Zu Vergleichszwecken sind zusätzlich einige ältere, noch heute im Einsatz befindliche DB-Fahrzeugvarianten (BR 420, BR 614 und BR 628) ebenfalls enthalten, um auch Entwicklungstendenzen erkennen zu können. Nicht betrachtet werden Prototypen oder Fahrzeuge, die lediglich als Konzeptvarianten veröffentlicht, aber nicht gebaut wurden.

Diese Analyse soll feststellen, ob es konzeptbedingte Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugtypen gibt, die auf einen signifikanten, d.h. deutlich herausragenden, konzeptbedingten Vorteil schließen lassen. Unterschiede sind selbstverständlich zu erwarten, diese können aber verschiedenste

Ursachen haben, wie z.B. der Sitzteiler der Bestuhlung, welcher zwischen den verschiedenen Fahrzeugen bei der 2. Klasse im Bereich von 1.650 bis 1860 mm variiert oder auch die Anzahl und Ausführung der Toiletten. Aber hier liegt die Varianz dann im Bereich von wenigen Sitzreihen, und dies führt dann nicht zu dem gesuchten, signifikanten Unterschied.

2.3.1 Kapazitätsvergleich

Die traditionellen einstöckigen S-Bahnen zeichnen sich in der kleinsten betrieblich einsetzbaren Konfiguration durch ein relativ ähnliches Transportvolumen aus. Mit einem Durchschnittswert von 195 Sitzplätzen bei einer Bandbreite von 184 bis 221 Sitzplätzen (bei Vernachlässigung der beiden Baureihen 480 und 483) ergibt sich ein relativ homogenes Bild. Auffällig ist bei den Gesamtkapazitäten, dass die Netze Berlin und Hamburg sowie die Fahrzeuge für die klassischen Wechselstromnetze jeweils für sich ähnliche, fahrzeugtyp-unabhängige Werte aufweisen. Erst die zusätzliche Betrachtung von Konfigurationen wie Lok-plus-Wagen (einstöckige oder doppelstöckige Wagen) oder die Fahrzeuge der BR 1442, die eine aus Regionalbahnfahrzeugen abgeleitete Variante einer S-Bahn darstellen, zeigen hier eine andere Tendenz (siehe Abb. 2-3). Hier ist die Differenz zwischen Sitzplatz- und Stehplatzkapazität deutlich geringer.

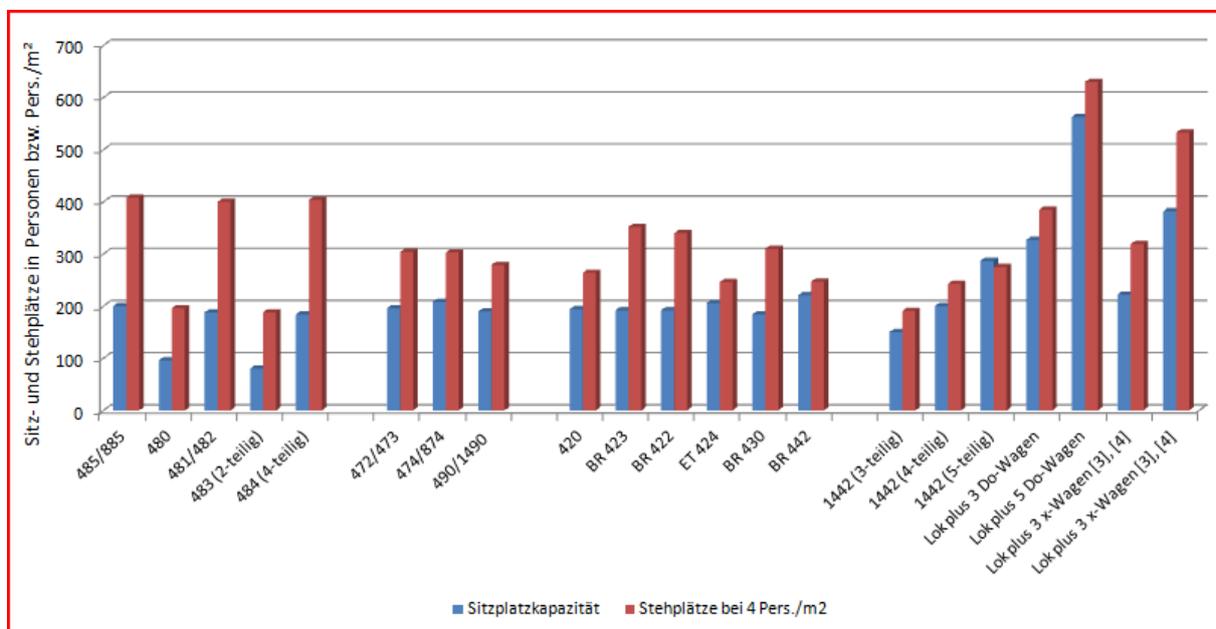


Abb. 2-3: Kapazitätsvergleich S-Bahn-Fahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 2-1 und 2-2

Weiterhin kann man erkennen, dass, je moderner die Fahrzeugbaureihe ist, desto geringer ihre Transportkapazität ausfällt. Dies ist erkennbar beim Vergleich der Baureihen 474/874 und 490/1490 für die S-Bahn Hamburg, aber auch bei den Baureihen 423, 422 und 430, obwohl diese Fahrzeuge identische Konzepte und nahezu identische Abmessungen besitzen. Bei jeweils gleichem Sitzteiler, gleichen Türbreiten und sogar gleichem Wagenkastenmaterial erscheint hier die Schlussfolgerung naheliegend, dass dies vor allem der veränderten Normenlage, insbesondere den geänderten Anforderungen nach EN 15227 zuzuschreiben ist. Die Anwendung dieser Norm führt zu tendenziell längeren Wagenenden, in denen die Verformungsenergie bei einer Kollision aufgenommen wird, was wiederum bei gleicher Fahrzeuggesamtlänge zu einem Verlust an Fahrgastraumkapazität führt.

Ein anderes Bild ergibt sich beim Vergleich von Sitz- und Gesamtkapazität bezogen auf die Fahrzeuglänge. Da sich die Vollbahnfahrzeuge hinsichtlich der Breite nur geringfügig unterscheiden, reicht für die weiteren Vergleiche zur konzeptionellen Grundbetrachtung der bezogene Wert der Kapazität pro Meter Fahrzeuglänge aus. Die betrachteten Fahrzeuge weisen Breiten zwischen ca. 2,8 und 3,014 m auf, was aber für einen zusätzlichen Sitzplatz bei Querbestuhlung nicht ausreicht. Nominell würde die

Stehplatzfläche vergrößert werden, was jedoch bei den zugrundegelegten Fahrzeugdaten der Hersteller eingeflossen ist. Eine Betrachtung der Kapazität pro m² oder pro m³ bringt hier also keine signifikant anderen Erkenntnisse.

Gemäß der Darstellung in Abb. 2-4 erkennt man, dass die Vorteile der Konfigurationen mit Lokomotive und Wagen, bei denen die gesamte Traktionstechnik in der Lokomotive konzentriert ist, während die Wagen ausschließlich für den Fahrgasttransport genutzt werden, durch die nicht-fahrgastwirksame nutzbare Länge der Lokomotive aufgebraucht werden. Für alle betrachteten Konfigurationen ergibt sich ein Mittelwert von 2,86 Sitzplätzen pro Meter Fahrzeuglänge. Hier zeigen nur die fünfteilige BR 1442 und die Varianten mit Doppelstockwagen bessere Werte als der Durchschnitt (3,06 bis 3,6 Sitzplätze/m). Anders sieht es aus, wenn die Gesamtkapazität betrachtet wird. Aufgrund der großen Stehflächen in den zahlreichen Türauffangräumen schneiden die Berliner S-Bahn-Typen mit Werten von bis zu 8,4 Reisenden pro Meter Fahrzeuglänge deutlich besser ab, als der Durchschnitt aller betrachteten Fahrzeuge (Durchschnitt: 7,21 Personen/Meter).

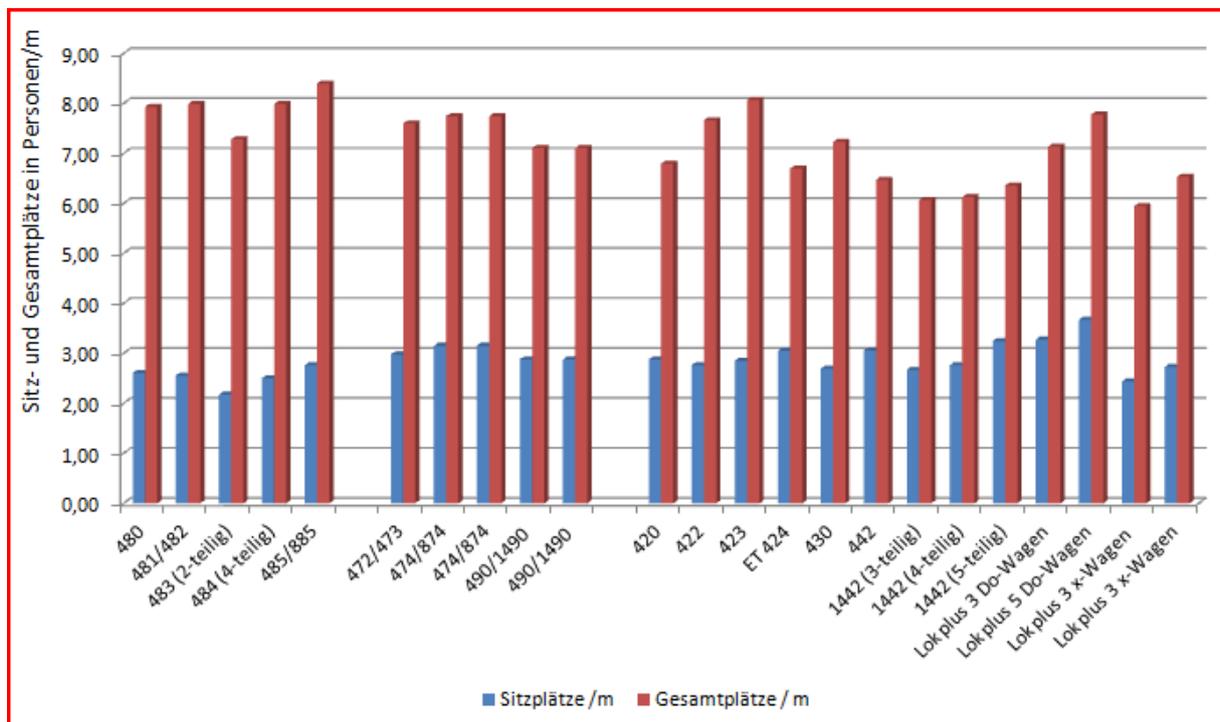


Abb. 2-4: längenbezogener Kapazitätsvergleich S-Bahn-Fahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 1 und 2

Während die S-Bahn-Fahrzeuge noch ein relativ gleichmäßiges Sitzplatzangebot trotz der unterschiedlichen Fahrzeugtypen aufweisen, zeigt sich bei der Betrachtung der elektrisch angetriebenen Regionalbahnfahrzeuge ein sehr uneinheitliches Bild. Die Sitzplatzkapazität reicht hier von 100 bis 504 Personen, erwartungsgemäß mit den höchsten Kapazitäten bei den Doppelstocktriebwagen. Die Variante aus Lokomotive mit Doppelstockwagen wurde bei den S-Bahnen bereits bewertet und erfolgt an dieser Stelle nicht erneut, obwohl sich diese Fahrzeuge beiden Einsatzgebieten zuordnen lassen (siehe Abb. 2-5).

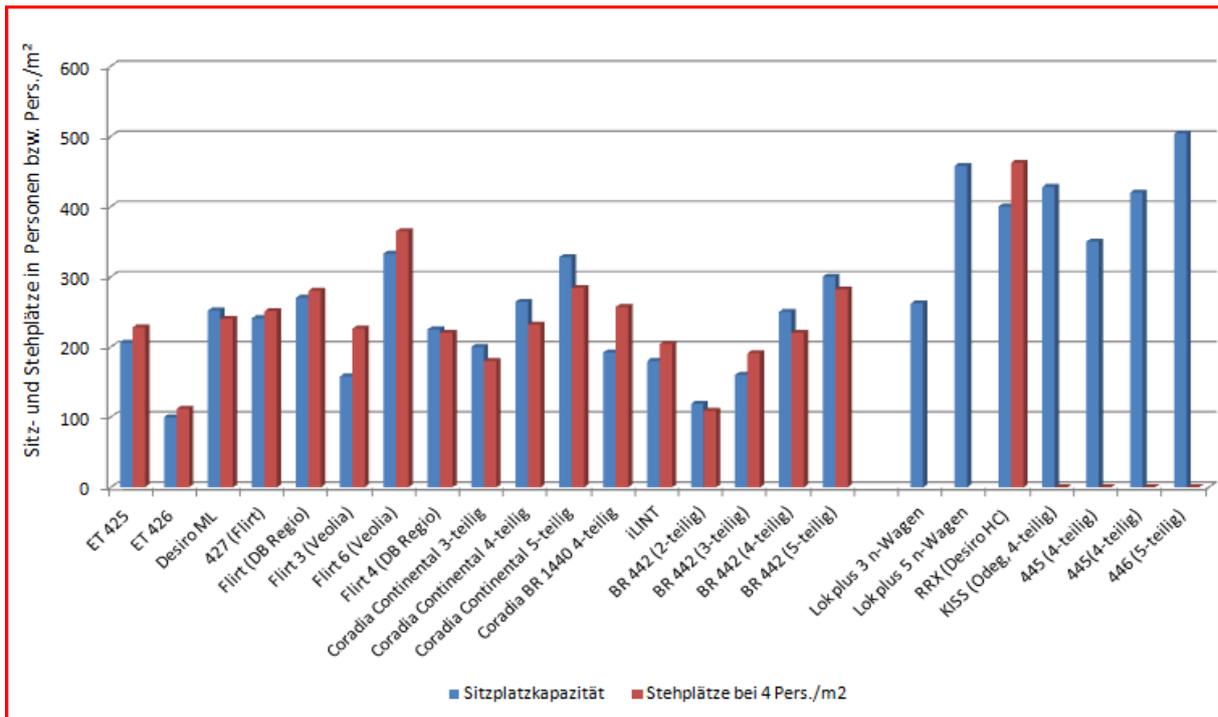


Abb.2-5: Kapazitätsvergleich für elektrisch angetriebene Regionalbahnfahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 2-3 und 2-4

Der Vergleich unter Berücksichtigung der Gesamtkapazitäten kann hier leider nicht vollständig erfolgen, da für die meisten Doppelstocktriebwagen keine Herstellerangaben zur Stehplatzkapazität vorliegen (siehe Abb. 2-5) und auf eine eigene, wahrscheinlich ungenaue, Abschätzung verzichtet wird. Der Mittelwert der Sitzplätze pro Meter Fahrzeuglänge liegt hier bei 3,25 Plätzen/m mit einem Maximalwert von 4,07 Plätzen/m beim KISS für die Odeg. Der Mittelwert für die Gesamtkapazität liegt bei 6,45 Fahrgäste pro Meter Fahrzeuglänge, mit einem Maximalwert von 8,19 für die Fahrzeuge der Bauart RRX aus ein- und zweistöckigen Wagen (siehe Abb. 2-6).

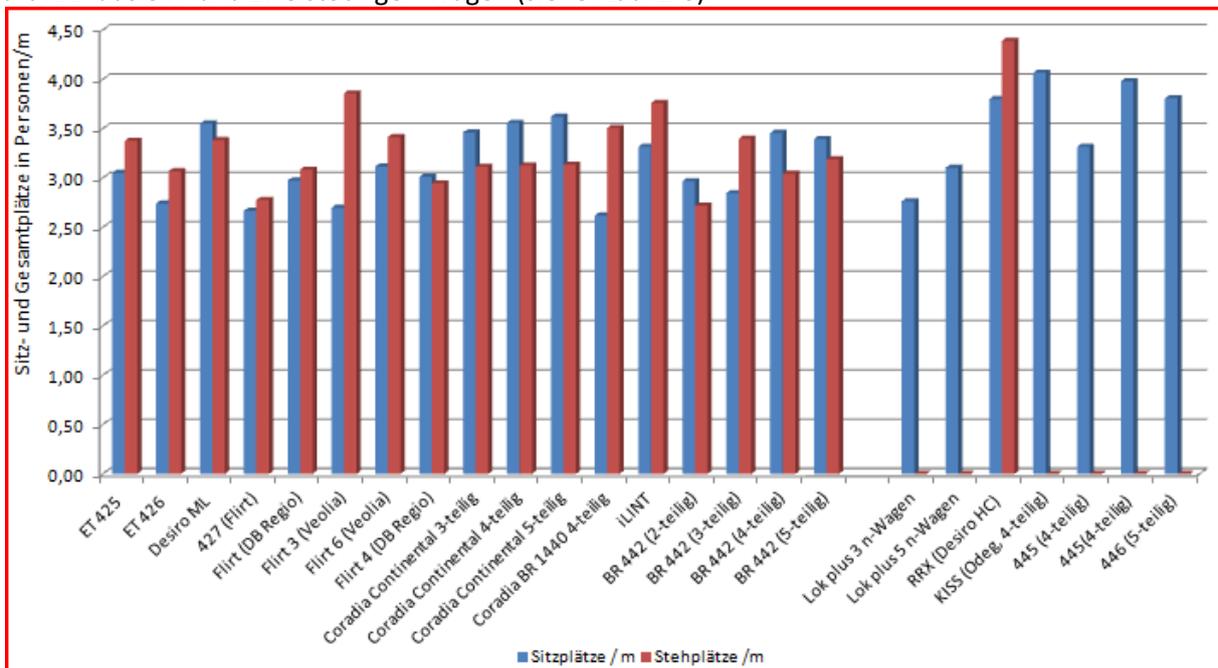


Abb. 2-6: längenbezogener Kapazitätsvergleich für elektrisch angetriebene Regionalbahnfahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 2-3 und 2-4

Ähnlich wie bei den elektrisch angetriebenen Regionalbahnen, zeigen auch die mit Brennkraft angetriebenen Regionalbahnen eine sehr starke Spreizung der Kapazität. Abweichend von den S-Bahnen und elektrisch angetriebenen Regionalbahnen finden sich hier auch einteilige Triebwagen, die damit den überwiegend ländlichen, schwach besiedelten Raum für den Schienenpersonenverkehr erschließen. Die Kapazitäten reichen hier über alle Varianten von 73 bis zu 300 Sitzplätzen (siehe Abb. 2-7). Auf diese enorme Spreizung der bereitgestellten Kapazität und die damit verbundene Schwierigkeit zur nachfragegerechten Anpassung wird im weiteren Teil dieser Arbeit noch eingegangen.

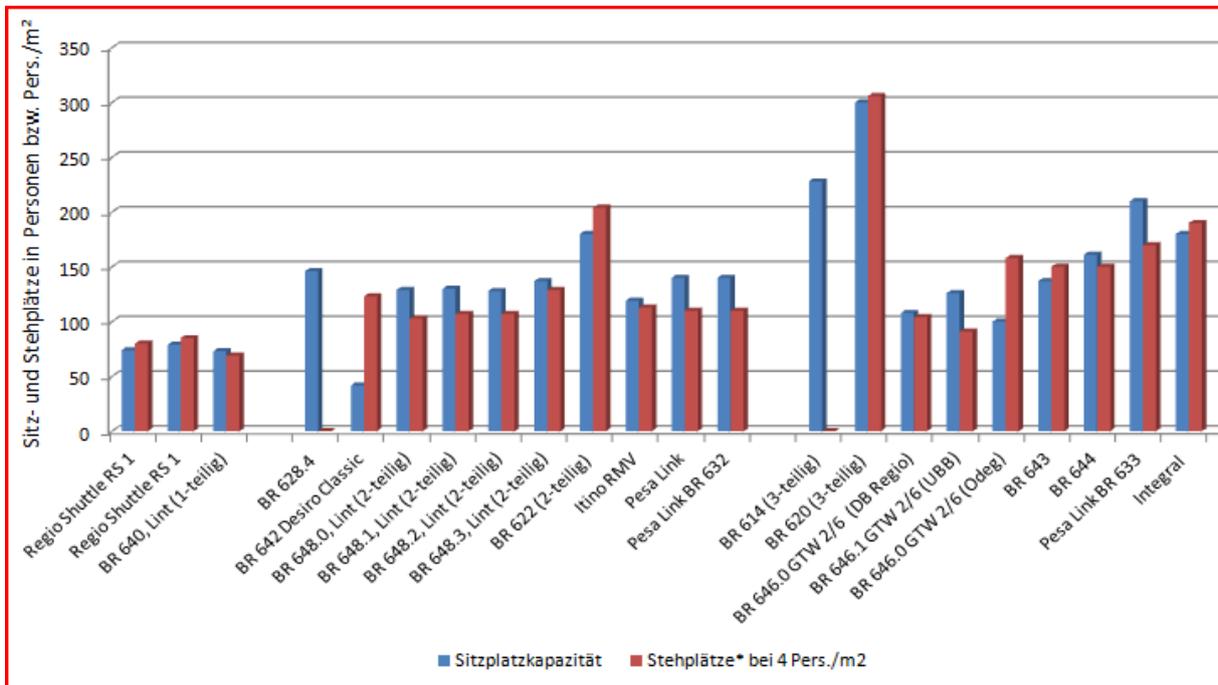


Abb. 2-7: Kapazitätsvergleich für Regionalbahnfahrzeuge mit Brennkraftantrieb gemäß den Werten aus Tabelle 2-5

Abb. 2-8 zeigt die längenbezogenen Werte für die Brennkrafttriebwagen. Hier liegen die Sitzplätze pro Meter Fahrzeuglänge im Bereich von 2,45 bis 3,68 Plätzen/m (Durchschnitt 3,10 Sitzplätze/m) und die Gesamtkapazität in einem Bereich von 5,11 bis 7,49 Gesamtplätzen/m (Durchschnitt 6,04 Plätze/m).

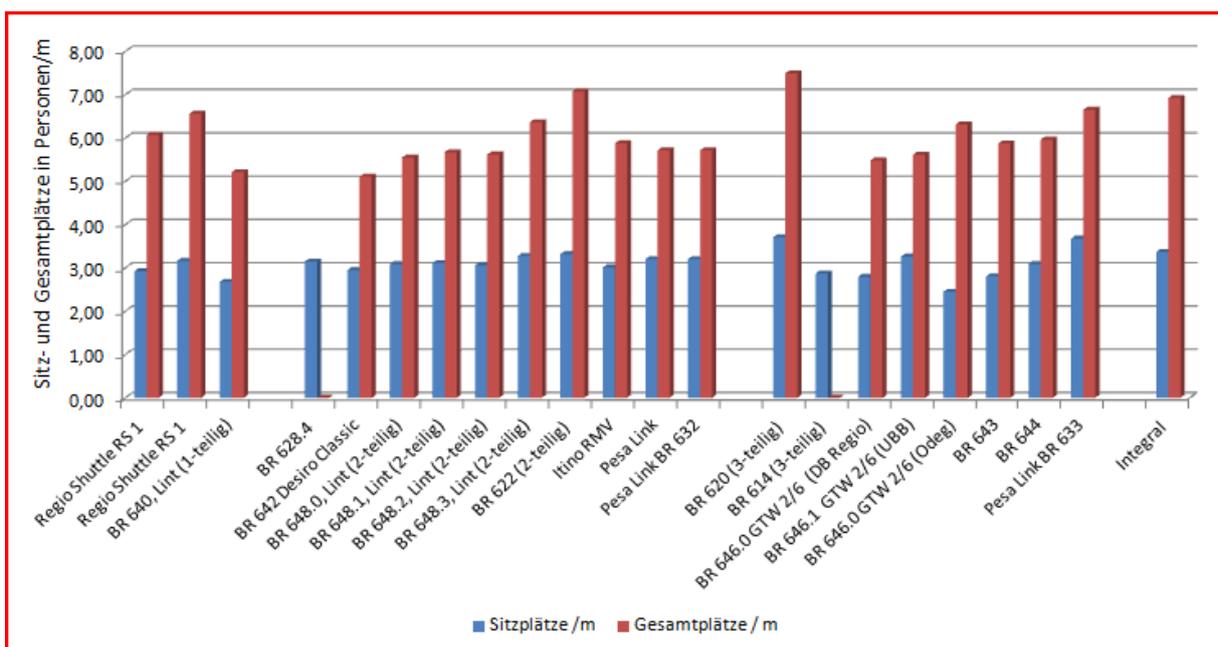


Abb. 2-8: längenbezogener Kapazitätsvergleich für Brennkrafttriebwagen gemäß den Werten aus Tabelle 2-5

In der Gesamtbetrachtung über alle gelisteten Fahrzeugtypen ergibt sich die zusammenfassende Übersicht gemäß Abb. 2-9.

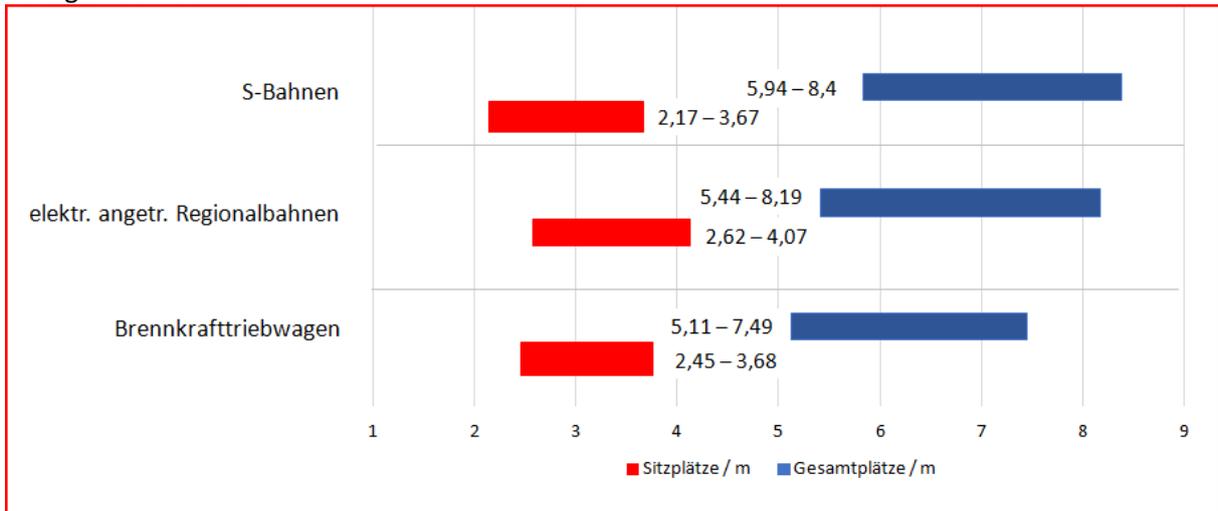


Abb. 2-9: längenbezogener Kapazitätsvergleich der Fahrzeuge nach Einsatzgebiet

Die S-Bahnen weisen eine insgesamt etwas geringere Anzahl von Sitzplätzen auf, besitzen aber die größte Gesamtkapazität, wobei die elektrisch angetriebenen Regionalbahnen in der Gesamtkapazität hier nur geringfügig kleinere Werte zeigen. Tendenziell ist jedoch die Sitzplatz- und Gesamtkapazität, jeweils auf den Meter Fahrzeuglänge bezogen, bei den Brennkrafttriebwagen geringer. Dies ist jedoch ausschließlich der Tatsache geschuldet, dass es keine Doppelstock-Brennkrafttriebwagen auf dem Markt gibt. Berücksichtigt man die Doppelstocktriebwagen nicht, so weisen die Brennkrafttriebwagen eine größere bezogene Kapazität als die elektrisch angetriebenen Regionaltriebwagen auf (siehe Abb. 2-10).

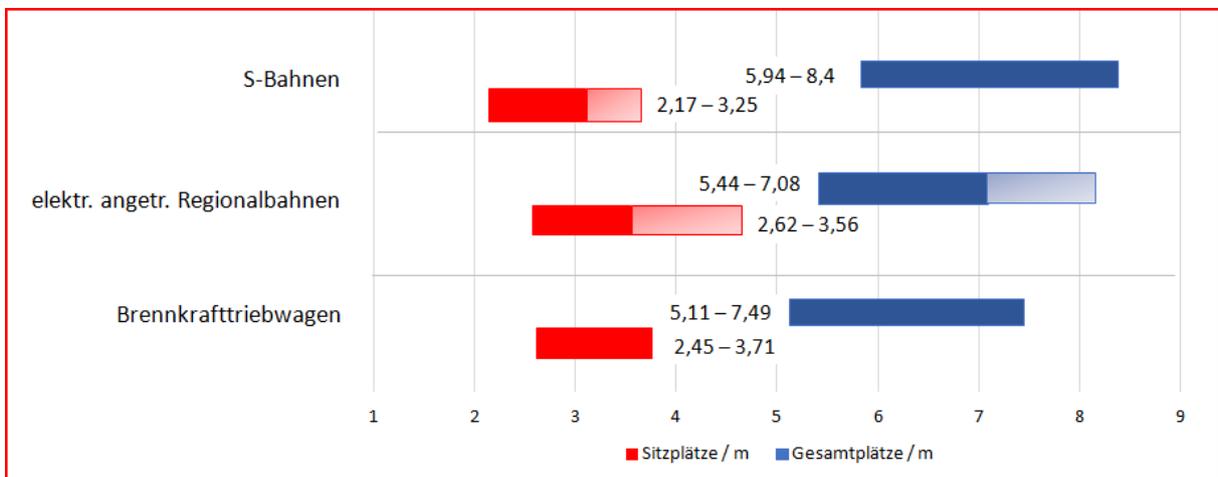


Abb. 2-10: längenbezogener Kapazitätsvergleich der Fahrzeuge nach Einsatzgebiet, hier nur einstöckige Fahrzeuge

Abb. 2-11 fasst die längenbezogenen Kapazitätsangaben für alle betrachteten Fahrzeuge zusammen. Man erkennt sehr deutlich die auf den Transport vieler Fahrgäste optimierten S-Bahnen, insbesondere bei den ausschließlich für den S-Bahn Verkehr entwickelten Bauarten mit hoher Stehplatzkapazität, während die Regionalbahnfahrzeuge tendenziell mehr Sitzplätze bei geringerer Stehplatzanzahl und auch geringerer Stehplatzfläche durch eine geringere Türanzahl aufweisen. Ein deutlicher Vorteil für ein bestimmtes Fahrzeugkonzept lässt sich aus der Gegenüberstellung nicht ableiten.

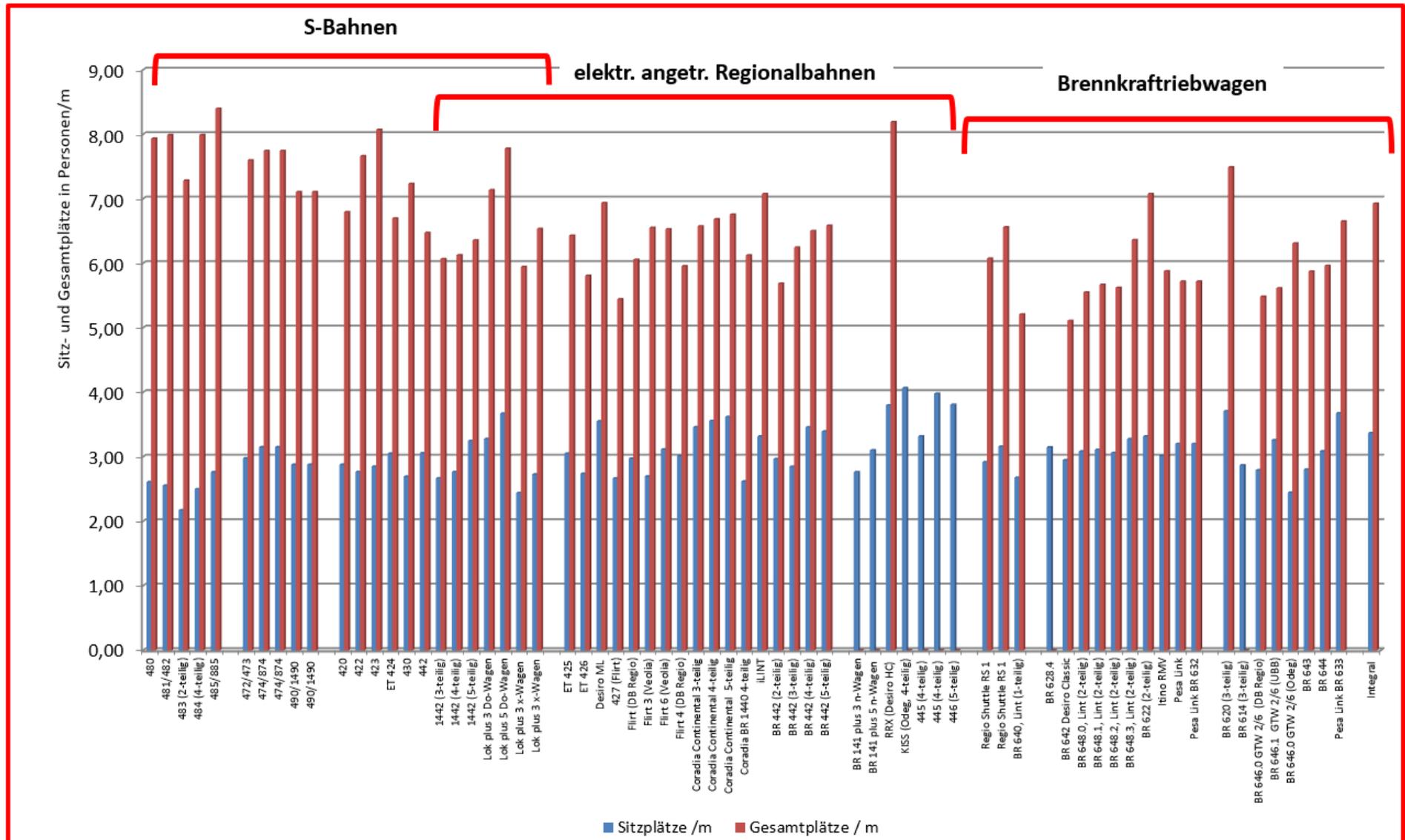


Abb. 2-11: längenbezogener Kapazitätsvergleich aller betrachteten Fahrzeuge

2.3.2 Einstiegsverhältnisse

Bei der konzeptionellen Bewertung verschiedener Fahrzeugvarianten spielen die Einstiegsverhältnisse in das Fahrzeug, als erster Kontakt zwischen Fahrgast und dem Transportunternehmen nach dem Zugang zum Bahnhof, eine ganz wesentliche Rolle. Dabei geht es sowohl um die hinreichend barrierefreie Einstiegsmöglichkeit als auch um die Bequemlichkeit und Schnelligkeit des Einstiegsvorganges. Große Fahrgastwechselraten an zentralen Stationen, verbunden mit geringer Anzahl von Türen führen neben der Beeinträchtigung für die Reisenden selbst, auch zu unnötigen Verzögerungen für den Betrieb, die entweder zu Verspätungen oder bei entsprechender Planung zu längeren Reisezeiten führen. Hinzu kommen heute und zukünftig noch in verstärktem Maße, auch die Möglichkeiten, ein Fahrrad mitzunehmen. Die Phänomenologie der relevanten Kriterien für einen ungehinderten Zugang ist in [15] beschrieben, allerdings ist dem Thema Fahrradmitnahme in [15] noch keine große Aufmerksamkeit gewidmet worden. Auf dieses spezielle Thema wird im weiteren Teil dieser Arbeit noch eingegangen, siehe Kapitel 8.4.2.

Aufgrund der Vorgaben bei der Bestellung einer Verkehrsleistung unter Berücksichtigung der vorhandenen und in der Regel kaum oder nur langfristig veränderbaren infrastrukturellen Zugangsverhältnisse, sind die heutigen Fahrzeuge in der Regel für eine bestimmte Bahnsteighöhe optimiert. Bei den S-Bahnen liegt die Bahnsteighöhe in der Regel bei 960 mm oder 760 mm über SOK, bei den Regionalbahnen sind es Bahnsteighöhen von 760 mm, 550 mm und auch 380 mm über SOK. Fahrzeugseitig werden dazu Fußbodenhöhen im Einstieg von 990 mm bis 1.120 mm bei den klassischen S-Bahnen und 580 mm bis 800 mm bei den Regionalbahnen und den von Regionalbahnen abgeleiteten S-Bahnen realisiert. Hinzu kommen noch Sonderbauformen wie bei Doppelstockwagen mit Hocheinstieg und Klapptritt (1.150 mm Fußbodenhöhe im Fahrzeug) oder den klassischen und heute veralteten Hochflurfahrzeugen mit mehreren innenliegenden Treppenstufen (z. B. BR 614 oder BR 628). Weiterhin hat der ganz überwiegende Teil der betrachteten Fahrzeuge, außer den Hochflur-S-Bahnen zusätzliche Schiebetritte oder Spaltüberbrückungen, teilweise auch in Kombination.

An dieser Stelle soll für den konzeptionellen Vergleich zunächst nur die Anzahl der Türspuren pro Anzahl der Sitzplätze und Türspuren pro Anzahl der Gesamtplätze betrachtet werden. Grundlage der Betrachtung sind die Angaben aus [15] zur Bewertung der Anzahl der Türspuren. Die bei den betrachteten Fahrzeugen verwendeten Türen weisen überwiegend eine lichte Öffnungsweite von 1.300 mm bis 1.400 mm auf, was einer zweispurigen Tür entspricht. Die bei einigen Doppelstockfahrzeugen verwendeten Türen mit 1.880 mm lichter Öffnungsweite werden demnach als dreispurig bewertet, auch wenn sie mitunter durch zusätzliche Handläufe im Einstieg nicht die Kapazität einer echten dreispurigen Tür aufweisen. Lediglich die älteren Triebwagen BR 614 und BR 628 besitzen teilweise noch einflügelige Türen, die daher als einstufig bewertet werden.

In den Tabellen 2-1 bis 2-5 sind die zugrundegelegten Anzahlen der Türen und der Türspuren hinterlegt, Abb. 2-12 zeigt die Aufbereitung der Daten.

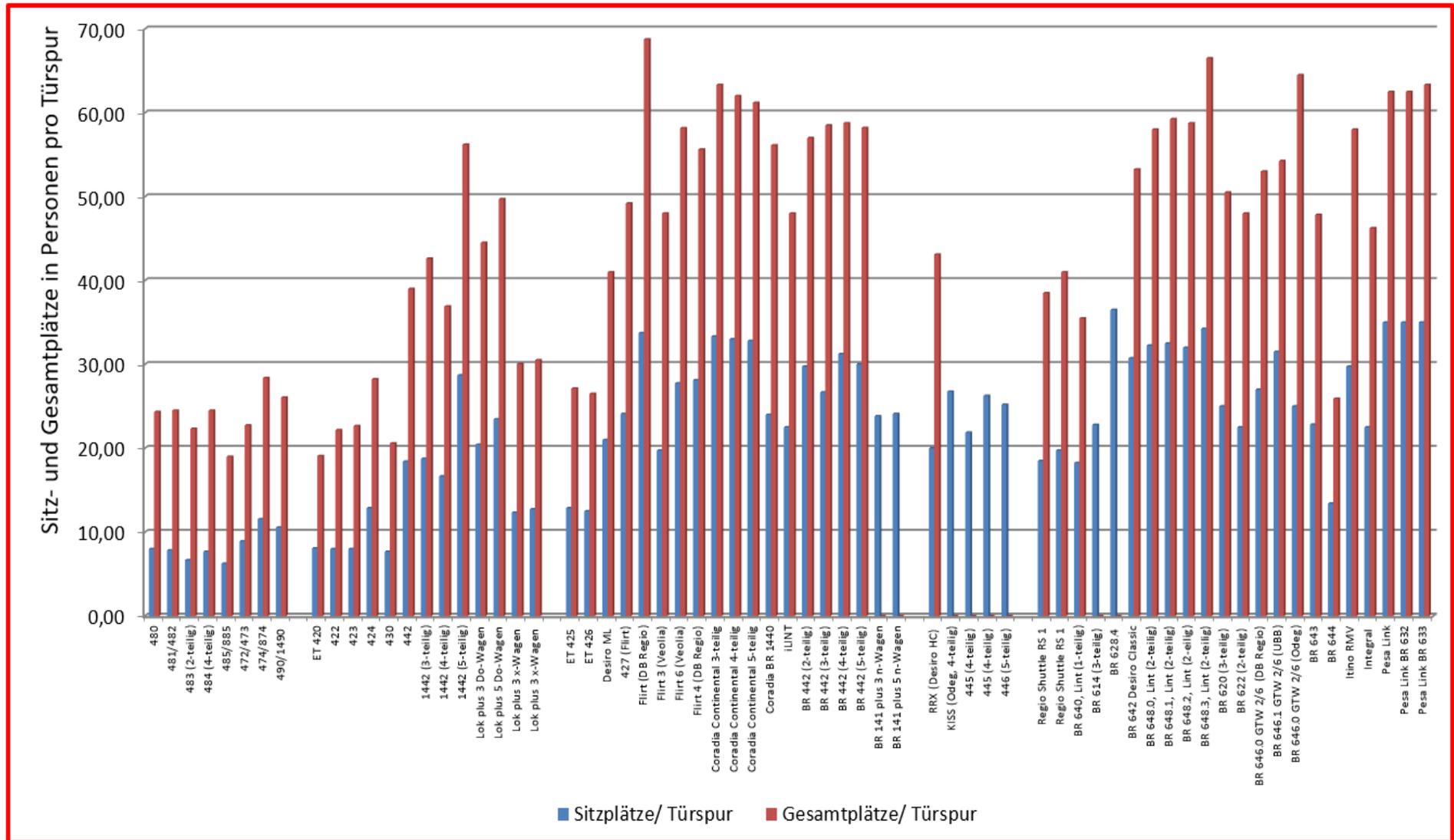


Abb. 2-12: Vergleich der Anzahl Sitzplätze bzw. der Gesamtplätze pro Türspur für alle betrachteten Fahrzeugarten nach Tabelle 2-1 bis 2-5

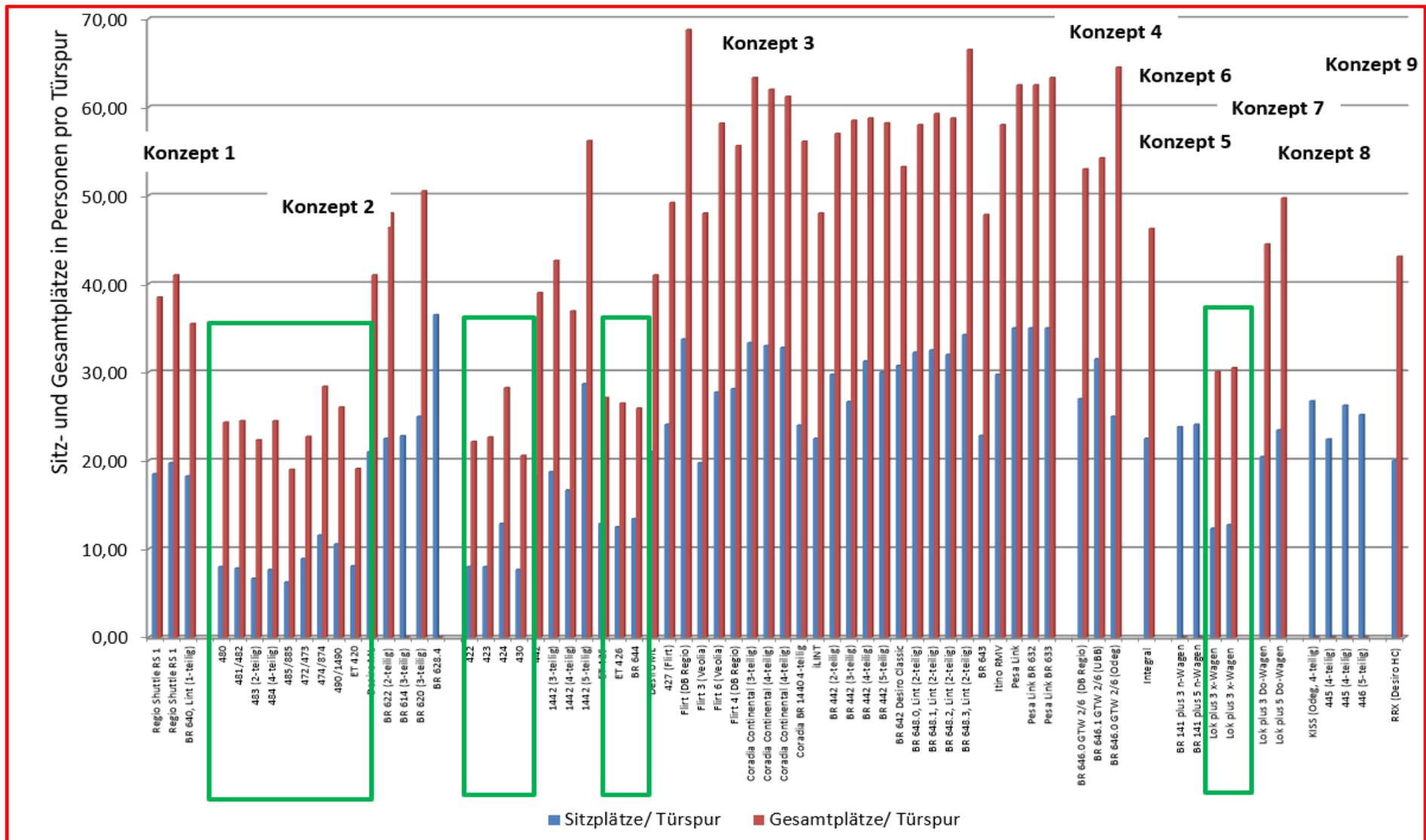


Abb. 2-13: Vergleich der Anzahl Sitzplätze bzw. der Gesamtplätze pro Türspur, aufgeteilt nach Fahrzeugtyp gem. Abb. 2-2

Die Einbeziehung der Einstiegsstufen entfällt hier, da, wie schon am Anfang dieses Kapitels beschrieben, einzelne Fahrzeuge für eine Vielzahl von Bahnsteighöhen verwendet werden und somit der sich daraus ergebende Einfluss ortsabhängig zu betrachten wäre. Hier wird also zunächst nur der fahrzeugseitige Anteil durch die Betrachtung der Türspuren pro Fahrgast (pro Sitzplatz oder pro Gesamtplatz) verglichen.

Anders als z.B. bei einer Betrachtung des Leichtbaupotentials durch z.B. Masse pro Meter Fahrzeuglänge, wo die geringste Masse pro Meter das leichteste Produkt sofort erkennbar macht, ist dies bei den Einstiegsverhältnissen nur bedingt möglich. Hier gibt es kein „gut“ oder „schlecht“, sondern hier muss nach Einsatzkategorie unterschieden werden. Schnelle Fahrgastwechsel sind insbesondere im Nahverkehr zwingend erforderlich (also ein niedriger Wert von Plätzen pro Türspur), während bei geringen Fahrgastwechselraten ein höherer Wert von Plätzen zu Türspur noch akzeptabel sein kann, wenn dadurch dem Komfort während der Fahrt Rechnung getragen werden kann. Es bleibt aber bei der Grund-Tendenz, dass ein niedriger Wert von Fahrgästen pro Türspur dem schnellen, einfachen Fahrgastwechsel dienlich ist. Dies ist bei dieser Betrachtung das relevante Kriterium.

In der Darstellung von Abb. 2-12 erkennt man die klassischen Hochflur-S-Bahnen im linken Teil mit einer Anzahl zwischen 6,25 und 11,56 Sitzplätzen pro Türspur bzw. 19,0 bis 28,39 Gesamtplätzen pro Türspur. Alle anderen Baureihen weisen hier durch mehr Sitzplätze, d.h. weniger Gesamtplätze im Vergleich zu den Türspuren eine stärkere Komfortprägung auf.

Abb. 2-13 zeigt den Vergleich der betrachteten Fahrzeuge nach Fahrzeugtyp gemäß Abb. 2-2. Es gibt hier keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Fahrzeugkonzept und geringem bezogenem Wert von Fahrgästen zu Türspur, allerdings einen Zusammenhang zwischen Einsatzgebiet und niedrigem Bezugswert. Es sind überwiegend die S-Bahn-Fahrzeuge (Typ 1) sowie einzelne Triebzüge mit Jakobsdrehgestellen (Typ 2) und auch vom Typ 6 (Lok mit Wagen), die sich durch niedrige Bezugswerte Platz/Türspur auszeichnen (in Abb. 2-13 durch die grünen Rahmen gekennzeichnet).

Abb. 2-14 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen dem vorwiegenden Einsatzgebiet der Fahrzeuge und dem Bezugswert.

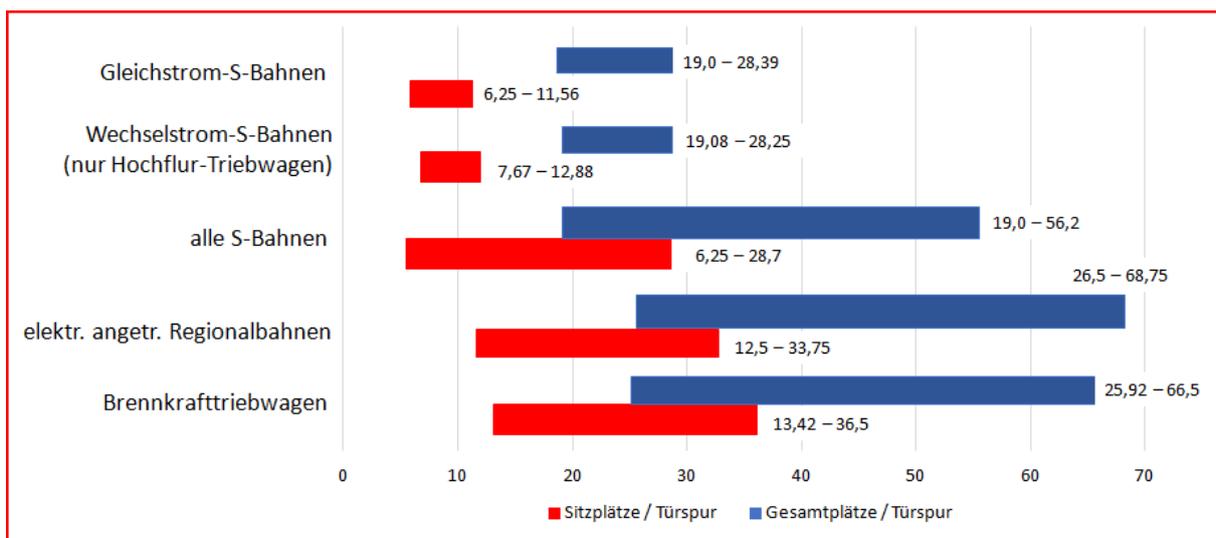


Abb. 2-14: Vergleich der Anzahl Sitzplätze und der Gesamtplätze pro Türspur nach Einsatzgebiet der Fahrzeuge

Dabei ist wieder sichtbar, wie die klassischen Hochflur-S-Bahnen auf den schnellen Fahrgastwechsel optimiert sind, während sich bei Betrachtung aller S-Bahnen, durch den Einsatz von Regionalbahnfahrzeugen als S-Bahn, die Kennwerte aller S-Bahnen den Regionalbahnen stark angleichen. Hier spielt insbesondere die Einbeziehung der Doppelstockwagen eine besondere Rolle, da diese trotz der teilweise

verwendeten dreispurigen Türen weniger für den schnellen Fahrgastwechsel als vielmehr für den Komfort des sitzend reisenden Fahrgastes optimiert sind.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass die klassischen Hochflurfahrzeuge, also die Fahrzeugkonzepte 2 und 3 und die ähnlichen Fahrzeuge des Konzepts 6 nach Abb. 2-2, sowohl bei alleiniger Betrachtung der Sitzplätze pro Türspur als auch bei Betrachtung der Gesamtplätze pro Türspur das bessere Fahrzeugkonzept für einen schnellen, einfachen Fahrgastwechsel darstellen, als alle anderen Fahrzeugkonzepte.

2.3.3 Differenzbetrachtung zu den Sitzplätzen

Die Betrachtungen zu den Sitzplätzen pro Meter Fahrzeuglänge und zu den Türspuren pro Fahrgast beruhen auf den Herstellerangaben. Da, wie in den Tabelle 2-1 bis 2-5 ersichtlich, die Sitzteiler variieren, einige Fahrzeuge auch 1. und 2. Klasse sowie verschiedene Ausführungen von Toiletten (Standard-WC oder PRM-gerechtes WC), teilweise auch in Kombination aufweisen, sind die genannten Fahrgastkapazitäten keine Maximalkapazitäten, sondern den individuellen Ausschreibungsbedingungen geschuldet.

Somit entsteht bei den Regionaltriebwagen, anders als bei den klassischen S-Bahnen, welche keine Toiletten besitzen, eine Differenz zwischen der maximalen Kapazität, welche durch das Fahrzeugkonzept möglich wäre und der tatsächlichen Kapazität. Anhand zweier Beispiele soll dieser Differenzbetrag untersucht werden.

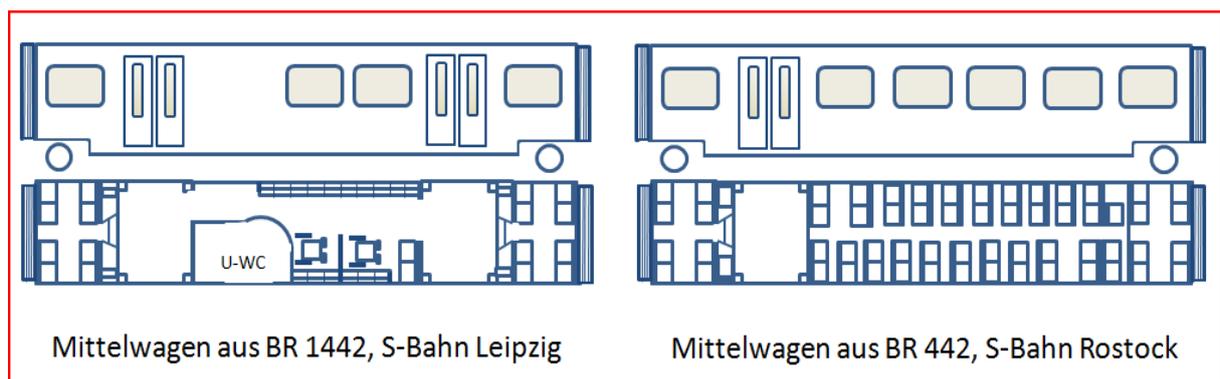


Abb. 2-15: Kapazitätsvergleich zweier Mittelwagen der BR 442/1442

Abb. 2-15 zeigt jeweils einen gleich langen Mittelwagen aus der Talent 2-Fahrzeugbaureihe. Im linken Teil der Abbildung handelt es sich um einen Wagen mit zwei Fahrgastraumtüren und einem PRM-gerechten WC, der rechte Teil der Abbildung zeigt einen Wagen mit nur einer Fahrgastraumtür und Vollbestuhlung. Während der linke Wagen eine Kapazität für 18 feste Sitzplätze und 20 Klappsitze, somit 38 Sitzplätze aufweist, hat der rechte Wagen eine Kapazität von 61 festen Sitzplätzen, eine Differenz von rund 38 %. Bezogen auf das vollständige Fahrzeug, fällt die Differenz geringer aus. Würde man das dreiteilige Fahrzeug der S-Bahn Leipzig mit einer Komplettbestuhlung ohne WC, aber mit Beibehaltung der Türanzahl versehen, so würde die Sitzplatzkapazität von 150 auf 164 steigen. Bei der S-Bahn Rostock läge der Unterschied bei 286 zu 302 Sitzplätzen, der Unterschied also prozentual zwischen 5,6 % (Leipzig) und 9 % (Rostock).

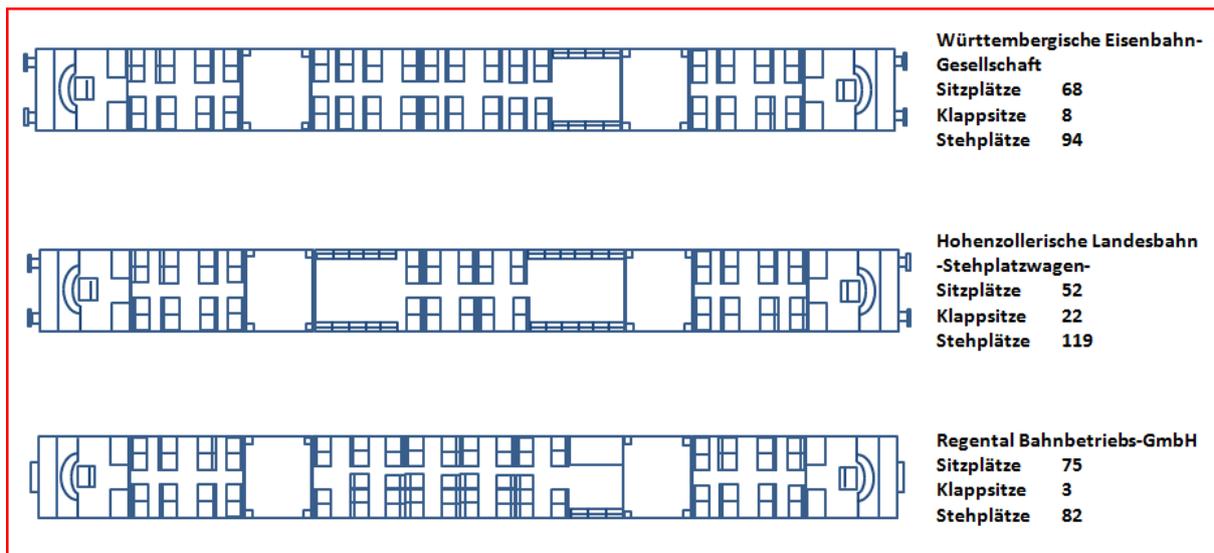


Abb. 2-16: Vergleich der Sitzplatzanordnung für das Fahrzeug vom Typ Regio Shuttle RS1, Darstellung in Anlehnung an [35]

Abbildung 2-16 zeigt den Kapazitätsvergleich für das Fahrzeug Regio Shuttle RS 1. Hier variieren die Sitzplatzzahlen zwischen 52 und 75, mithin um rund 30 %. Die in Tabelle 2-5 gelisteten Fahrzeuge weisen alle ein WC auf. Betrachtet man nur die drei einteiligen Fahrzeuge, variiert die Sitzplatzzahl zwischen 73 und 79, also um rund 8 %.

Vorbehaltlich einer detaillierteren Betrachtung im Einzelfall kann mit einem real erzielbaren Unterschied zwischen den Fahrzeugen innerhalb einer Betrachtungsgruppe durch Änderungen der Bestuhlungsanordnung von rund 10 % als systematischer Differenz in dieser Arbeit gerechnet werden. Dies ist aber nur dann relevant, wenn es nur geringfügige Abweichungen zwischen einzelnen Konzepten geben sollte, was dann aber wieder nicht signifikant wäre. Somit kann diese Differenz für die weiteren Betrachtungen problemlos akzeptiert werden.

2.3.4 Bewertung der Fahrzeugkonzepte im Hinblick auf die Masse

Die Masse eines Triebfahrzeuges ist ein fundamentales Kriterium für die Bewertung eines Fahrzeugkonzeptes. Schon immer war es das Bestreben, möglichst leichte Fahrzeuge zu bauen, wobei die Gründe vielfältig sind. Einige dieser Gründe sind z.B.:

- Die Schonung des Oberbaus und der Netzinfrastruktur durch geringe Radsatzlasten,
- die Verbesserung der Beschleunigungsleistung, insbesondere im Nahverkehr mit seinen relativ kurzen Stationsabständen und
- die damit verbundene Reduzierung der Energieaufnahme bzw. des Energieumsatzes beim Beschleunigen.
- Bei Brennkrafttriebwagen die Begrenzung des Schadstoffausstoßes der Verbrennungsmotoren,
- die Kompensation der Mehrmasse durch unvermeidbare, komfortrelevante Mehrausstattung (z.B. Klimaanlage) und
- die Begrenzung der Lebenszykluskosten, insbesondere, was Verschleißteile wie Radsätze, Bremsen und die gesamte Antriebsanlage betrifft.

Da die hier betrachteten Fahrzeuge gemäß Tabellen 2-1 bis 2-5 sehr unterschiedliche Fahrzeugkonzepte aufweisen, bietet sich auch hier ein Vergleich auf der Grundlage von bezogenen Massewerten an.

Ins Verhältnis gesetzt werden

- die Fahrzeugleermasse pro Sitzplatz,
- die Fahrzeugleermasse bezogen auf die Gesamtplätze (Sitz- und Stehplätze) und
- die Fahrzeugleermasse pro Meter Fahrzeuglänge.

Dazu eine Anmerkung: In der Literatur und bei der Benennung der Masseangaben durch die Fahrzeughersteller werden in der Regel leider nicht immer die korrekten Begrifflichkeiten nach DIN 25008 oder EN 15663 für die Masse verwendet oder es wird kein Bezug auf eine der beiden Normen genommen. Die Begriffe „Leermasse“ oder „tara“ werden dabei ebenfalls häufig verwendet, seltener der ausdrückliche Begriff der „Dienstmasse“. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die für die folgenden Betrachtungen verwendeten Werte für die Fahrzeugmasse in der Realität geringfügig abweichen. Dies betrifft auch die Masseangaben aus älteren Literaturquellen, die vor der Veröffentlichung der EN 15663 angewendet wurden.

Diese Abweichungen werden in der weiteren Betrachtung in Kauf genommen, nicht zuletzt auch deshalb, weil die Bandbreite des möglichen Fehlers durch einen Vergleich von Leermasse und Dienstmasse im Vergleich zu den Gesamtmassen eines Fahrzeuges verhältnismäßig gering sind.

Nach DIN 25008 ist die Eigenmasse als die „Masse des fahrfähigen Fahrzeugs mit allen fest eingebauten Teilen und allen Betriebsmitteln“ definiert. Die Dienstmasse ist danach die „Eigenmasse des Fahrzeugs zuzüglich eines Anteiles der Betriebsstoffvorräte und der Personalmasse“. Die formelmäßige Definition lautet danach für Wagen und Triebwagen:

$$m_D = m_E + \frac{2}{3} m_V + m_F \quad [\text{Gl 1}]$$

mit: m_D : Dienstmasse in [kg]
 m_E : Eigenmasse in [kg]
 m_V : Betriebsstoffe, welche sich während des Betriebseinsatzes reduzieren (Kraftstoffe, Heizstoffe, Sand, Trink- und Brauchwasser und andere); es gilt hierbei, dass offene Toilettensysteme mit 50% und geschlossene Toilettensysteme mit 100% Brauchwasservorrat anzusetzen sind; angegeben in [kg]
 m_F : Masse der zur Führung und zum Betrieb des Fahrzeugs benötigten Bediensteten, wobei 80 kg pro Person anzusetzen sind, angegeben in [kg]

Die Dienstmasse wird auf volle 1.000 kg gerundet.

Nach EN 15663 ist die „Leermasse“ als das „Fahrzeug im Auslieferungszustand ohne Verbrauchsstoffe und ohne Zugpersonal“ und als Gegenstück zur Dienstmasse die „Masse im betriebsbereiten Zustand“ definiert. Es gilt danach:

$$MVD = MU + PCD \quad \text{bzw.} \quad MVO = MU + PCO \quad [\text{Gl 2}]$$

mit: MVD : Auslegungsmasse im betriebsbereiten Zustand in [kg]
 MVO : Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs in [kg]
 MU : Leermasse in [kg]
 PCD : Auslegungsverbrauchsstoffe in [kg]
 PCO : Betriebsverbrauchsstoffe in [kg]

Die Unterschiede zwischen MVD und MVO liegen dabei in der Anrechnung der Betriebsstoffe, welche im ersten Fall zu 100 % und im zweiten Fall bei den hier in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeugen generell zu $\frac{2}{3}$ und für Wasservorräte zu 100 % Frischwasser oder zu 50 % aller Wasservorräte anzusetzen sind. Weiterhin wird bei MVO die Hälfte des maximalen Verschleißes abgezogen.

Zur Abschätzung der sich daraus ergebenden Unterschiede und zur Bewertung eines möglichen Fehlers in den nachfolgenden Betrachtungen erfolgt am Beispiel der BR 646.0 (GTW) mit einem geschlossenen Toilettensystem eine Gegenüberstellung mit den Daten aus [33] für die Vorratsstoffe entsprechend beider Normen.

Für dieses Fahrzeug werden die folgenden Vorräte angegeben (es erfolgt eine Umrechnung der Volumina in kg unter Verwendung der spezifischen Dichten für die Betriebsstoffe entsprechend EN 15663, Anhang A):

Kraftstoff: 800 Liter entspr. 672 kg
 Heizöl: 150 Liter entspr. 126 kg
 Brems sand: 220 kg
 Frischwasser 200 Liter entspr. 200 kg
 Abwasser 360 Liter entspr. 360 kg

Für Wischwasser gibt es in [33] keine Angabe, es wird hier mit 20 Litern (entsprechend 20 kg) gerechnet. Es ergeben sich folgende Massen für die veränderlichen Stoffe:

Vorratsstoff	m_V nach DIN 25008	PCD nach EN 15663	PCO nach EN 15663
Kraftstoff	448	672	448
Heizöl	84	126	84
Brems sand	147	220	147
Frischwasser	200	200	100
Abwasser	360	0	180
Wischwasser	13	20	13
Personal	80	80	80
Verschleiß	0	0	Hier nicht berücksichtigt
Summe	1.332	1.318	1.052

Tabelle 2-6: Vergleich der Betriebsstoffe nach DIN 25008 und EN 15663; alle Angaben in [kg]

Für die BR 646.0 ergibt sich damit eine Differenz zwischen dem größten und kleinsten Wert der Masseedefinitionen von 280 kg, was bei einer Fahrzeugmasse gemäß Tabelle 2-5 von 54 t zu einer Abweichung von rund 0,5 % führt. Ungenauigkeiten in dieser Größenordnung müssen bei den weiteren Betrachtungen zur Fahrzeugmasse damit hingenommen werden, erscheinen aber akzeptabel.

Da die Mehrzahl der Hersteller, schon aus vermarktungstechnischen Gründen, die Unterschiede zwischen Leermasse und Dienstmasse häufig nicht eindeutig ausweisen, wird hier im Weiteren nur noch von Leermasse gesprochen. Weiterhin liegen leider aus der Literatur und den Datenblättern der Hersteller nicht für jedes Fahrzeug alle notwendigen Angaben vor, weshalb für einzelne Fahrzeuge keine Aussage möglich ist. Diese Fahrzeuge werden dargestellt, der Zahlenwert wird aber mit „null“ ausgewiesen.

Abbildung 2-17 stellt die ermittelten Werte für Gleich- und Wechselstrom-S-Bahnfahrzeuge für die Leermasse pro Sitzplatz dar.

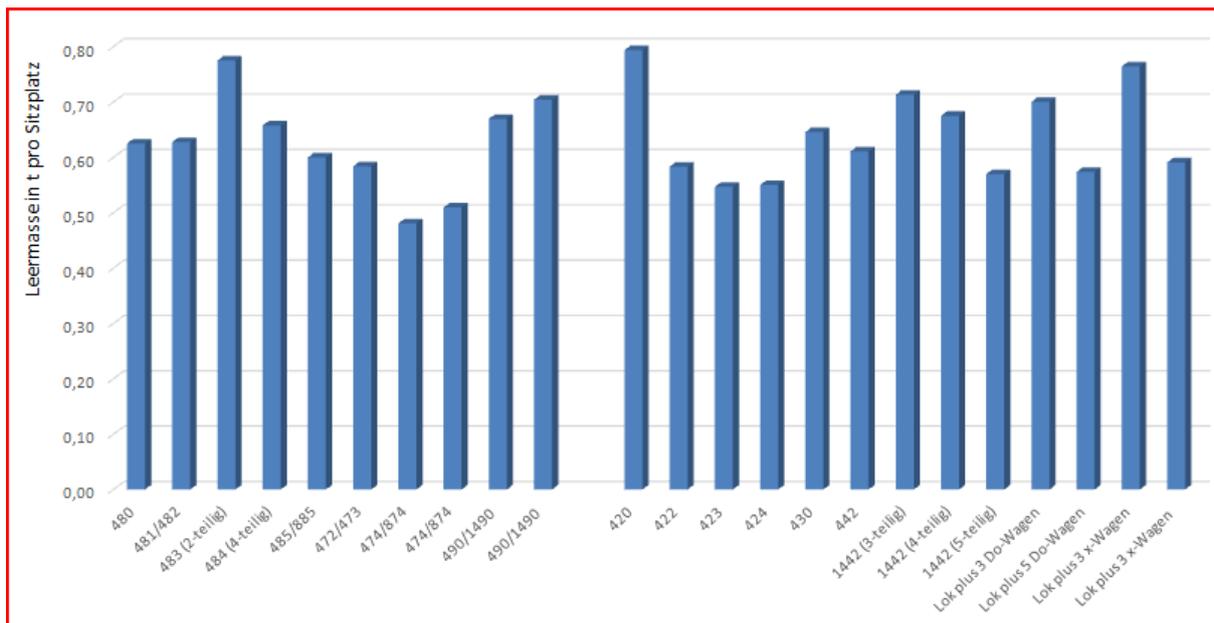


Abb. 2-17: Vergleich Leermasse in t pro Sitzplatz für S-Bahn-Fahrzeuge

Erstaunlicherweise lässt sich hier weder eine Tendenz für ein bestimmtes Fahrzeugkonzept, z.B. durch einen geringeren Wert für Fahrzeuge mit Jakobsdrehgestellen im Vergleich zu Fahrzeugen mit zwei Drehgestellen pro Wagenkasten erkennen, noch macht das Material des Wagenkastenrohbaus (Aluminium oder Stahl) einen erkennbaren Unterschied.

Die Spreizung der Werte liegt bei den S-Bahnen zwischen 0,48 t/Sitzplatz bei der BR 474 und 0,76 t/Sitzplatz bei der Variante Lok mit drei x-Wagen. Die deutlich ältere BR 420 sei mit einem Wert von 0,79 t/Sitzplatz hier ausgeklammert.

Das mit Abstand leichteste Fahrzeug stellt die Einsystemvariante der BR 474 (Stahlfahrzeug mit zwei Drehgestellen) dar. Dieses Fahrzeug entspricht aber nicht mehr den aktuellen Anforderungen an das Crash-Verhalten nach EN 15227. Bei den aktuellen Fahrzeugtypen liegen hingegen die fünfteilige Version der BR 1442 und die Variante der Lok mit fünf Doppelstockwagen mit einem Wert von jeweils 0,57 t/Sitzplatz gleichauf. Auch diese Fahrzeuge besitzen Stahlwagenkästen, weisen aber bzgl. der Drehgestellanordnung mit zwei Drehgestellen pro Wagen bzw. Jakobsdrehgestellen grundsätzlich andere Konzepte auf.

Diese Bewertung verändert sich, wenn statt der Sitzplätze die Gesamtkapazität aus Sitz- und Stehplätzen gegenübergestellt wird (siehe Abb. 2-14). Hier weisen dann die BR 423 und die älteren Gleichstrom-S-Bahnen mit 0,19 bzw. 0,2 t/Platz die günstigsten Werte auf. Der Kapazitätswachstum durch Berücksichtigung der Stehplätze fällt bei den Doppelstockwagen und den Derivaten der BR 442 geringer aus als bei den klassischen S-Bahn-Typen (siehe Abb. 2-18).

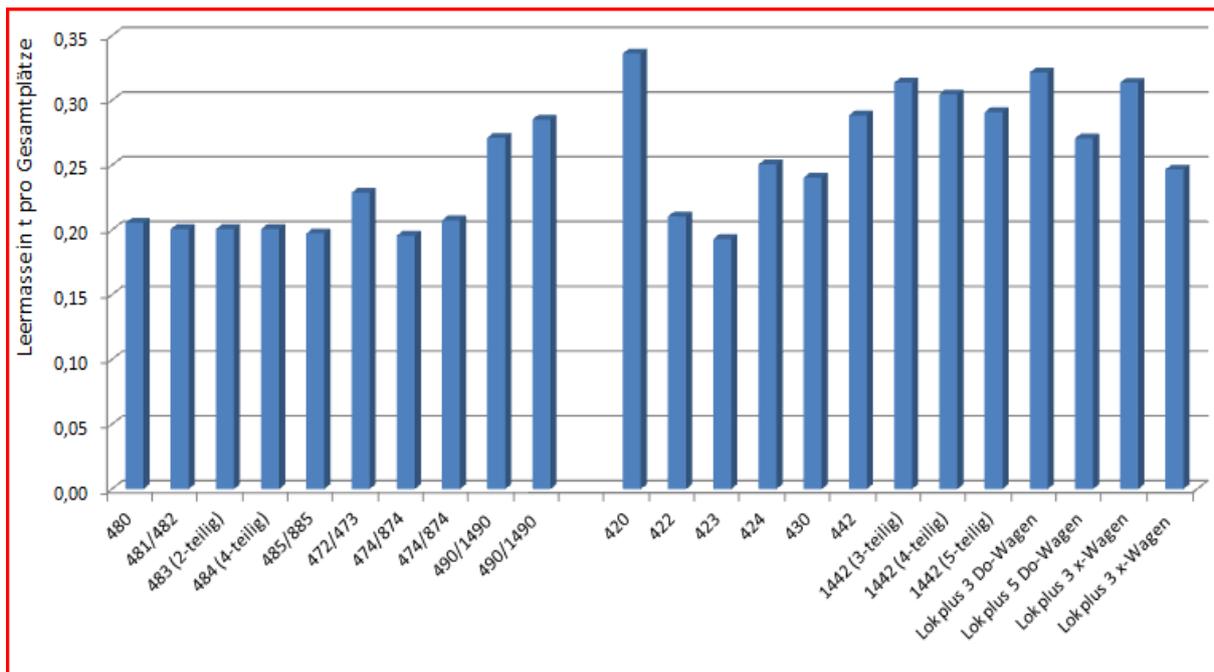


Abb. 2-18: Vergleich Leermasse in t pro Anzahl der Gesamtplätze für S-Bahn-Fahrzeuge

Bei den elektrisch angetriebenen Regionalbahnfahrzeugen fällt leider erheblich ins Gewicht, dass hier sehr viele Herstellerangaben nicht verfügbar sind. Es lässt sich aber erkennen, dass bei der Betrachtung der Masse pro Sitzplatz die Spreizung der Werte zwischen 0,48 t/Sitzplatz beim doppelstöckigen KISS bis 0,72 t/Sitzplatz beim dreiteiligen Flirt 3 ähnlich hoch wie bei den S-Bahnen liegt (siehe Abb. 2-19).

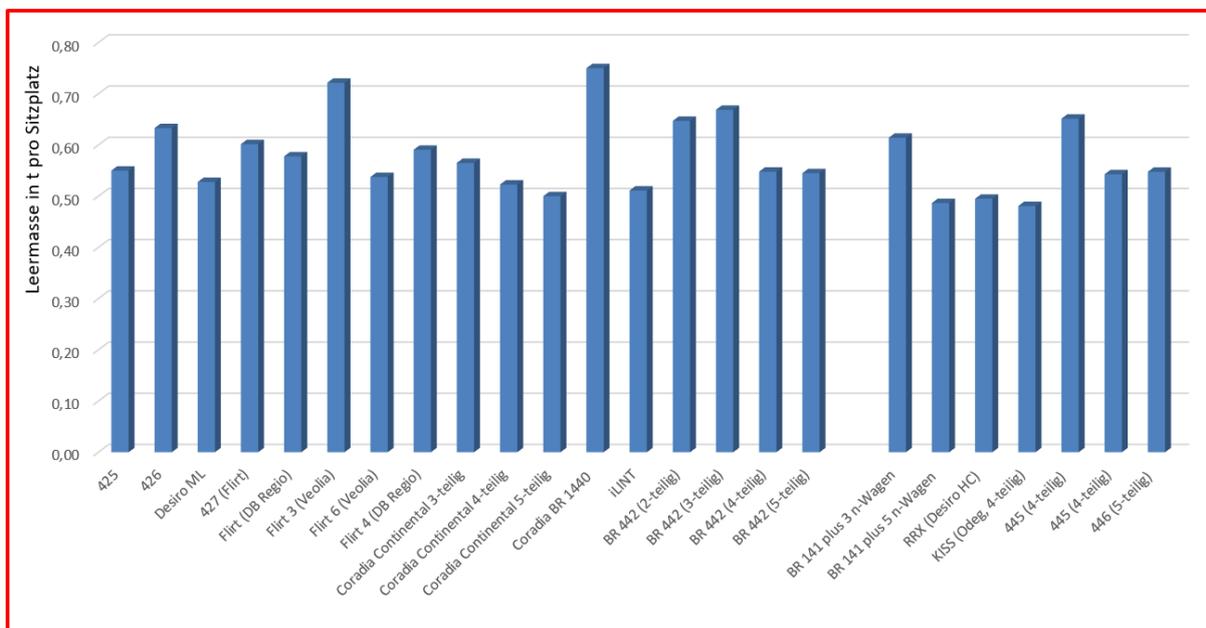


Abb. 2-19: Vergleich Leermasse in t pro Sitzplatz für elektrisch angetriebene Regionalbahn-Fahrzeuge

Die massebezogenen Werte unterscheiden sich für die elektrisch angetriebenen Regionalbahnfahrzeuge auch bei Berücksichtigung von Sitz- und Stehplätzen nicht nennenswert von den S-Bahnen (vgl. Abb. 2-20).

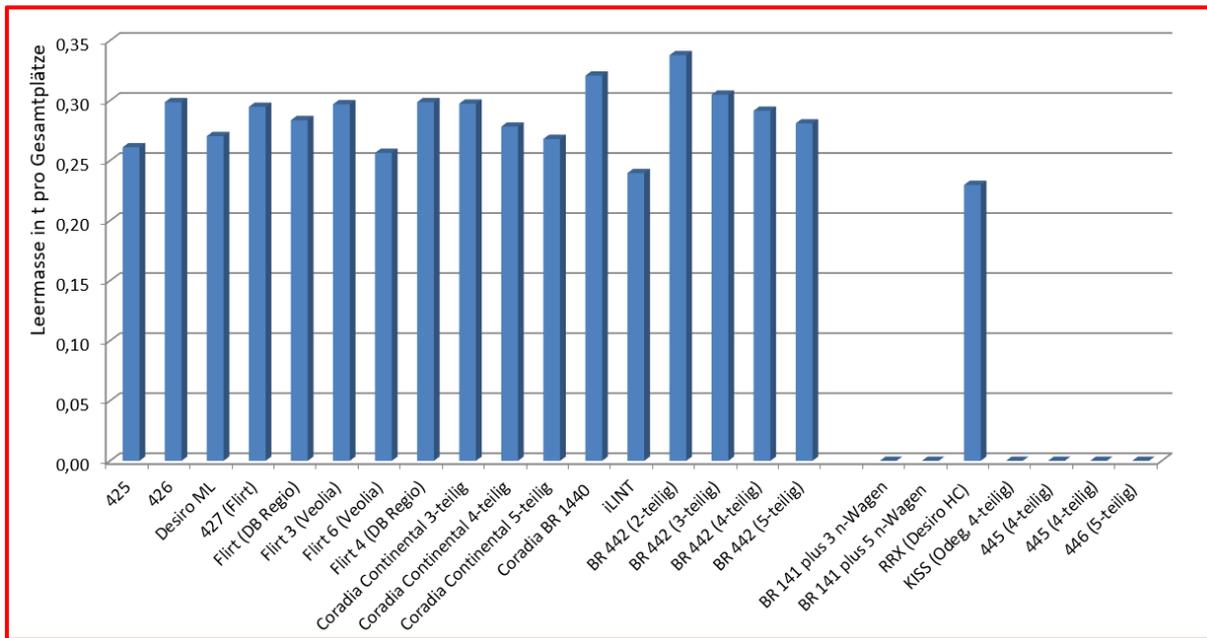


Abb. 2-20: Vergleich Leermasse in t pro Anzahl der Gesamtplätze für elektrisch angetriebene Regionalbahn-Fahrzeuge

Gleiches lässt sich für die Brennkrafttriebwagen nach Abb. 2-21 und 2-22 feststellen.

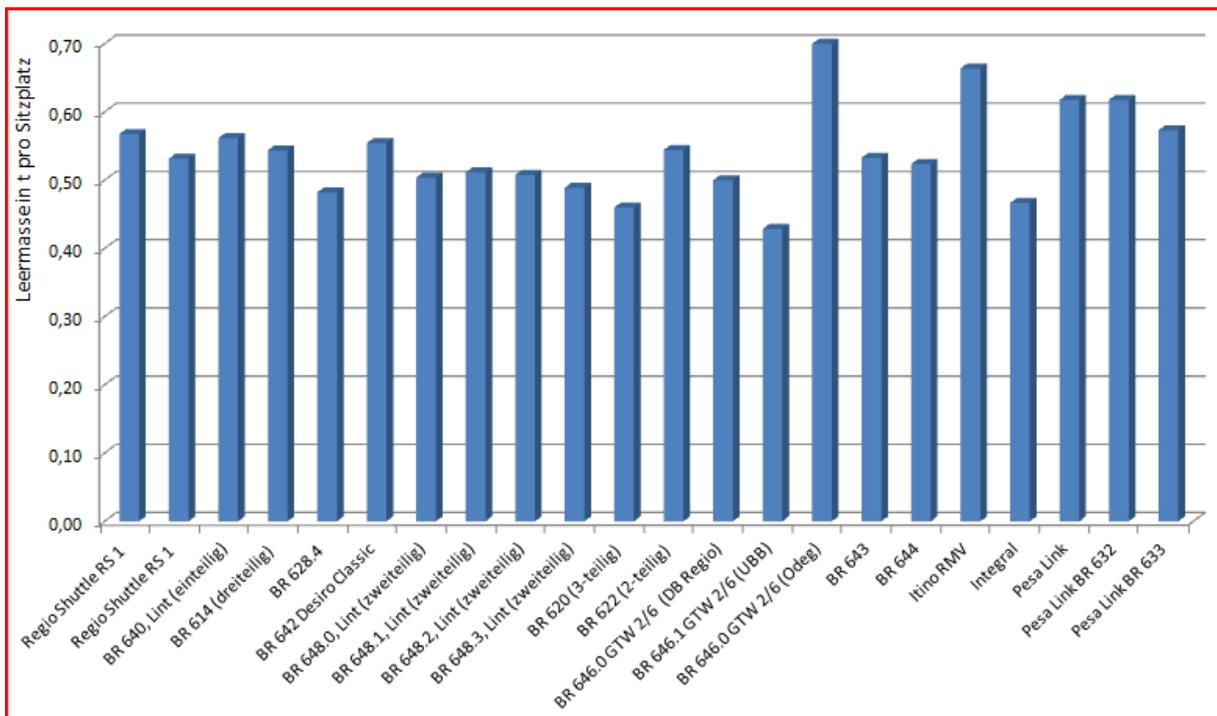


Abb. 2-21: Vergleich Leermasse in t pro Sitzplatz für Brennkrafttriebwagen

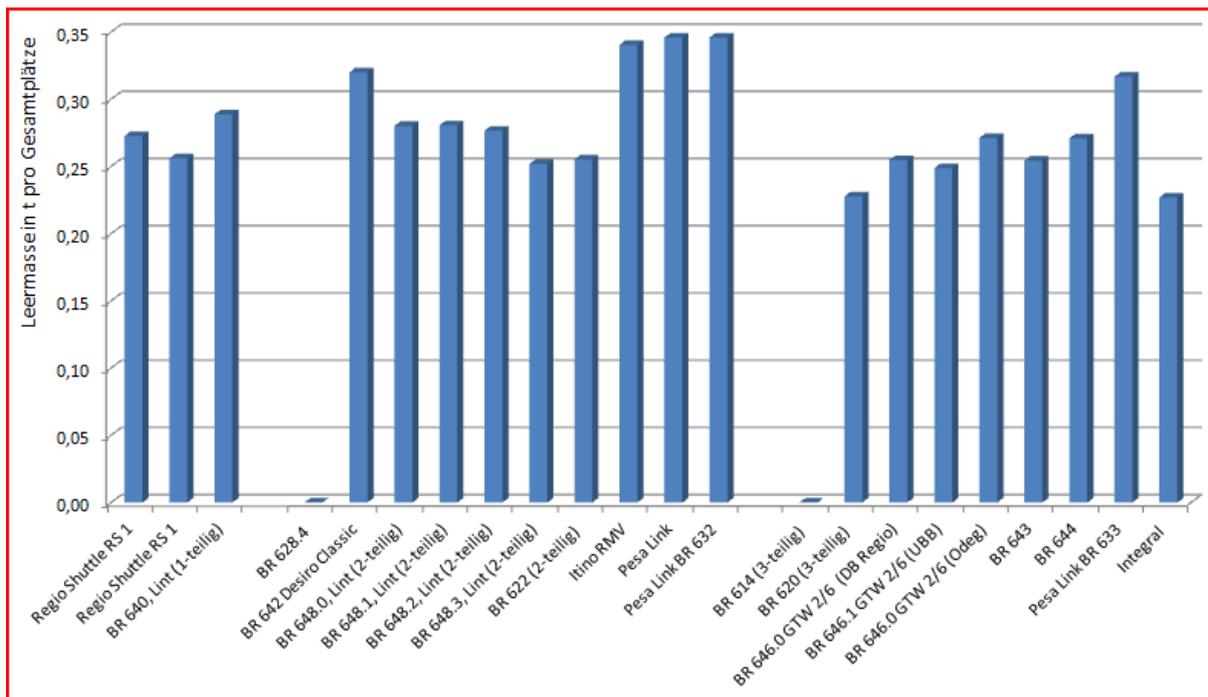


Abb. 2-22: Vergleich Leermasse in t pro Anzahl der Gesamtplätze für Brennkrafttriebwagen

Im Vergleich der Fahrzeuge aus den drei Einsatzgebieten ergibt sich somit die Darstellung in Abb. 2-23. Hier lässt sich ein geringfügiger Vorteil für die Brennkrafttriebwagen erkennen, die bei der Masse pro Sitzplatz tendenziell leichter als die Elektrotriebwagen sind und auch bei der Masse bezogen auf die Gesamtplätze gleichauf mit den Elektrotriebwagen liegen.

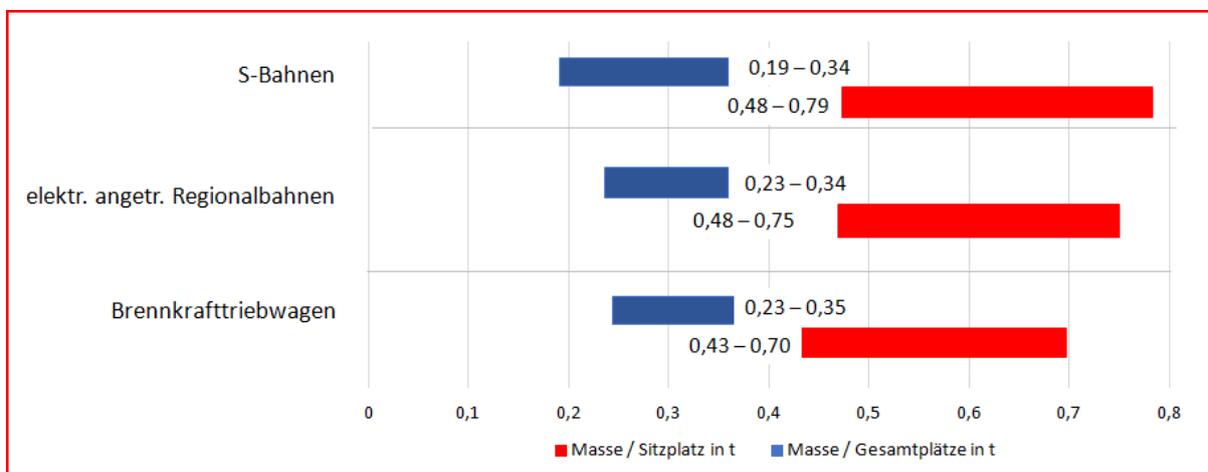


Abb. 2-23: Gegenüberstellung der bezogenen Massen

Dieser Aussage soll nun durch die Betrachtung von Fahrzeu­gleermasse pro Meter Fahrzeu­glänge wei­ter auf den Grund gegangen werden. Dazu enthält Abb. 2-24 den Gesamtüberblick über alle Baureihen und Abb. 2-25 den Überblick gegliedert nach den Fahrzeugtypen entsprechend Abb. 2-2.

Auch hier fallen natürlich wieder Unterschiede zwischen den Fahrzeugen auf, aber die Differenzen sind gering. Der Wertebereich liegt hier bei 1,4 bis 2,3 t/m, wobei die hohen Werte von der Baureihe 420 und der Kombination einer Lok mit drei Doppelstockwagen herrühren. Vernachlässigt man diese beiden, so liegt der Spitzenwert bei 2,11 t/m, für die Variante aus Lok und fünf Doppelstockwagen.

Die Darstellung nach Abb. 2-25 zeigt tendenziell masserelevante, konzeptionelle Unterschiede. Unter dem Gesichtspunkt der geringen Masse in allen Kategorien (pro Sitzplatz, pro Gesamtplatz oder pro Meter) fallen die Typen 1, 4 und 5 auf. Dabei handelt es sich ausschließlich um Brennkrafttriebwagen.

Ob hier ausschließlich die Art der Traktionsausrüstung den Unterschied erzeugt, wird im Kapitel 3.3 noch betrachtet.

These: Man kann nach diesen Auswertungen postulieren, dass es offensichtlich ein relevantes Leichtbaukonzept bei den Schienenfahrzeugen, welcher zu einem besonderen Vorteil gegenüber anderen Konzepten führt, nicht gibt, anders als es in der Fachliteratur, z.B. in [31], dargestellt wird.

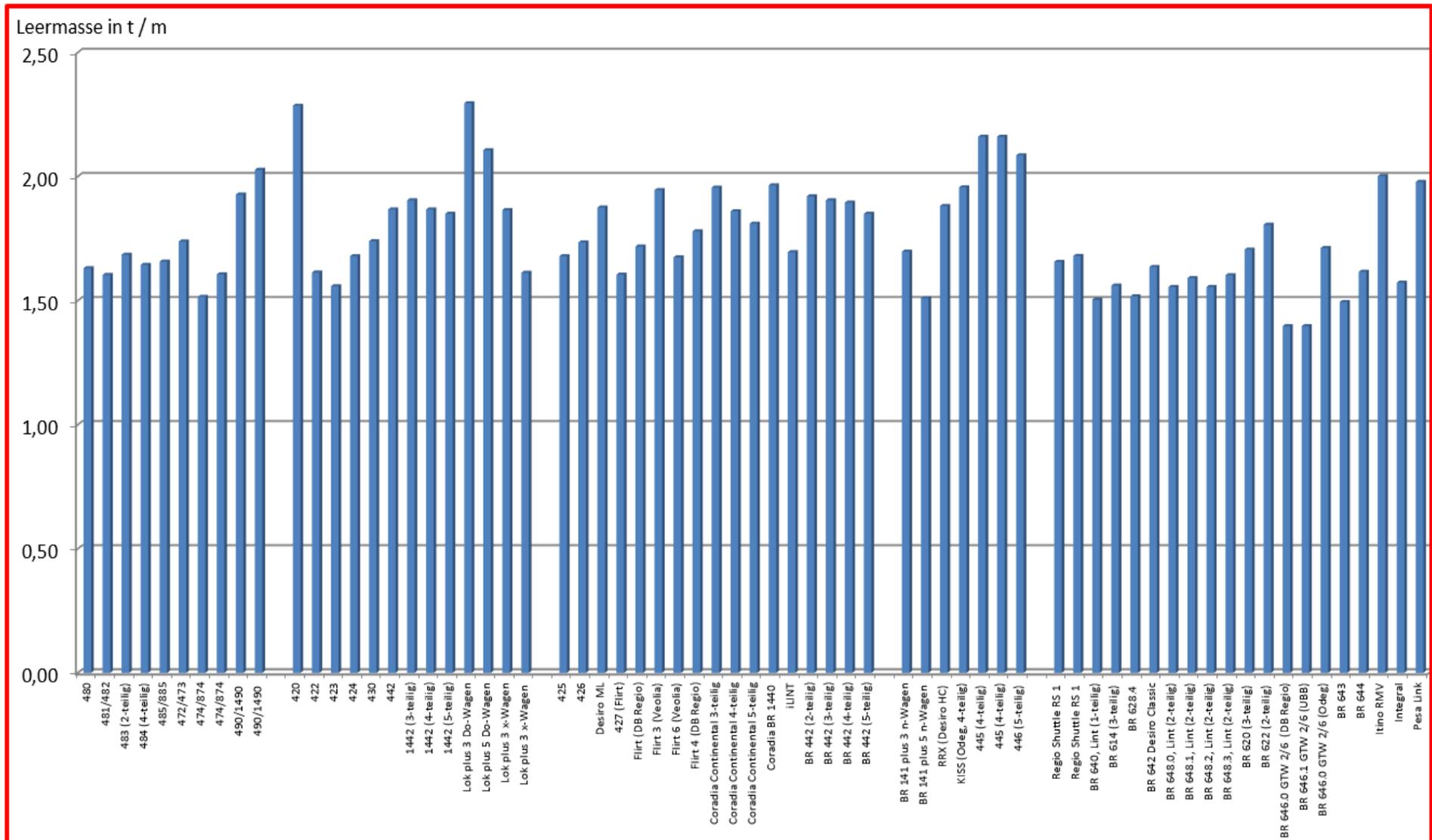


Abb. 2-24: Gegenüberstellung der bezogenen Masse in t/m für alle betrachteten Fahrzeuge nach Tabelle 2-1 bis 2-5

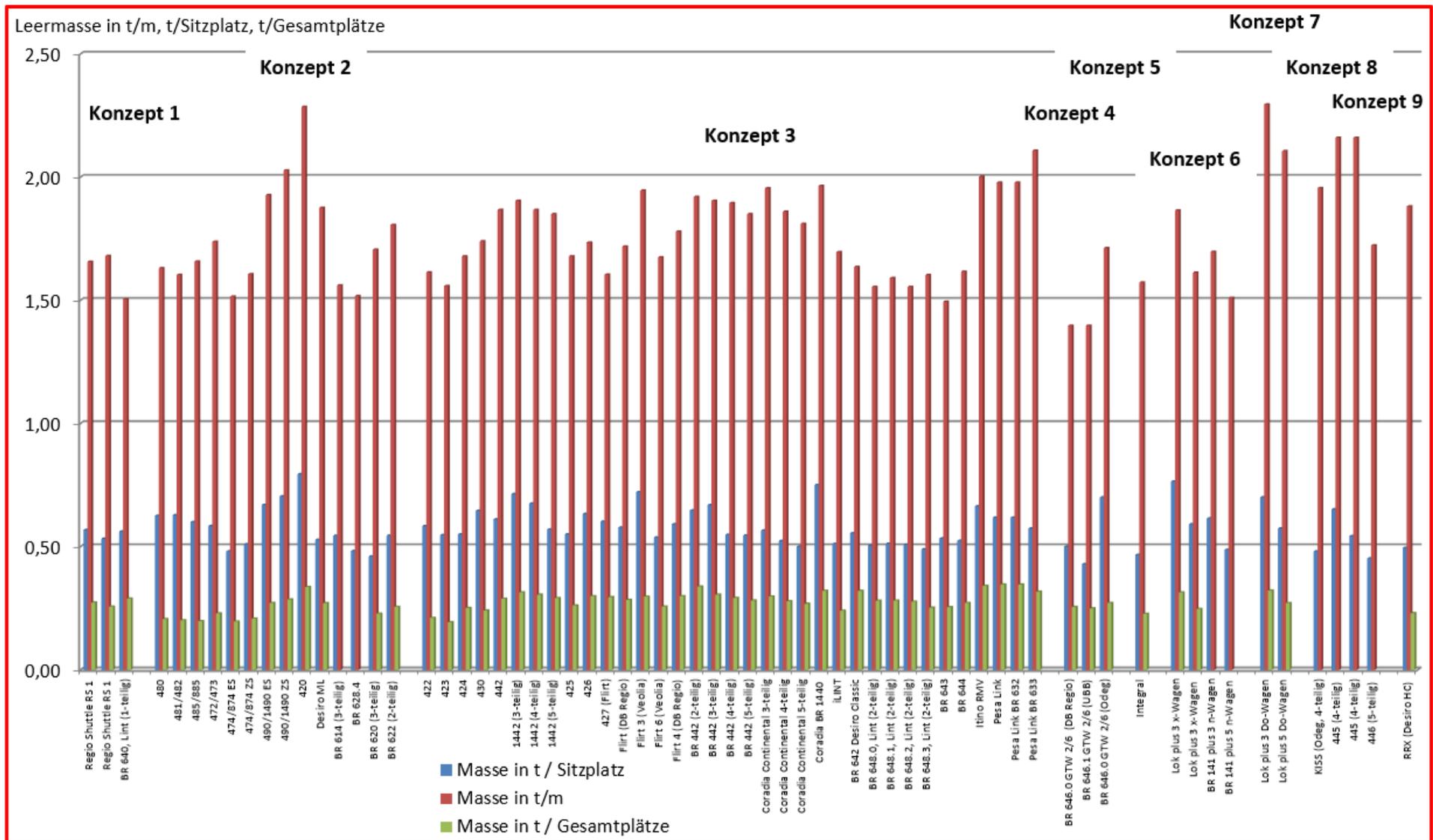


Abb. 2-25: Gegenüberstellung der bezogenen Massen für alle betrachteten Fahrzeuge nach Tabelle 2-1 bis 2-5 nach Fahrzeugtyp

Setzt man nun die Gesamtkapazität ins Verhältnis zum Leergewicht der Fahrzeuge in den drei Einsatzgebieten S-Bahn, elektrisch angetriebene Regionalbahnen und Brennkrafttriebwagen erhält man die Darstellung in Abb. 2-26.

Wählt man als Referenz eine Masse von 500 kg/Sitzplatz und trägt die entsprechenden Werte für alle betrachteten Fahrzeugtypen in gleicher Weise ein, so erhält man eine Werteschar, die zunächst mal die Häufigkeitsverteilung, aber auch den Gesamttrend aller Fahrzeugmassen darstellt. Jeder Punkt der drei Grafiken steht für ein Fahrzeug, aus Gründen der Übersichtlichkeit sind diesmal die einzelnen Bauweisen nicht explizit erwähnt.

Diese Form der Darstellung erfolgt für die drei in dieser Arbeit betrachteten Einsatzgebiete in gleicher Weise, die Referenzlinie hat in allen drei Graphen die gleiche Steigung. Jeder Datenpunkt unterhalb der roten Referenzlinie steht für ein Fahrzeug, welches schwerer als die Referenz von 0,5 t/Sitzplatz ist. Praktisch alle S-Bahnen liegen unterhalb dieser Linie, die elektrisch angetriebenen Regionalbahnen liegen nur bei Kapazitäten von 400 und mehr Sitzplätzen über der Linie, während ausschließlich die Brennkrafttriebwagen entlang der Referenzlinie verteilt sind.

Ein konzeptionell besonderes Fahrzeug müsste deutlich sichtbar oberhalb der Referenzlinie liegen, was aber nicht der Fall ist.

Um die Betrachtungen zu vervollständigen, zeigt Abb. 2-27 diesmal den Zusammenhang zwischen Leermasse und Gesamtplätzen. Hier lässt sich jedoch erkennen, dass zumindest bei den S-Bahnen eine erhebliche Menge von Fahrzeugen oberhalb der Referenzlinie liegt, welche diesmal einheitlich für alle Einsatzgebiete bei 0,25 t pro Gesamtplatz liegt. Wegen entsprechend großer Stehfläche lässt sich für diese Formen des Vergleiches gegenüber allen anderen Fahrzeugarten hier ein Vorteil darstellen. Auch dies stellt aber keinen konzeptionellen Leichtbau dar, sondern ist der speziellen Form dieses Vergleiches geschuldet.

Diese visualisierte Darstellung der Abb. 2-26 und 2-27 untermauert die oben genannte These, dass die Fahrzeugmasse in direkter Abhängigkeit von der Transportkapazität und spezifischen Wünschen der Besteller bzgl. der Ausstattung steht und keines der untersuchten Fahrzeugkonzepte ein Beispiel für konzeptionellen Leichtbau darstellt.

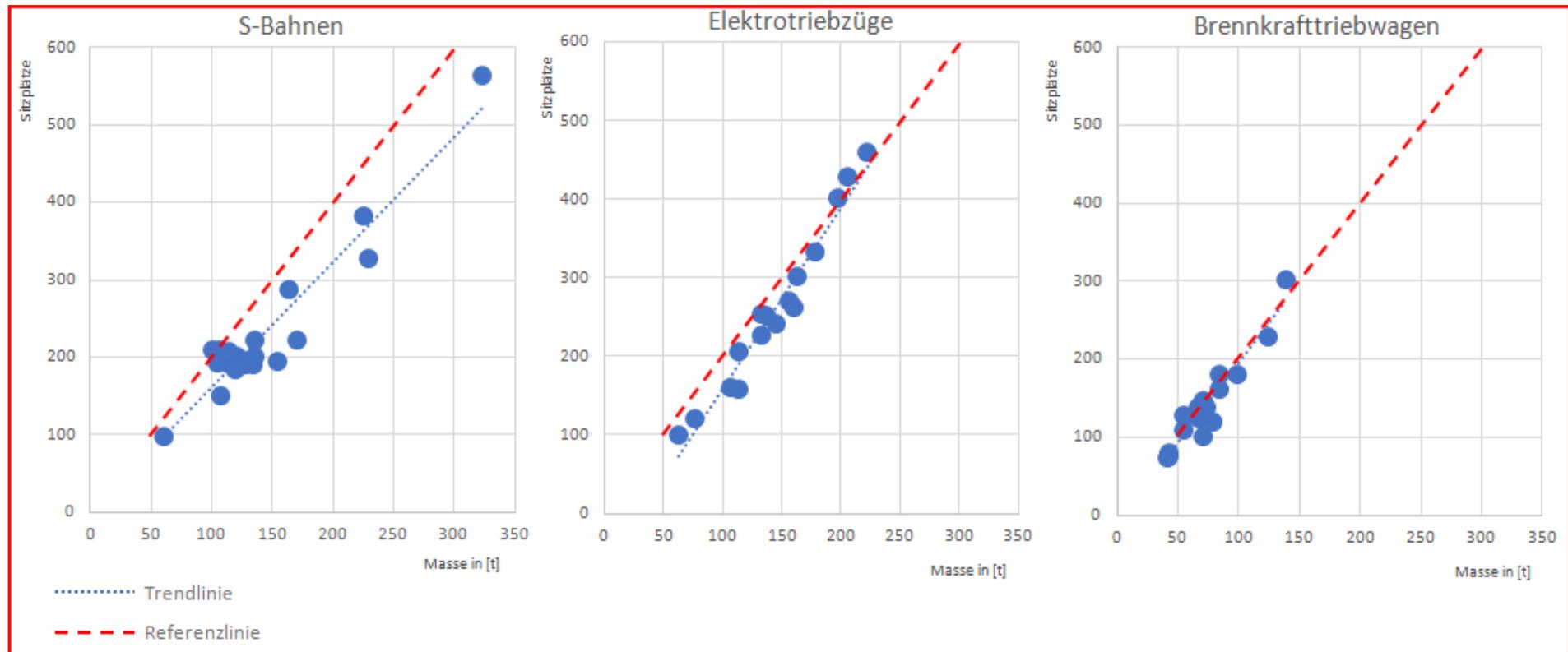


Abb. 2-26: Darstellung der Sitzplätze über Leermasse nach Einsatzgebiet der betrachteten Fahrzeuge

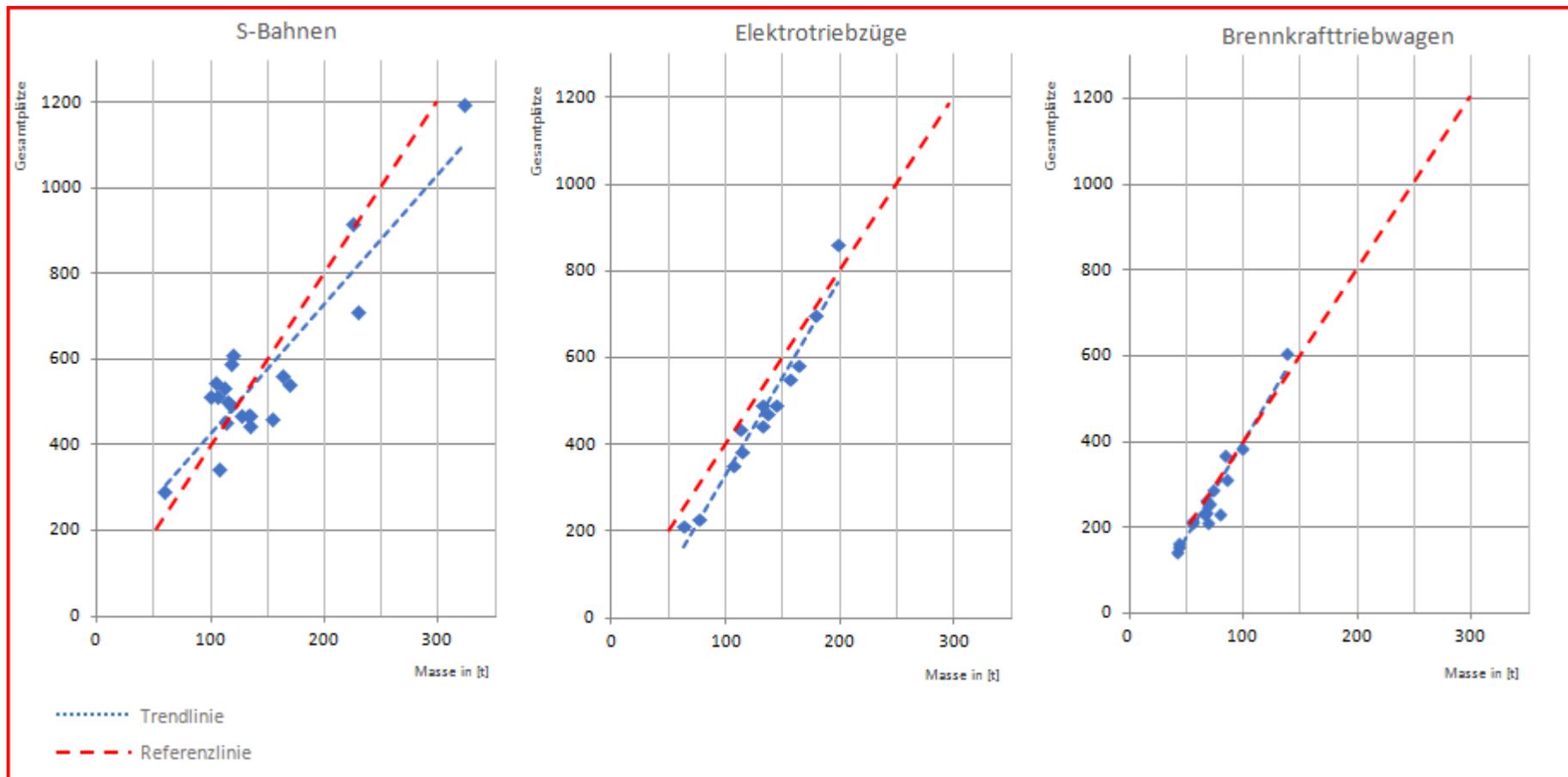


Abb. 2-27: Darstellung der Gesamtplätze über Leermasse nach Einsatzgebiet der betrachteten Fahrzeuge

2.3.5 Blick über die Landesgrenze zu anderen Fahrzeugkonzepten

Nachdem es bisher nicht möglich war, bei den in Deutschland gängigen Fahrzeugkonzepten ein herausragendes Beispiel für signifikanten, konzeptionellen Leichtbau zu finden, geht der Blick über die Grenzen des Landes. Einige der im Ausland eingesetzten Fahrzeugkonzepte kommen in Deutschland gar nicht zur Anwendung, andere sind gegenüber den hiesigen Varianten anders ausgeprägt.

Aufgrund der häufig anderen Spannungsversorgung fokussiert sich der Blick auf die Länder mit 15 kV-Versorgungsspannung und/oder Brennkrafttriebwagen, aber auch einige besondere Fahrzeuge mit Gleichstromtechnik (die zu den deutschen S-Bahnen ins Verhältnis gesetzt werden können) und französische Fahrzeuge für 25 kV werden aufgrund ihrer interessanten Konzeption betrachtet.

In Ergänzung zu Abb. 2-2 werden damit 3 zusätzliche Fahrzeugkonzepte betrachtet (siehe Abb. 2-28):

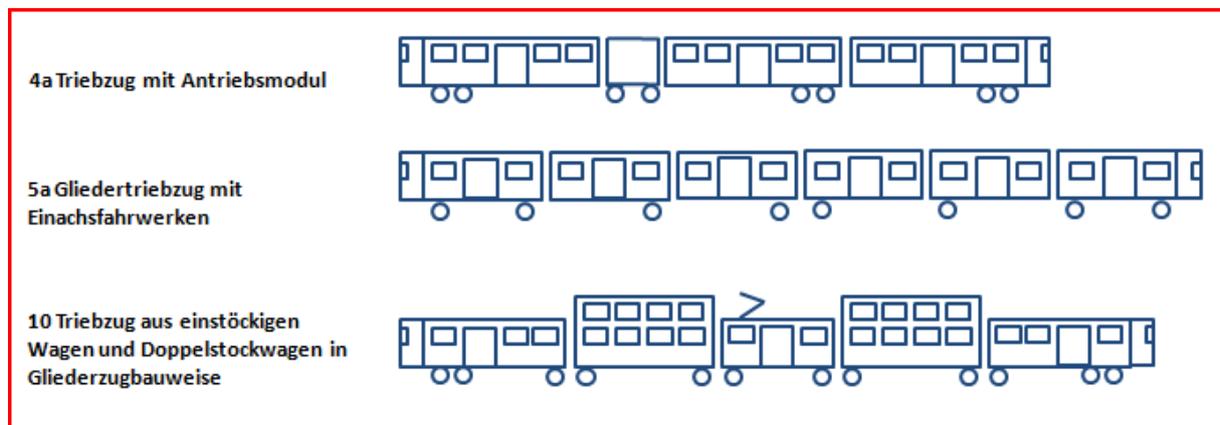


Abb. 2-28: Gegenüberstellung der ergänzenden drei Fahrzeugkonzepte

Beim Konzept 4a handelt es sich prinzipiell um den bereits betrachteten Gelenktriebwagen GTW der Fa. Stadler (BR 646.0 bzw. 646.1), allerdings ist dieser in der Ausführung für die österreichische GKB gegenüber dem Konzept 4 aus Abb. 2-2 um einen Wagen verlängert worden.

Konzept 5a ist mit der S-Bahn Kopenhagen das wohl bekannteste Modell einer Baureihe mit Einachsfahrwerken und kommt den Grundgedanken aus [31] zu einem Leichtbaukonzept am Nächsten. Aufgrund der Ausführung mit Einachsfahrwerken wird dieses Konzept als Variante des Gliedertriebzuges angesehen und nicht als völlig eigenständiges Konzept.

Das Konzept 10 ist die Mischung aus den Konzepten 3 und 9. Hierbei handelt es sich um den französischen Triebzug „Regio 2N“ oder auch „Omneo“ genannt.

Dazu kommen weitere Baureihen, die aber den bereits in Tabelle 2-2 definierten Typen entsprechen. Insgesamt werden 16 weitere Fahrzeuge in gleicher Art wie in den Kapiteln 2.3.1, 2.3.2 und 2.3.4 verglichen.

Die Tabellen 2-7-1 und 2-7.2 geben die wesentlichen Kenndaten der betrachteten Fahrzeuge wieder.

Lfd. Nr.	Bauart/ Baureihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatzkapazität	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegs- höhe in mm	Anzahl FGR- Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Tür- spuren pro Fzg.-Seite	Sitzteiler in mm	Dienst- masse in t	Max. Rad- satz- last in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Vorwiegendes Ein- satzgebiet
7.1	IC 3, Contessa	78,9	237	-	600	4	8	-	156	18,5	180	1 U-WC 1 S-WC	Klappbarer Führer- stand („Gum- minase“)	Verbindung zwi- schen Dänemark und Schweden
7.2	S-Bahn Kopen- hagen [14]	83,76	336	360	1.100	8	24	-	122	22	120	ohne	DC 1.650V, Glieder- zug; Breite 3.600 mm	S-Bahn Kopenhagen
7.3	Omneo kurz 1 [26], [27]	80,945	350	310	600	6	12	-	197*	20	160	1 U-WC 2 S-WC	Ein- und doppelstö- ckiger Gliedertrieb- zug; Zweisystem- fahrzeuge für 1,5kV DC und 25 kV AC; Wagenbreite bis 3,05 m	Frankreich
7.4	Omneo kurz 2 [26], [27]	82,695	366	322		6	12	-	201					
7.5	Omneo mittel [26], [27]	94,975	440	365		6	18	-	231*					
7.6	Omneo lang [26], [27]	109,91	520	440		8	24	-	267*					
7.7	AGC, 3-teilig	57,4	208	200	590	3	6	1.750	133,3	17	160	1 U-WC 4 S-WC	Gliedertriebzug mit dieselektrischem Antrieb	Frankreich
7.8	AGC, 4-teilig	72,8	272	251		4	8		161,2					
7.9	AGC, 3-teilig	57,4	208	200		3	6		124,9					
7.10	AGC, 4-teilig	72,8	272	251		4	8		152,8					
7.11	Spacium 7-teilig [28]	94,3	345	468	985	7 x 1950	21	-	210	-	160	ohne	Gliedertriebzug für 1,5kV DC und 25 kV AC	Frankreich, Groß- raum Paris
7.12	Spacium 8-teilig [28]	112,5	425	552		8 x 1950	24	-	235	-			Gliedertriebzug für 1,5kV DC und 25 kV AC	Frankreich, Groß- raum Paris
7.13	S-Bahn Zürich Re 4/4, 450 [29], [30]	98,8	387	501	690 (Klapp- tritt)	6	18	1.650, 2.000	210,5	-	130	ohne	Doppelstockzug mit Triebkopf	S-Bahn Zürich
7.14	S-Bahn Zürich RABe 511 (Kiss)	150	526	846	570	12	24	-	296	-	160		Doppelstocktriebzug	S-Bahn Zürich
7.15	GTW 2/8 für GKB	55,937	165	-	600	3	6	1.800, 1.100	93	-	140	1 U-WC	Dieselektrischer Antrieb	Österreich
7.16	WINK [32]	55,5	151	-	-	3	6	-	96*	18	140	1 U-WC	Dieselektrischer Antrieb und 1,5 kV DC	Niederlande

Tabelle 2-7.1: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter von Fahrzeugbaureihen, die nicht in Deutschland eingesetzt werden (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

Lfd. Nr.	Bauart/ Bau-reihe	Länge über Kupplung in m	Sitzplatzkapazität	Stehplätze bei 4 Pers./m ²	Einstiegs-höhe in mm	Anzahl FGR-Türen pro Fzg.-Seite	Anzahl Türspuren pro Fzg.-Seite	Sitzteiler in mm	Dienst-masse in t	Max. Rad-satz-last in t	V _{max} in km/h	WC	Besonderheit	Vorwiegendes Ein-satzgebiet	
7.17	ÖBB Cityjet (S-Bahn Version) [62]	75,152	244	-	600	6	12	1.800, 800	145,4	17	160	1 U-WC	3-teiliger Triebzug für 15 und 25 kV-Betrieb	Österreich	
7.18	ÖBB Cityjet (Regional-Bahn Version) [62]		259	-		4	8		150*				140 / 120		3-teiliger Triebzug für 15 und 25 kV-Betrieb
7.19	ÖBB Cityjet ECO		244	-		6	12		150*				140 / 120		3-teiliger Triebzug für 15 und 25 kV-Betrieb sowie zusätzliche Traktionsbatterie; Prototyp
7.20	Talent ÖBB Rh 4023	52,05	151	160	590	4	8	1.650, 1.750	94,5	-	140	1 S-WC	3-teiliger Triebzug für 15 kV-Betrieb	Österreich	
7.21	Trenitalia Rock (4-teilig)	109,2	478	-	580	8	16	1.600, 800	218,14	19,5	160	1 U-WC 1 S-WC	4-teiliger Doppelstockzug für 3 kV; einflügelige Ta-schenschiebetüren	Italien	
7.22	Trenitalia Rock (5-teilig)	136,84	614	-		10	20		265,3				5-teiliger Doppelstockzug für 3 kV; einflügelige Ta-schenschiebetüren		
7.23	KISS für Mälartag	104,81	357	-	605	8	16	-	300*	-	200	1 U-WC, 2 S-WC	4-teiliger Doppelstockzug für 15 kV; überbreites Fahrzeug	Schweden	
7.24	KISS für Westbahn	150	526	-	570	12 (1-flügelige Türen)	24	-	296*	-	200	1 U-WC, 8 S-WC	6-teiliger Doppelstockzug für 15 kV; einflügelige Schwenkschiebetüren	Österreich	

Tabelle 2-7.2: Vergleich wesentlicher Fahrzeugparameter von Fahrzeugbaureihen, die nicht in Deutschland eingesetzt werden (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben), alle Angaben jeweils für die kleinste betrieblich einsetzbare Fahrzeugkonfiguration

Die Darstellung in Abb. 2-29 zeigt die längenbezogene Kapazität der betrachteten Fahrzeuge. Vergleicht man diese Abbildung mit der Darstellung von Abb. 2-11, so fällt die insgesamt höhere Kapazität der ausländischen Fahrzeugtypen auf. Werte zwischen 4 und 4,5 Sitzplätzen pro Meter bzw. 8 und 9 Gesamtplätzen pro Meter hat kein in Deutschland im Einsatz befindliches Fahrzeug gezeigt. Es liegen zwar nur für eine geringe Anzahl von Fahrzeugtypen der Tabellen 2-7-1 und 2-7.2 Angaben zum Sitzteiler vor, aber die ausgewiesenen Werte unterscheiden sich kaum von den zuvor genannten Angaben.

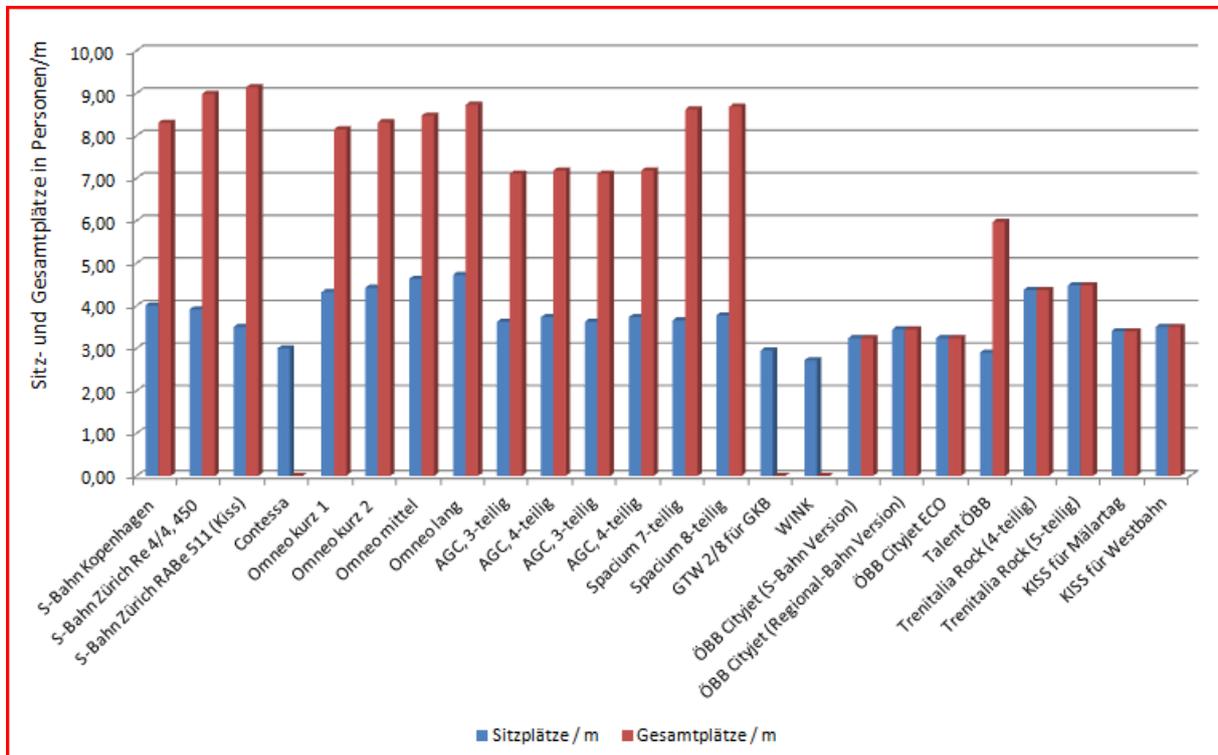


Abb. 2-29: längenbezogener Kapazitätsvergleich der Fahrzeuge aus Tabelle 2-7.1 und 2-7.2

Anders sieht es hingegen beim Vergleich der Türspuren bezogen auf Sitzplätze und Gesamtplätze aus. Abb. 2-29 zeigt, dass z. B. die ausländischen Fahrzeuge für den S-Bahn- und Ballungsraumverkehr mit 16 bis 21 Sitzplätzen pro Türspur im Schnitt fast doppelt so hohe Werte wie deutsche S-Bahnen aufweisen. Der Kapazitätsvorteil wird also gegen eine längere Fahrgastwechselzeit eingetauscht. Bei den Regionalbahnen, sowohl elektrisch als auch mit Dieselmotor angetrieben, ist ein Unterschied hingegen nicht erkennbar.

Etwas schwierig wird die Bewertung bei den Fahrzeugen der S-Bahn Kopenhagen, da diese wegen der sehr kurzen Wagenkästen um fast 600 mm breiter ist als alle anderen betrachteten Bahnen dieses Vergleiches. Da dieser Breitenzuwachs allerdings nicht auf Fußbodenniveau, sondern auf Sitzniveau stattfindet, gibt es hier einen echten Kapazitätzuwachs, der sich auch bei einem m²-Vergleich nicht herausarbeiten ließe (siehe Abb. 2-31, Querschnitt S-Bahn Kopenhagen aus [34]).

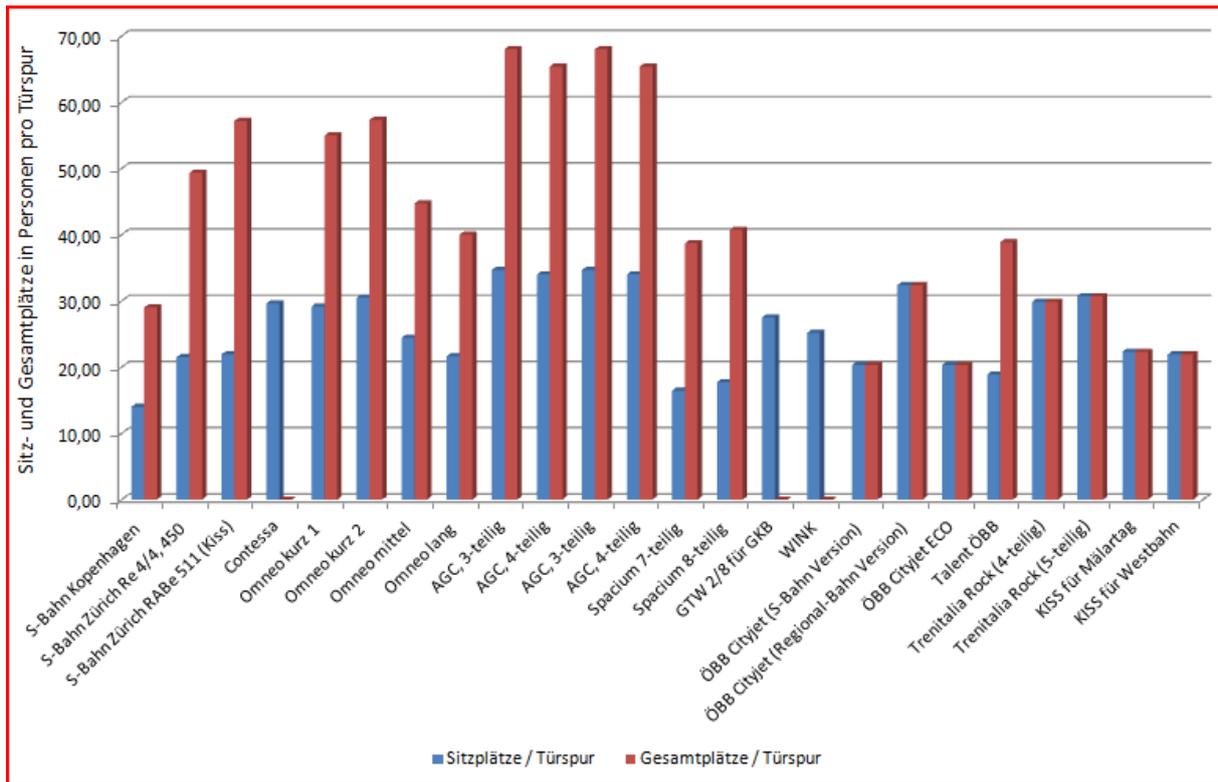


Abb. 2-30: Vergleich der Sitzplätze und Gesamtplätze pro Türspur der Fahrzeugtypen von Tabelle 2-7.1 und 2-7.2

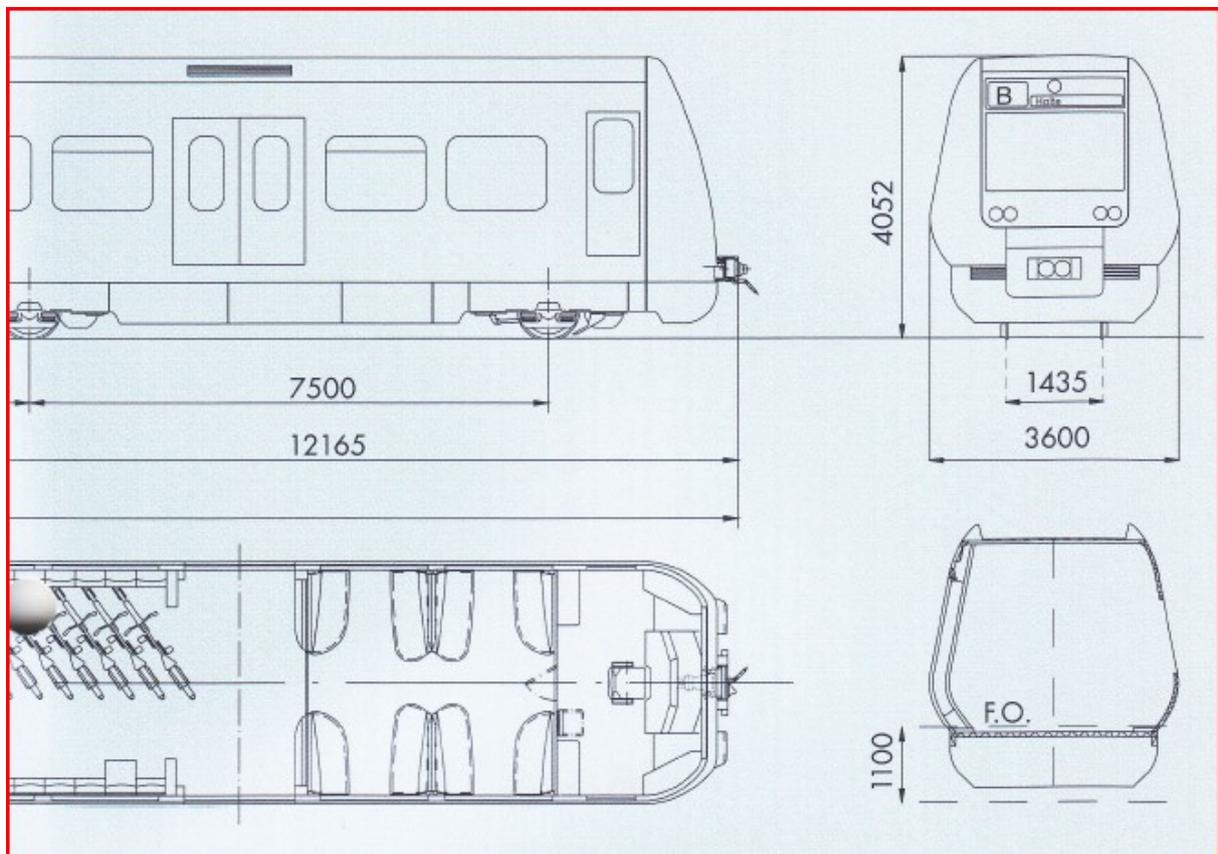


Abb. 2-31: Querschnitt S-Bahn Kopenhagen, Ausschnitt aus [34]

Beim Vergleich der Massen zeichnet sich die S-Bahn Kopenhagen mit einem Wert von 1,46 t/m als besonders leicht aus, gefolgt vom GTW, welcher ebenfalls, wie schon bei den in Deutschland eingesetzten Fahrzeugen, ein sehr leichtes Fahrzeug ist (siehe Abb. 2-32).

Dabei muss man allerdings bedenken, dass die S-Bahn Kopenhagen ein Gleichstromfahrzeug ist und aufgrund der transformator- bzw. dieselmotorfreien Antriebstechnik nur mit den Berliner und Hamburger S-Bahnen direkt verglichen werden kann. Diese sind dann allerdings mit Werten zwischen 1,6 und 2,03 t/m als Drehgestellfahrzeuge vom Konzept 2 schon deutlich schwerer.

Die doppelstöckigen Fahrzeuge liegen auf ähnlichem Niveau, wie die in Deutschland eingesetzten Doppelstockwagen.

Weiterhin zu berücksichtigen ist bei den Massevergleichen, dass die französischen Fahrzeuge außer den drei- und vierteiligen AGC allesamt Zweisystemfahrzeuge sind, jedoch auf der Wechselstromseite in der gegenüber der 15 kV-Technik etwas leichteren 25 kV Ausführung.

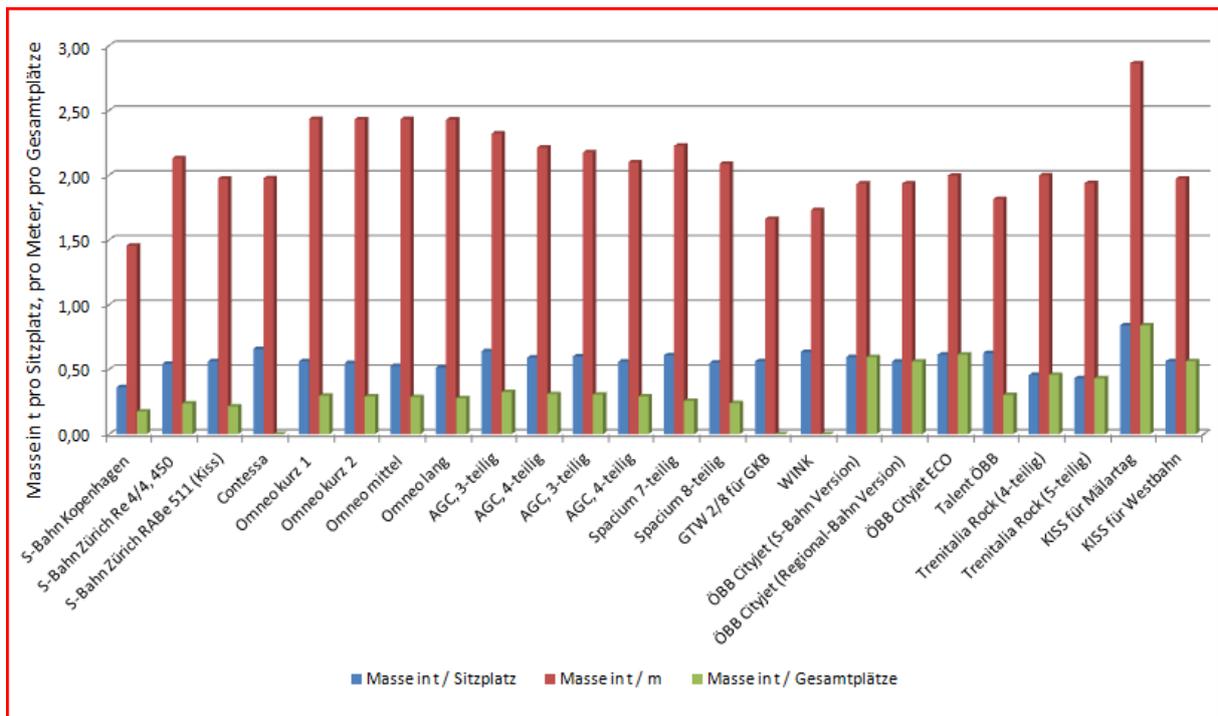


Abb. 2-32: Vergleich der bezogenen Massen der Fahrzeugtypen von Tabelle 2-7.1 und 2-7.2

3. Auswertung zum Stand der Technik

3.1 Effizienz

Entsprechend der Vorbetrachtungen in den Kapiteln 2.3.1 bis 2.3.5 lässt sich kein Fahrzeugkonzept erkennen, welches deutliche Vorteile gegenüber anderen Konzepten bietet. Es sind häufig Vorteile in einem ausgewählten Betrachtungspunkt, die herausstechen, während dann gleichzeitig bei anderen Betrachtungspunkten keine Spitzenwerte erreicht werden. In Tabelle 3-1 sind nun die Fahrzeuge gelistet, welche in einer der vorangegangenen Betrachtungen zu bezogenen Werten im Vergleich besonders gut (grün markiert) oder besonders schlecht (rot markiert) abgeschnitten haben. Es gibt kein Fahrzeug aus dem Vergleich, welches in mehr als einem Kriterium herausragt. Drei Fahrzeuge sind zwar mit doppelter Farbmarkierung gekennzeichnet, hier handelt es sich aber um Variationen zur gleichen Betrachtung (z.B. Sitzplätze pro Türspur und Gesamtplätze pro Türspur).

Andererseits kann man feststellen, dass von praktisch jedem Fahrzeugtyp nach Abb. 2-2 und Abb. 2-28 Beispiele vertreten sind, ebenso von jeder Traktionsart und von jedem betrachteten Einsatzgebiet.

Bauart/ Baureihe	Sitzplätze /m	Gesamtplätze / m	Sitzplätze/ Türspur	Gesamtplätze/ Türspur	Masse / Sitzplatz in t	Masse/m in t/m	Masse in t / Gesamtplätze
483 (2-teilig)	2,17	7,28	6,67	22,33	k. A	k. A	k. A
485/885	2,76	8,40	6,25	19,00	0,60	1,66	0,20
420	2,88	6,80	8,08	19,08	0,79	2,28	0,34
Flirt (DB Regio)	2,97	6,06	33,75	68,75	0,58	1,72	0,28
BR 442 (2-teilig)	2,97	5,69	29,75	57,00	0,65	1,92	0,34
445 (4-teilig)	4,77	k. A	31,50	k. A	k. A	k. A	k. A
BR 628.4	3,15	k. A	36,50	k. A	0,48	1,52	k. A
BR 642 Desiro Classic	2,95	5,11	30,75	53,25	0,55	1,64	0,32
BR 646.0 GTW 2/6 (DB Regio)	2,79	5,48	27,00	53,00	0,50	1,40	0,25
BR 646.1 GTW 2/6 (UBB)	3,26	5,61	31,50	54,25	0,43	1,40	0,25
S-Bahn Kopenhagen	4,01	8,31	14,00	43,50	0,36	1,46	0,18
S-Bahn Zürich RABe 511 (Kiss)	3,51	9,15	21,92	57,17	0,56	1,97	0,22
Omneo kurz 2	4,43	8,32	30,50	57,33	0,55	2,43	0,29

Tabelle 3-1: Vergleich der besten und schlechtesten Werte für ausgewählte bezogene Werte

Um hier ein herausragendes Fahrzeugkonzept ableiten zu können, bedarf es also einer anderen, gesamtheitlichen Betrachtungsweise.

Daher wird nun ein Wirkungsgrad oder Effizienzgrad „E“ definiert, welcher diese gesamtheitliche Betrachtung unterstützen soll. Dafür eignen sich von den in Tabelle 3-1 aufgeführten sieben Bezugsgrößen insbesondere die folgenden drei (in der Tabelle gelb gekennzeichnet):

- Die Fahrzeugmasse pro Sitzplatz ist ein Maß für die Effizienz der Fahrgastbeförderung. Je weniger Masse pro Fahrgast eingesetzt werden muss, desto energetisch günstiger und umweltfreundlicher erfolgt die Beförderung, abgekürzt mit „A“.
- Die Fahrzeugmasse pro Meter Fahrzeuglänge zeigt, wie effizient die Ausrüstung im Fahrzeug verbaut wurde, wie effizient die eingesetzte Technik ist und welche Leichtbaupotentiale genutzt wurden, abgekürzt mit „B“.
- Die Sitzplätze pro Türspur sind ein Maß für den Komfort und schnellen, reibungsfreien Zugang zum Fahrzeug und für den Ausstieg aus dem Fahrzeug, abgekürzt mit „C“.

Für die Effizienz der Beförderung gilt somit:

$$E = x \times A + y \times B + z \times C$$

[Gl 3]

mit x, y und z als Gewichtungsfaktoren.

Es gilt:

- A als Masse / Sitzplatz
- B als Masse / Meter
- C als Sitzplätze / Türspur

Die Masse wird in [t] angegeben, die Länge in [m], Türspuren und Sitzplätze sind einheitslos.

Hinweis: Gleichung 3 repräsentiert keine physikalische Gesetzmäßigkeit, sondern dient ausschließlich der Verbesserung des Vergleiches unterschiedlicher, teilweise gegenläufiger Eigenschaften. Daher werden die Faktoren A, B und C ohne Rücksicht auf die physikalischen Einheiten direkt addiert.

Die Wirksamkeit des Vergleichs gemäß Gl. 3 wird nachfolgend am Beispiel von drei Fahrzeugen in zusammen fünf Varianten demonstriert, nämlich der S-Bahn Kopenhagen, der Ein- und Zweisystemvariante der S-Bahn Hamburg (Baureihe 490/1490) und einer Lokomotive mit drei und fünf Doppelstockwagen.

Gemäß Tabellen 2-1, 2-2 und 2-7.1 gelten für diese Fahrzeuge die relevanten Daten, die in Tabelle 3-2 erneut zusammengefasst dargestellt sind:

Fahrzeug	Masse in t	Sitzplätze	Länge in m	Türspuren
S-Bahn Kopenhagen	122	336	83,76	24
S-Bahn Hamburg, ES	127,2	190	66	18
S-Bahn Hamburg, MS	133,8	190	66	18
Lok mit 3 Do-Wagen	229	327	99,77	16
Lok mit 5 Do-Wagen	323	563	153,37	24

Tabelle 3-2: Eingangsdaten zur Anwendung von Gl.3

Aus Tabelle 3-2 ergeben sich die in Tabelle 3-3 ermittelten Bezugsgrößen:

Fahrzeug	A Masse / Sitzplatz	B Masse / Meter	C Sitzplätze / Türspur
S-Bahn Kopenhagen	0,36 t / Sitzplatz	1,46 t / m	14 Sitzplätze / Türspur
S-Bahn Hamburg, ES	0,67 t / Sitzplatz	1,93 t / m	10,6 Sitzplätze / Türspur
S-Bahn Hamburg, MS	0,70 t / Sitzplatz	2,03 t / m	10,6 Sitzplätze / Türspur
Lok mit 3 Do-Wagen	0,70 t / Sitzplatz	2,29 t / m	20,4 Sitzplätze / Türspur
Lok mit 5 Do-Wagen	0,57 t / Sitzplatz	2,11 t / m	23,5 Sitzplätze / Türspur

Tabelle 3-3: Ermittlung der Bezugsgrößen A, B, C

Bei direkter Anwendung von Gl. 3 würde nun die Bezugsgröße C dominieren, da sie um Faktoren größer ist, als die Bezugsgrößen A und B. Aber auch die Größe B ist deutlich größer als Größe A. Um im Vergleich aber eine Ausgewogenheit der drei Bezugsgrößen zu erreichen, werden nun die Faktoren x, y und z verwendet, um eine Angleichung herbeizuführen.

Dabei werden folgende Korrektur-Werte gewählt:

- x = 2
- y = 1 und
- z = 1/10 = 0,1

Gemäß Tab. 3-4 ergeben sich damit für die drei ausgewählten Fahrzeuge folgende Effizienzwerte E:

Fahrzeug	A Masse / Sitzplatz	B Masse / Meter	C Sitzplätze / Türspur	Effizienz E
S-Bahn Kopenhagen	$2 \times 0,36 =$ 0,72 t / Sitzplatz	1,46 t / m	$0,1 \times 14 =$ 1,4 Sitzplätze / Türspur	3,58
S-Bahn Hamburg, ES	$2 \times 0,67 =$ 1,34 t / Sitzplatz	1,93 t / m	$0,1 \times 10,6 =$ 1,06 Sitzplätze / Türspur	4,33
S-Bahn Hamburg, MS	$2 \times 0,70 =$ 1,4 t / Sitzplatz	2,03 t / m	$0,1 \times 10,6 =$ 1,06 Sitzplätze / Türspur	4,49
Lok mit 3 Doppelstockwagen	$2 \times 0,70 =$ 1,4 t / Sitzplatz	2,29 t / m	$0,1 \times 20,4 =$ 2,04 Sitzplätze / Türspur	5,73
Lok mit 5 Doppelstockwagen	$2 \times 0,57 =$ 1,14 t / Sitzplatz	2,11 t / m	$0,1 \times 23,5 =$ 2,35 Sitzplätze / Türspur	5,60

Tabelle 3-4: Anwendung von Gl. 3 mit Korrekturfaktoren

Das in diesem Vergleich aller betrachteten Kenngrößen effizienteste Fahrzeug ist die S-Bahn Kopenhagen. Dieses Fahrzeug zeichnet sich durch eine sehr geringe Masse pro Meter Fahrzeuglänge bei gleichzeitig hoher Fahrgastkapazität bei weiterhin guter Zugänglichkeit dank der vielen Türspuren aus.

Im direkten Vergleich der beiden S-Bahn-Varianten zeigt sich bei gleicher Beförderungskapazität die geringere Masse der Einsystemvariante als entscheidend, um damit einen Effizienzvorteil gegenüber der Zweisystemvariante aufzuweisen.

Im Vergleich der bezogenen Masse pro Sitzplatz liegen die Zweisystemvariante der BR 490 und die Lokomotive mit drei Doppelstockwagen gleichauf, beim längenbezogenen Wert B, aber vor allem beim C-Wert, ergeben sich deutliche Nachteile der Lokomotiv-Variante. Die Variante der Lok mit fünf Wagen zeigt durch die geringere Masse bei gleichzeitig höherer Kapazität hier einen leichten Vorteil gegenüber der Variante mit nur drei Wagen.

Diese Darstellung zeigt, dass die Anwendung der Gleichung 3 plausibel eine Gesamteffizienz eines Fahrzeugkonzeptes abbilden und somit zu Vergleichszwecken herangezogen werden kann.

Die Gl. 3 wird nun auf sämtliche in Tabelle 2-1 bis 2-6 sowie 2-7.1 und 2-7.2 betrachteten Fahrzeuge angewendet, die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3-1 bis 3-8 dargestellt.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich betont, dass bei einer anderen Gewichtung und Auswahl der Korrekturfaktoren natürlich auch andere Ergebnisse ermittelt werden.

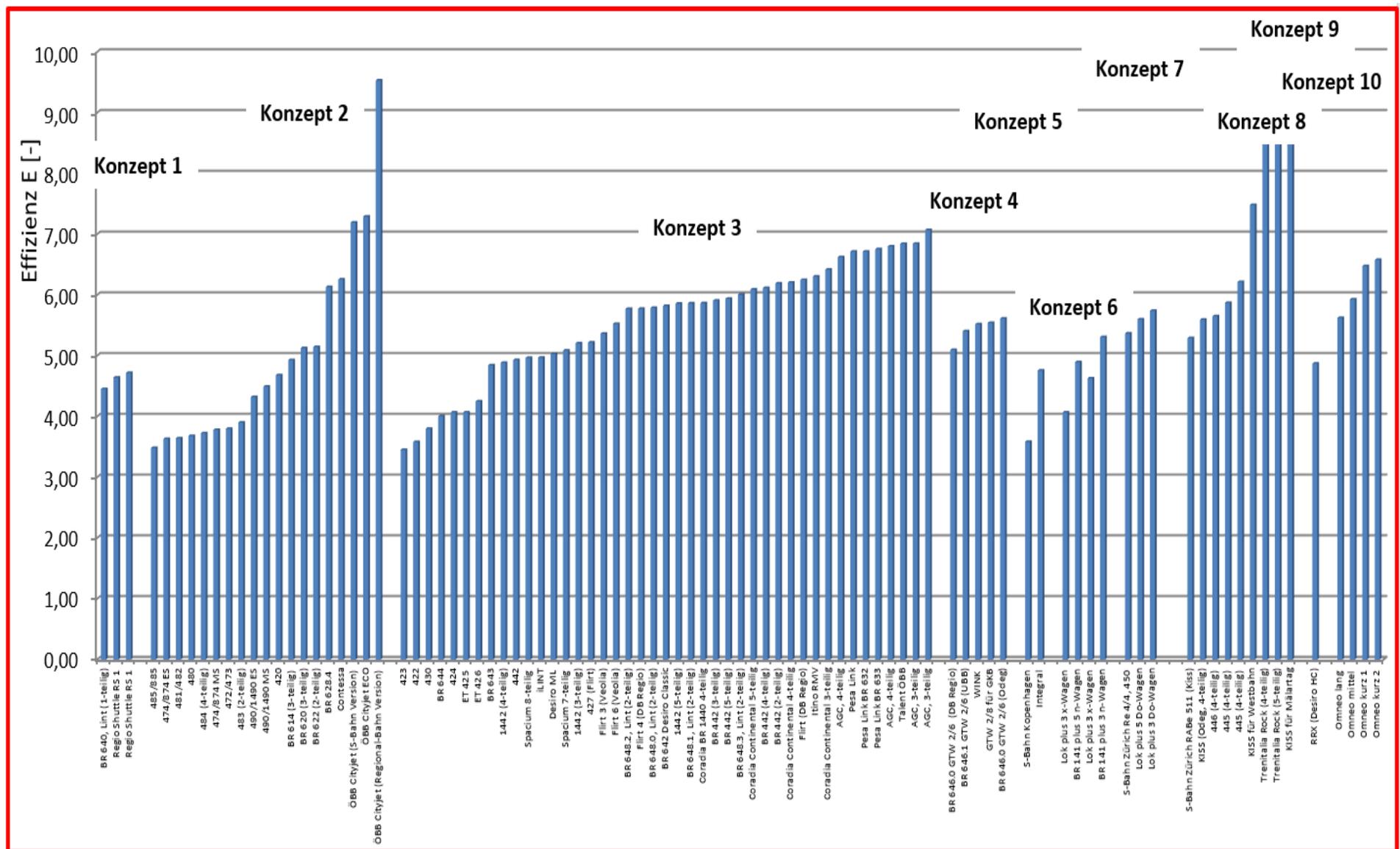


Abb. 3-1: Effizienz der betrachteten Fahrzeuge nach Anwendung der Gleichung 3 für alle Fahrzeugkonzepte

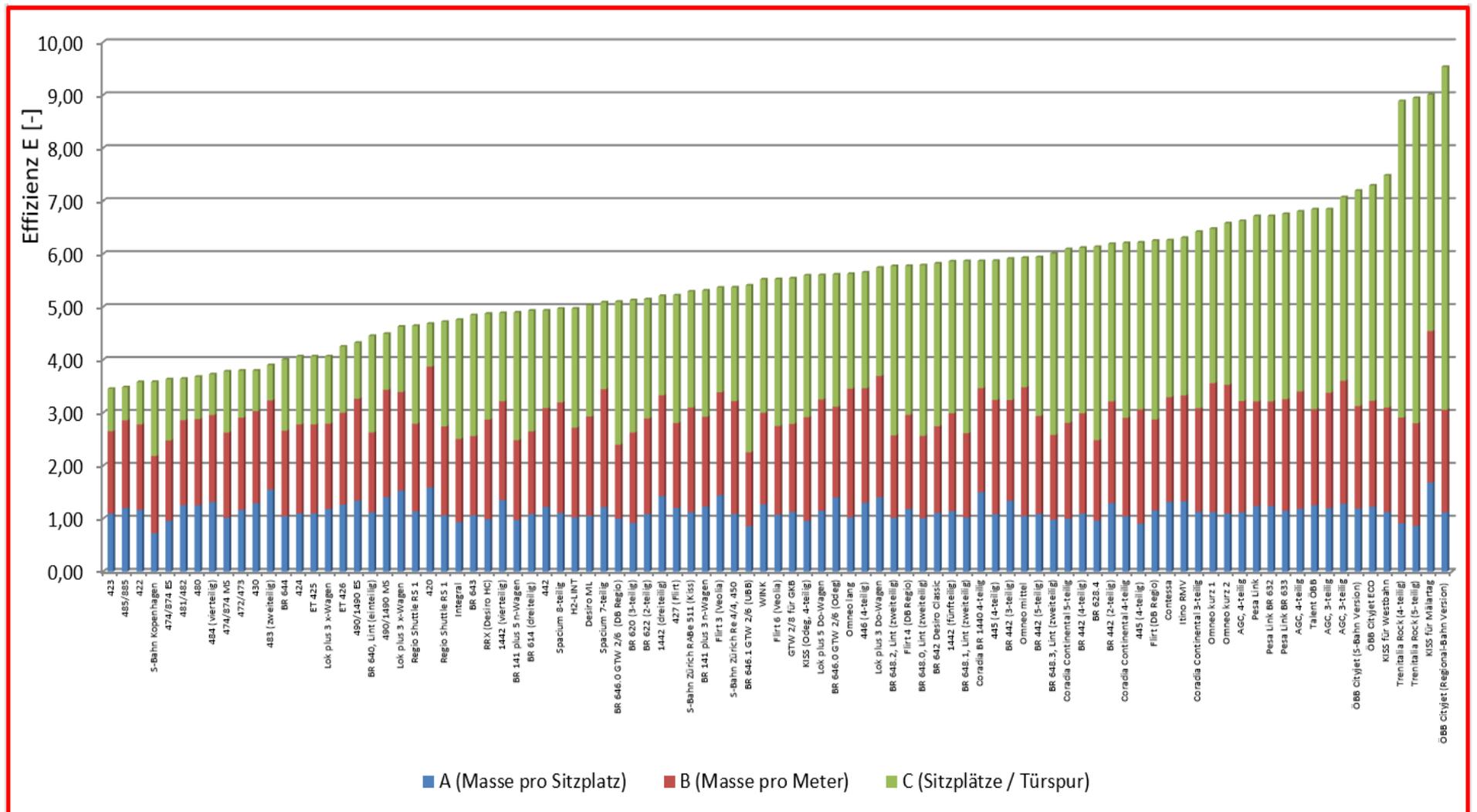


Abb. 3-2: Effizienz der betrachteten Fahrzeuge nach Anwendung der Gleichung 3, sortiert nach Effizienz mit Darstellung der drei Anteile A, B und C

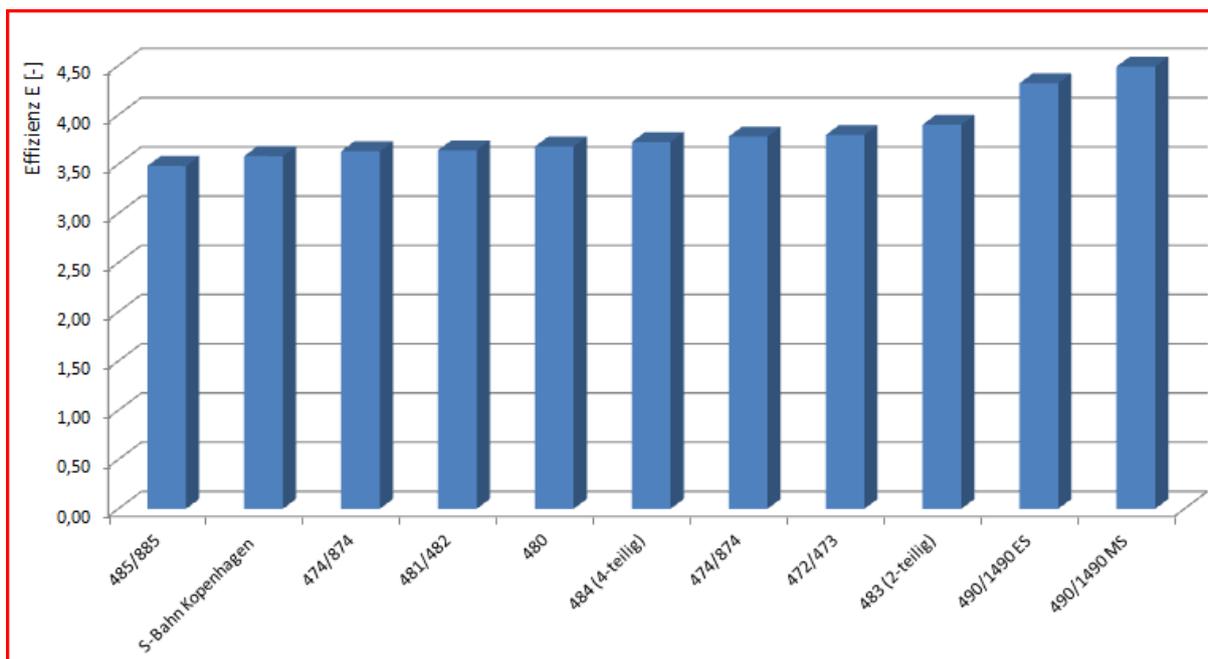


Abb. 3-3: Effizienz der betrachteten Gleichstrom-S-Bahnen

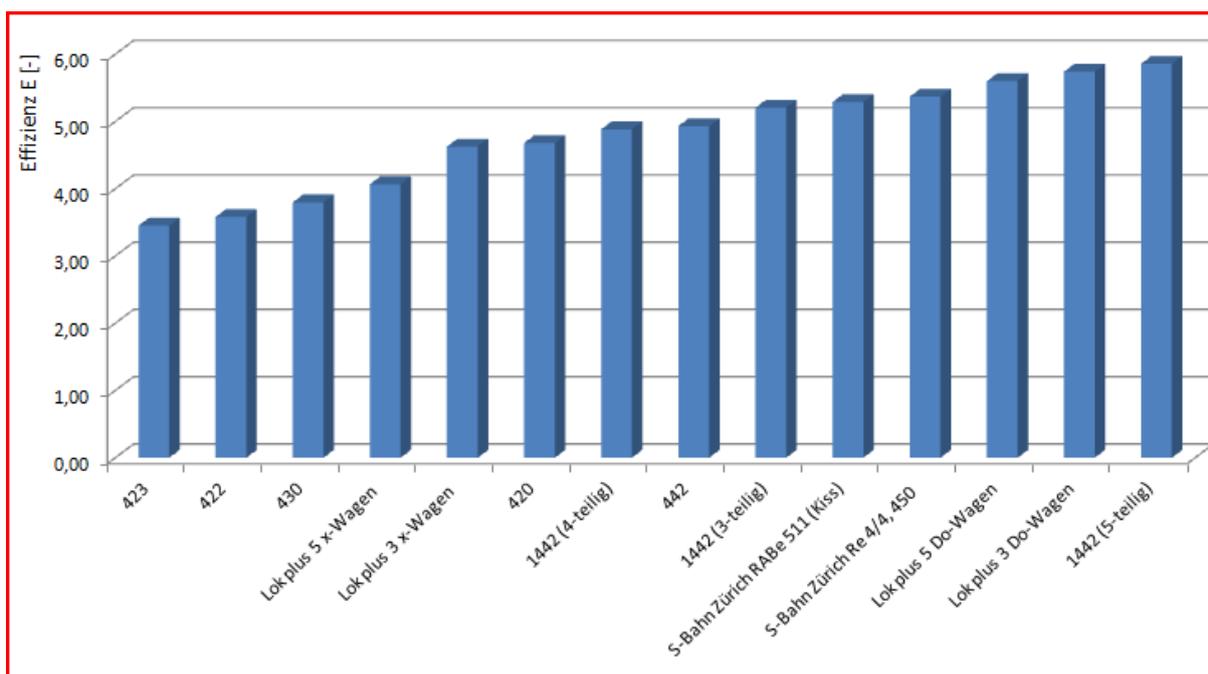


Abb. 3-4: Effizienz der betrachteten Wechselstrom-S-Bahnen

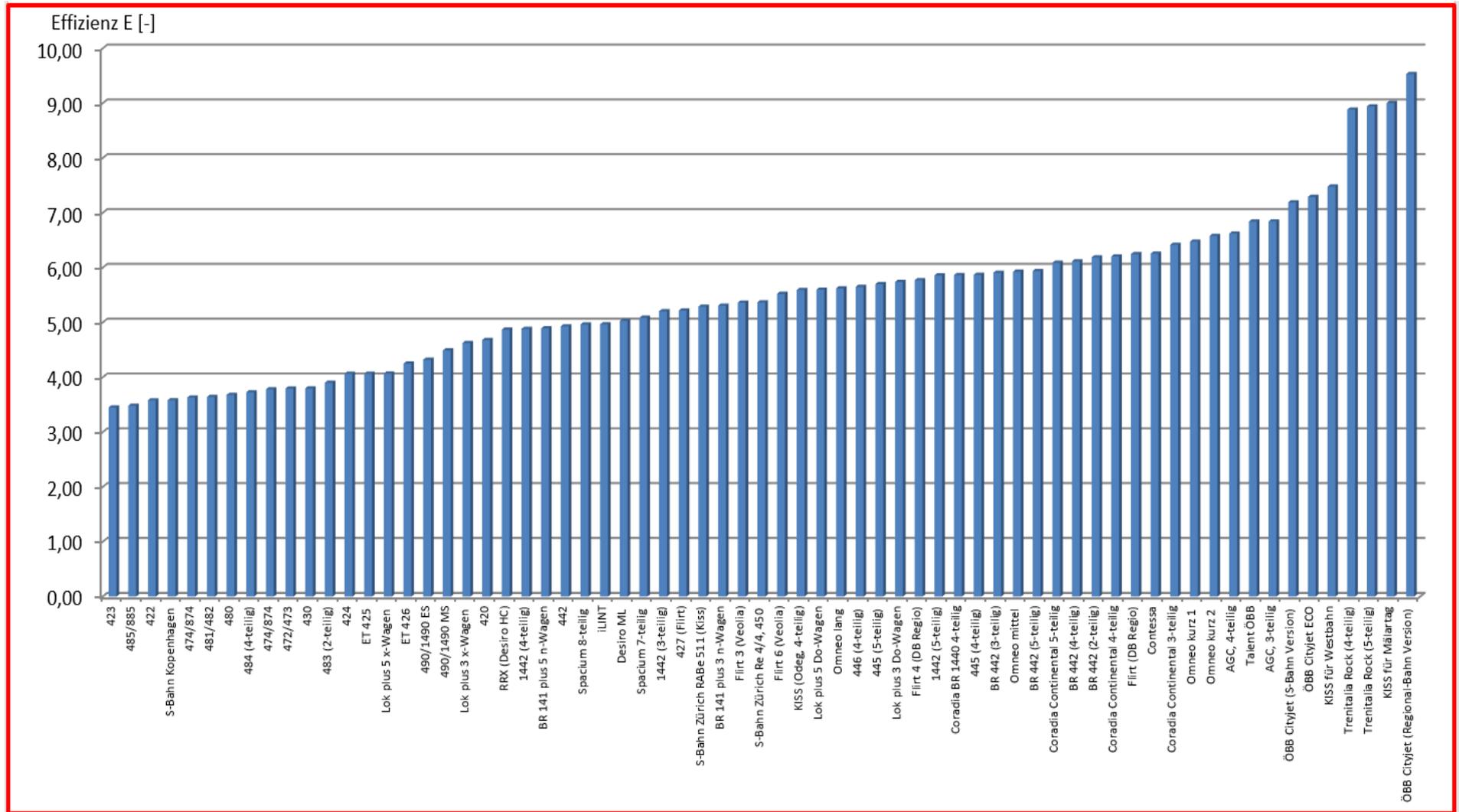


Abb. 3-5: Effizienz der betrachteten elektrisch angetriebenen Fahrzeuge

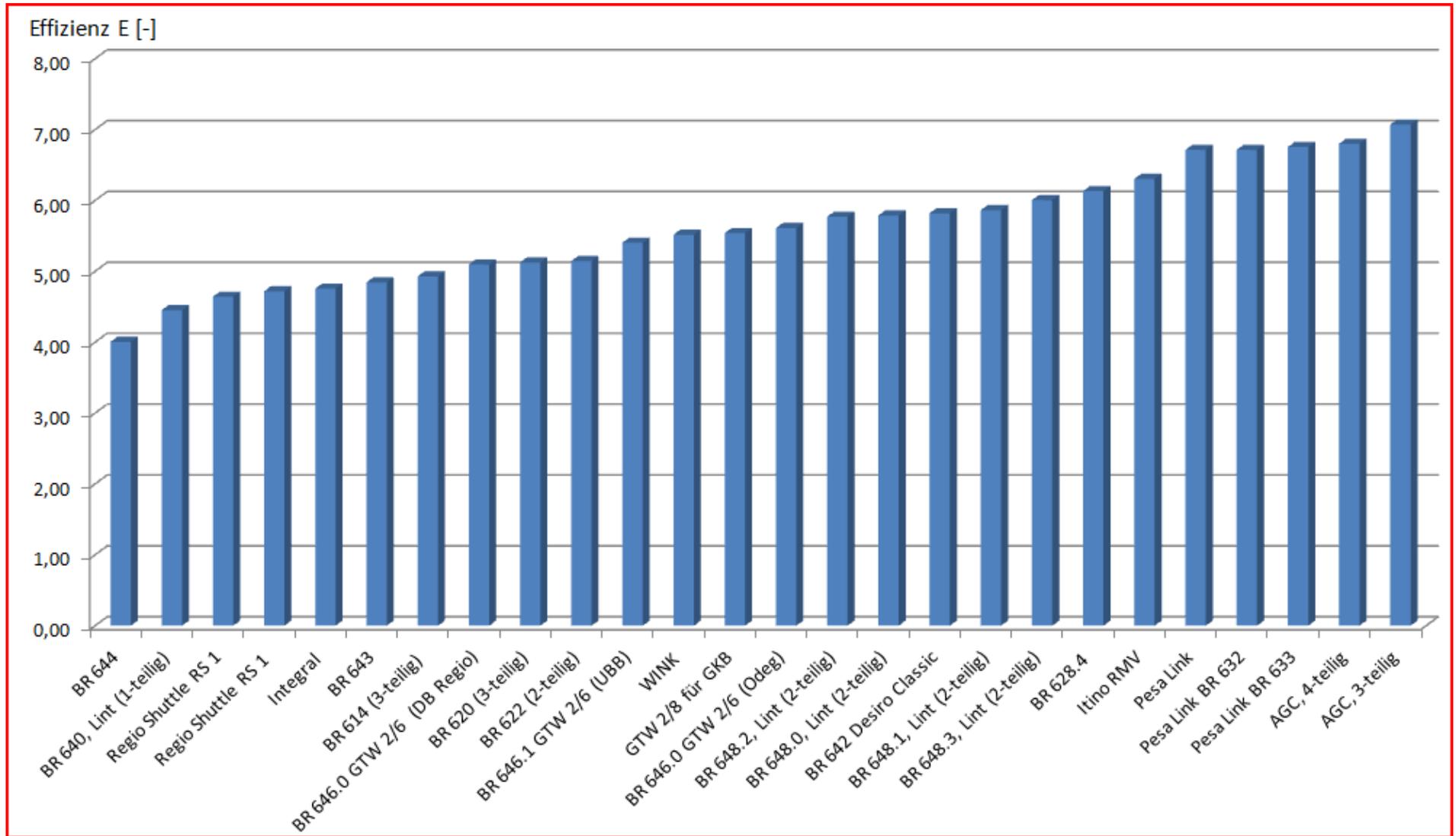


Abb. 3-6: Effizienz der betrachteten Brennkrafttriebwagen

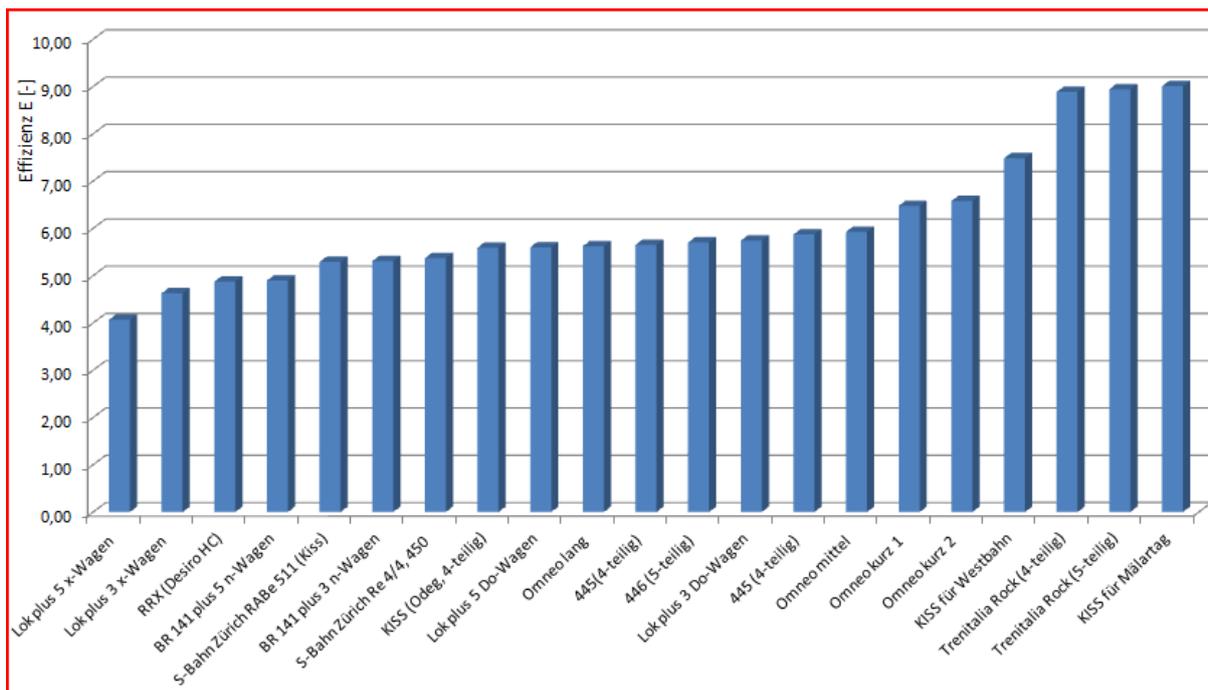


Abb. 3-7: Effizienz der Fahrzeuge bestehend aus Lokomotive und einstöckigen oder doppelstöckigen Wagen sowie der Triebfahrzeuge mit Doppelstockanteil

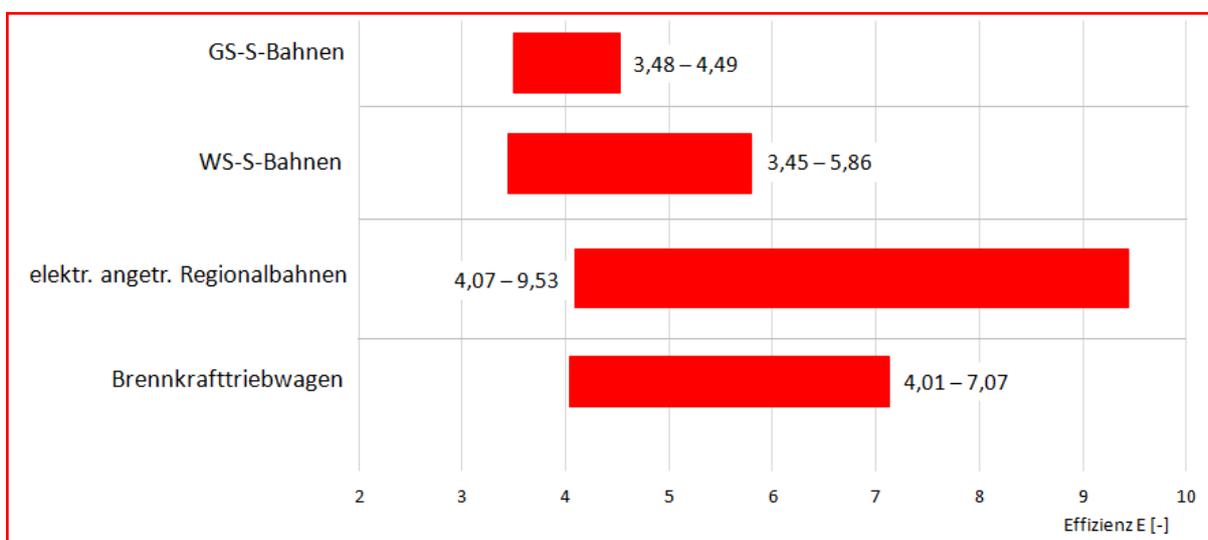


Abb. 3-8: Gesamtdarstellung der Effizienz der betrachteten Fahrzeuge nach Traktionsart

3.2 Effizienzbewertung

Auf Grundlage der eingeführten gesamtheitlichen Betrachtung mittels einer Effizienz E , deren Ergebnisse in den Abbildungen 3-1 bis 3-8 dargestellt sind, lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Ein bestimmtes Fahrzeugkonzept, welches eine bessere Effizienz im Sinne von Leichtbau, Zugänglichkeit und Raumnutzung bietet, lässt sich aus der vorhandenen Datengrundlage nicht ableiten.
2. Es ist erkennbar, dass in einer Auswertung nach Einsatzgebiet der Fahrzeuge, außer bei den Gleichstrom-S-Bahnen, stets Fahrzeuge vom Typ 3, also einstöckige Fahrzeuge mit Jakobsdrehgestellen die effizientesten Fahrzeugkonzepte darstellen.
3. Das im Gesamtvergleich effizienteste Fahrzeug ist die S-Bahn-Baureihe 423, ebenfalls ein Fahrzeug vom Konzept 3.
4. Bei den Gleichstrom-S-Bahnen liegt der Sonderfall vor, dass nur zwei verschiedene Fahrzeugkonzepte angewendet werden, nämlich Konzept 2 (Zugverband aus Einzelwagen mit jeweils zwei Drehgestellen) und Konzept 5 (Zugverband aus kurzen Wagen mit Einachsfahrwerken). Dies ist allerdings bezogen auf die deutschen S-Bahnen dem Umstand zuzuschreiben, dass wegen der geringen zulässigen Radsatzlasten (max. 16 t) praktisch keine anderen Fahrzeugkonzepte anwendbar sind. Das Konzept 5 stellt für die S-Bahn Kopenhagen insofern ein Sonderfall dar, als dass hier Radsatzlasten von 21 t zulässig sind.
5. Betrachtet man ausschließlich die elektrisch und mit Brennkraft betriebenen Regionalbahnfahrzeuge, so werden hier die besten Effizienzwerte (im Bereich um 4) bei den Baureihen 424, 644 und bei den Varianten Lok mit 5 Nahverkehrswagen und Lok mit drei Doppelstockwagen (S-Bahn Zürich) erreicht.
6. Schränkt man die gesamte Betrachtung auf aktuell zulassungsfähige Fahrzeuge ein, also weitgehend dem heute geforderten Normenstand entsprechend, ohne die Gleichstrombahnen, dann ergibt sich die Darstellung in Abbildung 3-9.
7. Aus Abb. 3-9 lässt sich ableiten, dass moderne Fahrzeuge aus vielerlei Gründen nicht mehr die Effizienz erreichen, wie es noch die heute nicht mehr zulassungsfähigen Altbaureihen, ermöglichen haben. Effizienzwerte um 3,5 sind damit illusorisch, Werte knapp unter 5 hingegen schon ein Zeichen für ein besonders gutes Fahrzeugkonzept, in diesem Falle die RRX-Fahrzeuge nach Konzept 9 (siehe dazu auch Abb. 2-2 aus Kapitel 2.3).

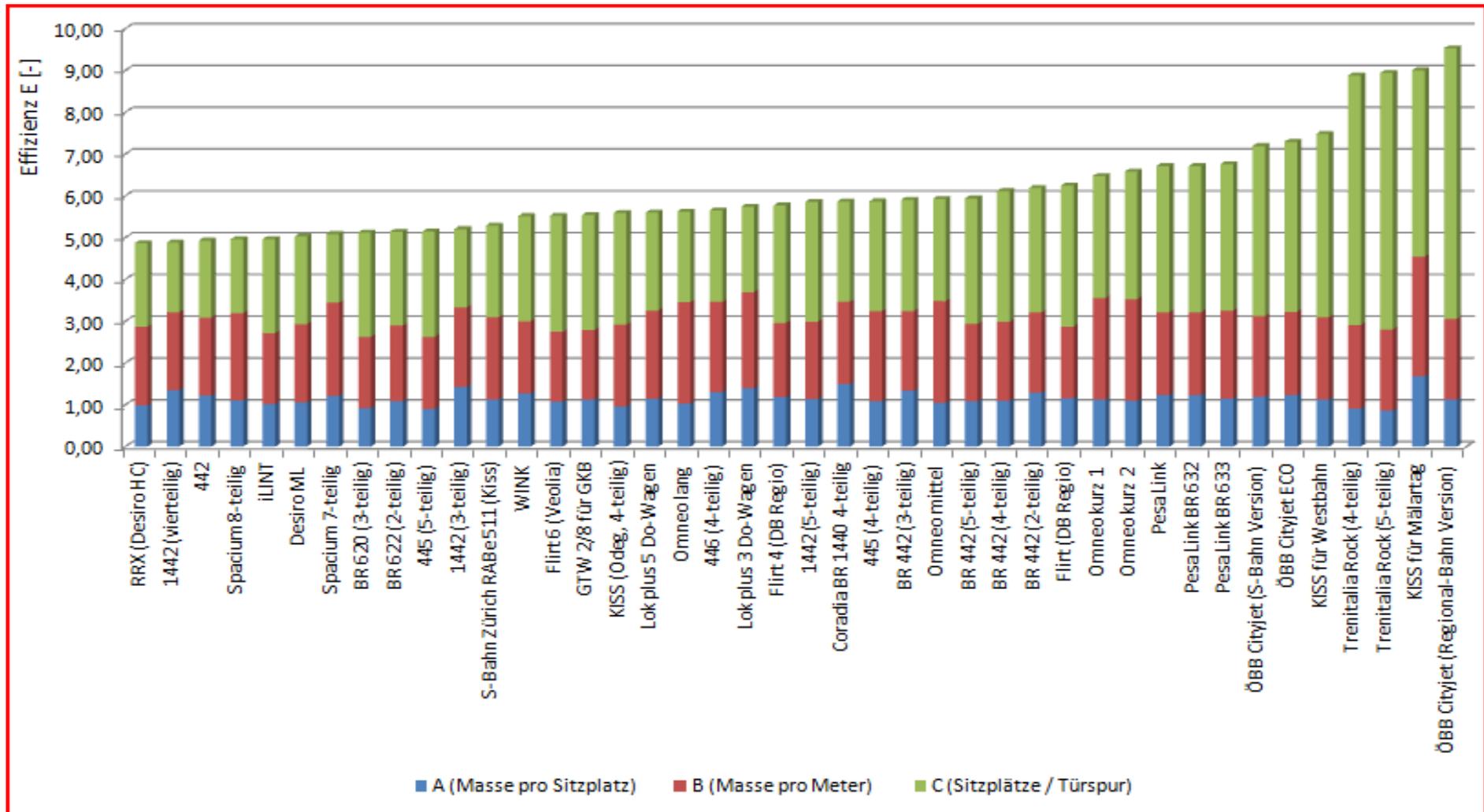


Abb. 3-9: Effizienz der aktuell zulassungsfähigen Regionalbahnfahrzeuge

4. Infrastrukturelle Randbedingungen

Wesentlich für die Gestaltung neuer Fahrzeuge ist neben der reinen Fahrzeugtechnik die infrastrukturelle Seite des geplanten Einsatzes. Die Infrastruktur ist im Verhältnis noch langlebiger als die ohnehin schon für einen langen Einsatz ausgelegten Fahrzeuge, daher müssen die Fahrzeuge sowohl der heute vorgefundenen Infrastruktur als auch den zukünftigen Ansprüchen genügen. Hier werden insbesondere die folgenden Teilaspekte näher beleuchtet:

- Streckeninfrastruktur, bestehend aus Fahrzeugbegrenzungslinie und Streckenhöchstgeschwindigkeit sowie Streckenklassen
- Energieversorgung und -übertragung
- Schnittstelle zum Bahnsteig
- Signaltechnik

4.1 Fahrzeugbegrenzungslinie

Die Fahrzeugbegrenzungslinie ist in Deutschland in der Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO) geregelt. Dort werden die statische und die dynamische Begrenzungslinie definiert, was aber nur hinsichtlich der Berechnungs- und Nachweiswege relevant ist, obwohl die dynamische Betrachtung tendenziell größere Fahrzeuge ermöglicht.

Darüber hinaus gilt DIN EN 15273-1, welche auch die europaweit harmonisierten, statischen und kinematischen Begrenzungslinien beinhaltet. Anhang A2 aus DIN EN 15273-1 definiert die Anwendungsfälle der kinematischen Begrenzungslinien und Anhang C definiert dann die konkreten Abmessungen. Besonders relevant für den Blick auf Deutschland sind dabei die folgenden Begrenzungslinien:

- G1 und G2 sind die Begrenzungslinien der interoperablen Fahrzeuge im oberen Bereich in Mitteleuropa
- GA, GB und GC sind die Begrenzungslinien im oberen Bereich für Verbindungen zwischen dem konventionellen und dem Hochgeschwindigkeitsnetz (sowie der Vollständigkeit halber auch für den Verkehr mit Wechselbehältern)
- DE2 ist die erweiterte Begrenzungslinie für das deutsche Schienennetz und grenzüberschreitende Verkehre. Diese Erweiterung betrifft hierbei den oberen Bereich der Fahrzeugbegrenzung und ermöglicht größere Doppelstockwagen.

Mit Blick auf zukünftige Fahrzeugkonzepte gilt es daher zu prüfen, ob bei Anwendung einer bestimmten Fahrzeugbegrenzungslinie zusätzliche, andere Fahrzeugkonfigurationen ermöglicht werden. Dabei sind die unteren Begrenzungslinien in dieser Hinsicht weniger von besonderem Interesse, weil hier die Unterschiede nur marginal sind. Hier werden je nach Begrenzungslinie Maße von 80 oder 125 mm als untere Begrenzung vorgegeben (Linie G1C1 bzw. G1C2). Betrachtet werden hier nur Begrenzungen für Fahrzeuge, die nicht über Ablaufberge fahren, wie dies bei Triebwagen üblich ist. Fährfähigkeit wird als Sonderfall hier ebenfalls nicht berücksichtigt.

Abbildung 4-1 zeigt in der Gegenüberstellung die Profile G1, G2, GA bis GC und DE2. Abbildung 4-2 zeigt darüber hinaus durch Überlagerung der vorgenannten Profile das Erweiterungspotential. Dabei ist es weniger der reine Höhengewinn durch das Profil GC, als vielmehr der Komfortgewinn für die Fahrgäste des Oberdecks beim Doppelstockwagen durch die seitliche Vergrößerung des Profils, welcher offensichtliche Vorteile bietet.

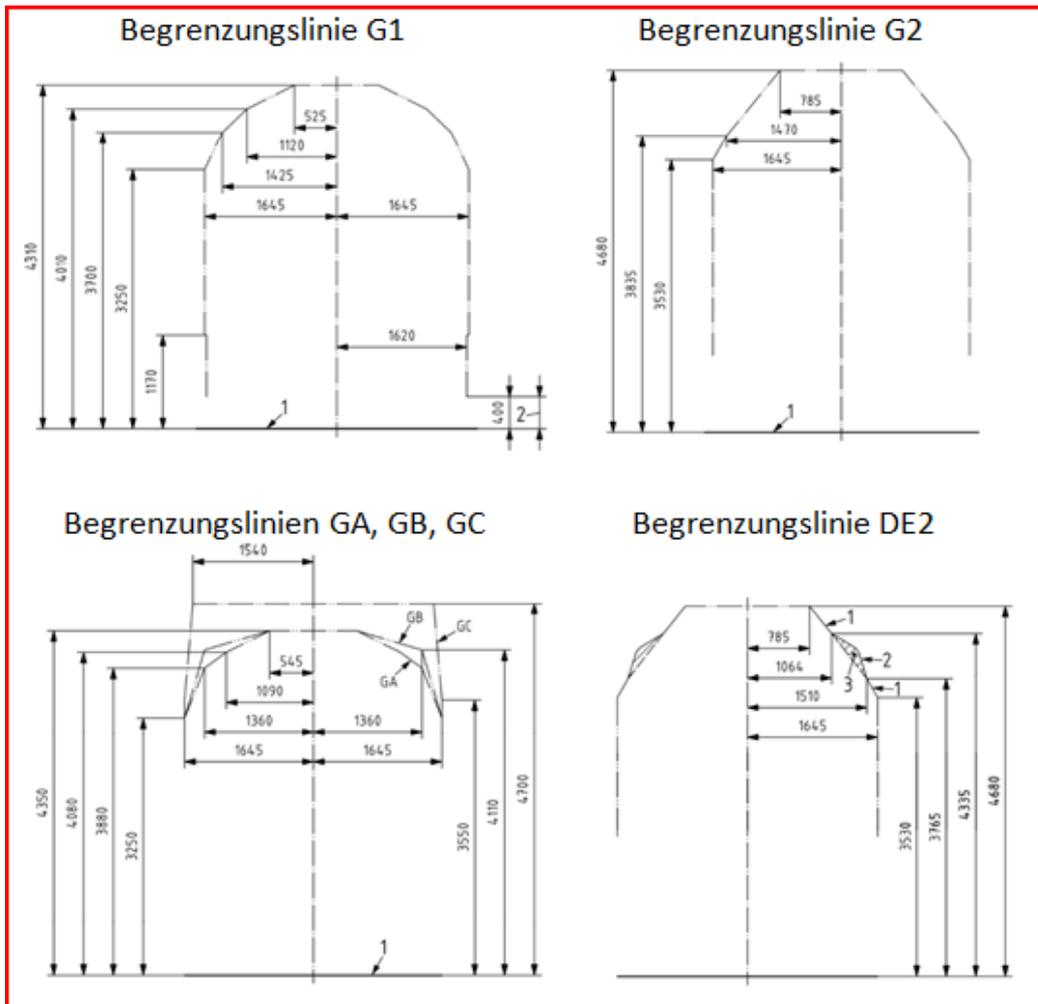


Abb. 4-1: Vergleich der kinematischen Begrenzungslinien nach EN 15273-1

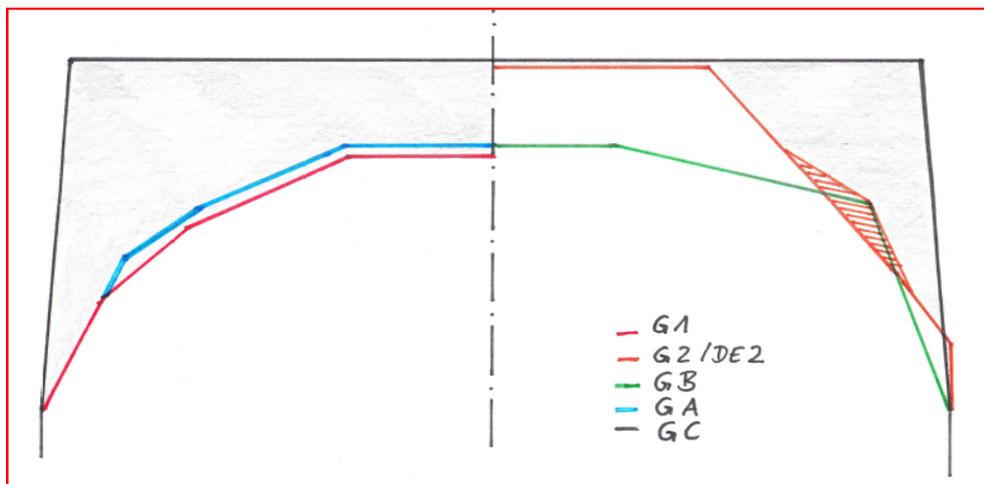


Abb. 4-2: Überlagerung der kinematischen Begrenzungslinien nach EN 15273-1 aus Abb.4-1

Abbildung 4-3 zeigt die Verteilung der Strecken in Deutschland, welche heute ohne zusätzliche Profilüberprüfung für Fahrzeuge gemäß kinematischer Begrenzungslinie DE2 für Doppelstockwagen verwendbar sind. Abbildung 4-4 zeigt die Strecken in Deutschland, die heute für die kinematische Begrenzungslinie GC geeignet sind.

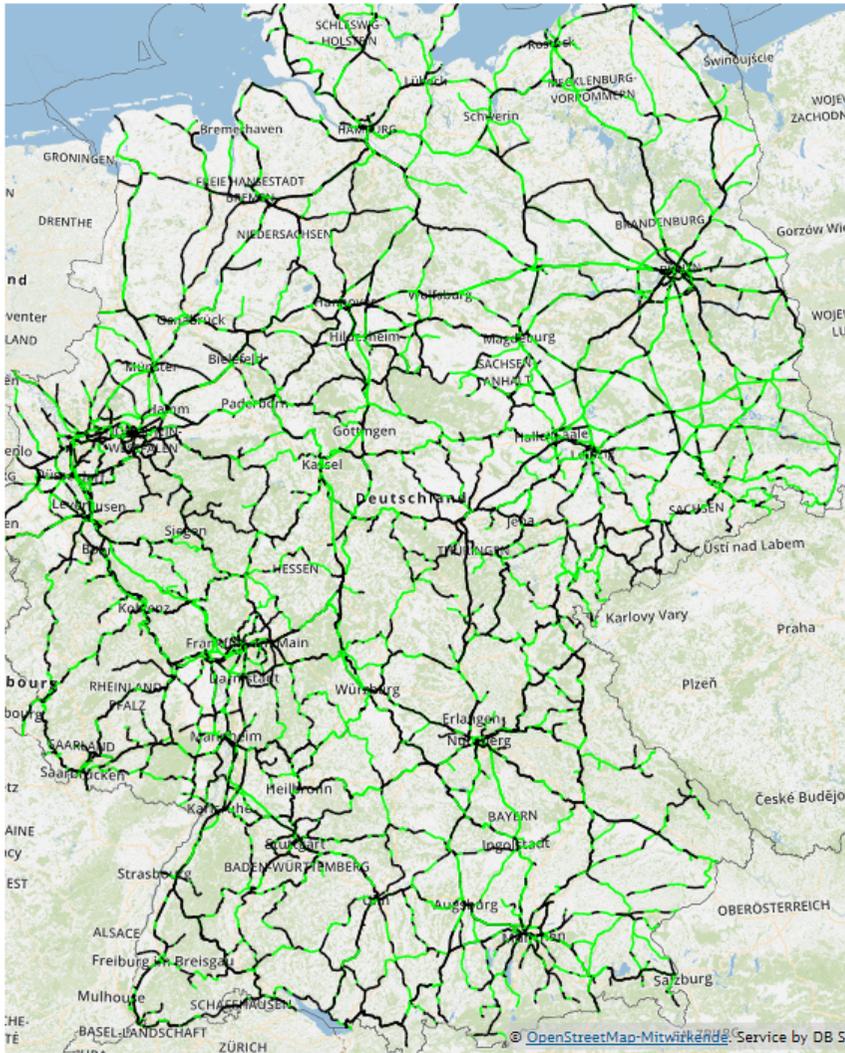


Abb. 4-3: Strecken in Deutschland mit erweiterter kinematischer Begrenzungslinie DE2 nach [65] (grün dargestellt)



Abb. 4-4: Strecken in Deutschland mit erweiterter kinematischer Begrenzungslinie GC nach [65] (blau dargestellt)

4.2 Zulässige Streckenhöchstgeschwindigkeit

Abbildung 4-5 zeigt die im heutigen Streckennetz zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Es ist erkennbar, dass nur auf den großen Nord-Süd-Strecken und wenigen Ost-West-Verbindungen Geschwindigkeiten über 160 km/h zulässig sind. Der überwiegende Teil des Streckennetzes darf nur mit Geschwindigkeiten bis 160 km/h befahren werden.

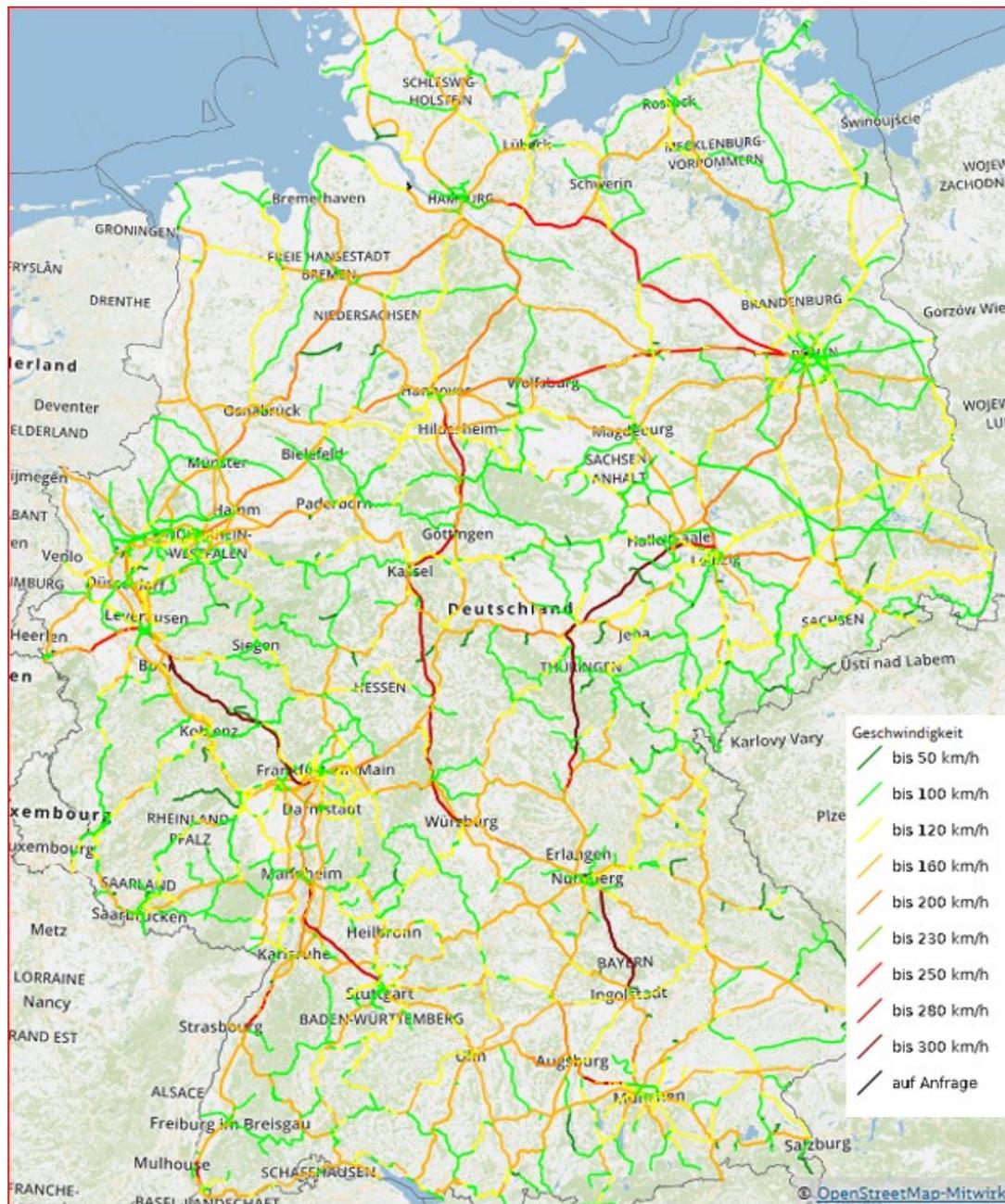


Abb. 4-5: Schnellfahrstrecken in Deutschland nach [65]

In Verbindung mit dem wesentlichen Charakter einer Regionalbahn, nämlich der Bedienung von regionalen Unter- und Mittelzentren mit Oberzentren erscheint eine Geschwindigkeit von mehr als 160 km/h unnötig, zumal mit zunehmender Endgeschwindigkeit in der Regel das Beschleunigungsvermögen im unteren Geschwindigkeitsbereich leidet.

4.3 Streckenklassen

Ganz wichtig für die Entwicklung neuer Fahrzeuge ist die Frage der maximal zulässigen Radsatzlast sowie mit Blick auf Brücken auch die Frage der Meterlasten. Abbildung 4-6 zeigt nach [65] die gegenwärtig gültigen Streckenklassen. Der ganz überwiegende Teil der deutschen Strecken weist demnach zulässige Radsatzlasten von 18 t bis 22,5 t, bzw. Meterlasten von 6,4 t/m bis 8 t/m auf. Lediglich einzelne, untergeordnete Strecken, wie die Abschnitte Bayr. Eisenstein - Zwiesel – Grafenau (KBS 905 und 906) oder Neustadt (Dosse) – Herzberg (KBS 271 und 184) weichen mit Radsatzlasten von 16 t bzw. 18 t hiervon ab.



Abb. 4-6: Streckenklassen in Deutschland nach [65]

Im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern gibt es in Deutschland keine Diskussion zur Einführung von Trassenpreisen, die an die Masse der Fahrzeuge gekoppelt sind. Ohne Zweifel sind niedrige Radsatzlasten mit Blick auf die Lebenszykluskosten von Fahrzeug und Fahrweg wünschenswert, sie stellen aber gegenwärtig keinen begrenzenden Faktor für ein neues Fahrzeugkonzept dar.

Damit sind infrastruktureitig hinsichtlich der Streckenbelastung keine grundsätzlichen Einschränkungen erkennbar, auch wenn im Detail z.B. Fragen der Brückendynamik nach EN 15528 auf einzelnen

Strecken durchaus eine Einschränkung darstellen könnten. Dies lässt sich im Rahmen dieser Grundsatzarbeit nicht untersuchen.

4.4 Energieversorgung

Abbildung 4-7 zeigt das Streckennetz in Deutschland nach [65]. Rot hervorgehoben sind die mit Wechselspannung von 15 kV, 16,7 Hz elektrifizierten Strecken. Die S-Bahn-Netze in Berlin und Hamburg sind grün dargestellt, schwarze Strecken sind nicht elektrifiziert.

Insgesamt beträgt das Streckennetz nach [59] mit Stand Dezember 2015 38.466 km, davon 20.726 km, also rund 54%, elektrifiziert mit 15 kV, 16,7 Hz. Die Gleichstrom-S-Bahn-Netze mit 321 km (Berlin, [60]) bzw. 147 km (Hamburg, [61]) Streckenlänge werden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt, spielen aber für eine Betrachtung zukünftiger Regionalbahnfahrzeuge keine Rolle, da eine Elektrifizierung über den Bereich der S-Bahnen hinaus mit Gleichspannung wirtschaftlich sehr unwahrscheinlich ist.



Abb. 4-7: Strecken in Deutschland mit elektrischer Energieversorgung (rot: 15 kV, grün: Gleichspannung, schwarz: ohne Energieversorgung nach [65])

4.5 Schnittstelle zum Bahnsteig

In Deutschland werden gegenwärtig (Stand März 2018) 5.368 Stationen (Bahnhöfe, Haltepunkte) im Bestand der DB Station & Service AG geführt. In diesen Stationen werden 11.901 Bahnsteige betrieben

[55]. Hierbei sind sehr unterschiedliche Bahnsteiglängen und –höhen vorhanden. Tabelle 4-1 zeigt den Überblick:

Bahnsteighöhe in mm über SOK	Minimale Länge in m	Maximale Länge in m	Anzahl im Bestand
380	42	509	1.974
550	15	555	2.854
760	50	667	3.752
960	120	479	1.112
1030	117	244	106
Sonstige (< 380)	25	484	2.103

Tab. 4-1: Stationen in Deutschland, Bahnsteiglängen und -höhen nach [55]

Die im Regionalverkehr am häufigsten vorhandenen Bahnsteige mit einer Höhe von 550 mm oder 760 mm machen zusammen 55 % des Gesamtbestandes aus. Die Bahnsteige, welche auch oder ausschließlich vom Fernverkehr bedient werden, können hierbei nicht herausgerechnet werden. Die zweitgrößte Gruppe sind die Bahnsteige mit 380 mm oder weniger Höhe mit einem Anteil von 35 %. Danach folgenden die reinen S-Bahn-Hochbahnsteige mit 10 %.

Erstaunlich sind die teilweise sehr geringen Bahnsteiglängen von 15 m bis 25 m, welche eine adäquate Bedienung für eine angemessene Menge von Fahrgästen kaum erwarten lassen. Hier können heute nur einteilige (Diesel-)Triebwagen halten.

In [58] wird berichtet, dass seitens der DB Netz AG langfristig in Deutschland eine Bahnsteighöhe von 760 mm angestrebt wird, wobei ein Zeithorizont von mindestens 20 Jahren genannt wird. Dieser Vorrang zum Bau von 760 mm hohen Bahnsteigen ist auch in der EBO, § 13 festgehalten.

Aufgrund der vorhergehenden Angaben wird für die nachfolgenden Betrachtungen in dieser Arbeit in Kapitel 5 zu den Fahrzeugkonzepten eine für den Fahrgast nutzbare infrastruktureitige Bahnsteigmindestlänge von 50 m in Verbindung mit einer Höhe von 550 mm oder 760 mm zu Grunde gelegt. Es ist davon auszugehen, dass die Bahnsteige mit weniger als 550 mm Höhe aufgrund der Inkompatibilität für den Zugang von mobilitätseingeschränkten Personen im Betrachtungszeitraum dieser Arbeit umgebaut werden. Den verbleibenden Bahnsteighöhen ist durch das Fahrzeugkonzept Rechnung zu tragen.

4.6 Signaltechnik

Auch wenn in Deutschland heute nahezu flächendeckend die induktive Zugsicherungstechnik (PZB 90) verwendet wird, wie es auch Abb. 4-8 aus [65] zu entnehmen ist, so ist der Weg durch die europäische Standardisierung hin zum ETCS-System vorgezeichnet. Hierbei ist, aus wirtschaftlichen Gründen, vorwiegend auf den Regionalbahnstrecken mit der Einführung eines vollautomatischen Betriebes, weitgehend ohne Triebfahrzeugführer, zu rechnen. Aufgrund der langen Übergangszeiten beim Umbau der Strecken ist dabei jedoch von der Installation sowohl der PZB 90 als auch der ETCS-Technik auf den Fahrzeugen auszugehen. Somit wird bei den nachfolgenden Ausführungen in Kapitel 5 weiterhin davon ausgegangen, dass ein vollwertiger Führerraum vorzusehen ist.



Abb. 4-8: Zugsicherungssysteme in Deutschland, hier PZB (grün) nach [65]

Die Frage, welche Zugsicherungstechnik auf neuen Fahrzeugen zu installieren ist, hat keinen Einfluss auf das Fahrzeugkonzept, solange die notwendigen Bauräume für Radar, Balisen und die Elektronikkomponenten auf den Fahrzeugen vorhanden sind, wovon aber zweifelsohne ausgegangen werden kann.

4.7 Zusammenfassung der infrastrukturseitigen Anforderungen

Zusammenfassend gelten für zukünftige Fahrzeugkonzepte weiterhin die infrastrukturellen Randbedingungen heutiger Fahrzeuge, jedoch lassen sich folgende Veränderungen erkennen:

- a. Als Folge der europäischen Harmonisierung ist zu erwarten, dass der Anteil von Strecken mit einer Fahrzeugbegrenzung nach Linie GC der EN 15273-1 zunehmen wird. Der Anfang ist auch in Deutschland gemacht. Gegenwärtig ist die Anzahl der Strecken, auf denen die vergrößerte Begrenzungslinie genutzt werden könnte, jedoch noch zu gering, um ein neues Fahrzeugkonzept daraus aufzubauen. Die sich ergebenden Potentiale werden im Kapitel 8.2 aufgezeigt.

- b. In der Diskussion ist eine langfristige Veränderung der Bahnsteighöhen. Die flächendeckende Einführung von 760 mm hohen Bahnsteigen wäre im Sinne einer Vereinheitlichung sicher sinnvoll, führt aber zu nachhaltigen Veränderungen bei den Doppelstockkonzepten, auf die in Kapitel 8.2 noch eingegangen wird. In jedem Fall ist für den Regionalverkehr der absehbaren Zukunft aber von Bahnsteigen mit 550 mm oder 760 mm Höhe über SOK auszugehen.
- c. Die größten Veränderungen der Zukunft sind bei der Signaltechnik zu erwarten. Dabei wird mittelfristig das überwiegend verwendete System der punktförmigen Zugbeeinflussung PZB durch zusätzliche ETCS-Komponenten ergänzt. Das Fahren ohne festen Blockabstand schafft hier die notwendige Kapazität auf den Strecken. Ob der insbesondere für Regionalbahnen aus wirtschaftlichen Gründen interessante fahrerlose Betrieb in absehbarer Zeit Einzug hält, ist dagegen eher ungewiss. Somit sind weiterhin Führerstände einzuplanen.

In folgenden Bereichen ist hingegen keine wesentliche Veränderung zu erwarten:

- d. Eine Fahrzeughöchstgeschwindigkeit über 160 km/h ist nicht zu erwarten, da auch hier die Infrastruktur begrenzend wirkt und es aus energetischer Sicht unwirtschaftlich erscheint, im Regionalverkehr mit relativ kurzen Haltestellenabständen hier noch schneller fahren zu wollen. Ein spezielles Augenmerk gilt hier jedoch dem Beschleunigungsvermögen und der Frage der Höchstgeschwindigkeit bei fahrdrahtunabhängigen Fahrzeugen (siehe Kapitel 5).
- e. Eine Abkehr von der Energieversorgung mit 15 kV, 16,7 Hz Wechselspannung ist nicht zu erwarten, dazu sind die damit verbundenen Kosten einer flächendeckenden Änderung einfach zu hoch, ohne dass dies hier näher erläutert werden müsste. Auch eine schrittweise Übergangsphase, für die dann zusätzliche Zweisystemfahrzeuge beschafft werden müssten, ist nicht zu erwarten. Allerdings gibt es Regionen, die bewusst weitere Strecken elektrifizieren, um den unwirtschaftlicheren Betrieb von fahrleitungsungebundenen Fahrzeugen unter Fahrdraht zu vermeiden.
- f. Der ganz überwiegende Teil der deutschen Strecken ist für zulässige Radsatzlasten von 18 t bis 22,5 t, bzw. Meterlasten von 6,4 t/m bis 8 t/m geeignet. Eine zukünftige Reduzierung ist ebenso wenig zu erwarten, wie die Einführung von gewichtsabhängigen Trassenkosten, so dass Radsatzlasten unter 18 t nicht erforderlich sind.

5. Antriebsausrüstungen

Im Kapitel 3 dieser Arbeit ist im Rahmen der Bestandsaufnahme der überwiegende Teil der heute im Einsatz befindlichen Fahrzeuge des Nah- und Regionalverkehrs in Deutschland sowie in angrenzenden Ländern mit ähnlichem Fuhrpark abgebildet. Während dabei der Fokus auf den Fahrzeugkonzepten, deren spezifischen Kennwerten und der sich daraus ableitbaren Effizienz lag, soll nachfolgend der Einfluss der Antriebsausrüstung auf die Fahrzeuggestaltung und die Zukunftsfähigkeit der verschiedenen Antriebssysteme näher beleuchtet werden.

Bei keinem der bisher betrachteten Fahrzeuge ergeben sich grundlegende Schwierigkeiten, die notwendige Antriebsausrüstung in den Fahrzeugen zu verbauen, sehr wohl ergeben sich aber im Detail unvermeidbare Kompromisse in der Unterbringung, in der Regel zu Lasten des Aufenthaltsraumes für die Fahrgäste. Hier nur zwei Beispiele aus dem Bereich der Dieseltriebwagen: Um die notwendigen Maschinenanlagen zu verbauen, haben einige Triebwagen relativ lange Hochflurbereiche und die GTW besitzen einen reinen Maschinen-Zwischenwagen von rund 4 m Länge, der für Fahrgäste nur als Gang zwischen den Fahrgasträumen genutzt werden kann.

Somit ist das unterzubringende Volumen für die Antriebstechnik nur bedingt von konzeptionellem Interesse, hingegen stellt sich hier die Frage, welche Technik verbaut werden muss und wie schwer diese ist. Gemäß [72] ist die „Größe der zu installierenden Antriebsanlage, sei es wegen der geforderten Anfahrbeschleunigung, sei es als in ‰ des Fahrzeuggewichts geforderter Zugkraftüberschuß bei Höchstgeschwindigkeit“ direkt von der Fahrzeugmasse abhängig. Aufgrund der Vorbetrachtungen im Kapitel 3 dieses Dokuments, gibt es keinen direkten Zusammenhang zwischen Fahrzeugkonzept und Masse, so dass die Richtigkeit der Aussage aus [72] damit nicht zu widerlegen ist. Insofern kann hier nur eine spezifische Betrachtung von Fahrzeugen weiterhelfen, die bei gleichem Anforderungsspektrum mit unterschiedlichen Antrieben ausgeführt wurden.

Die Auswahl des Antriebssystems ist durch das jeweilige Einsatzgebiet des Fahrzeuges vorgegeben, wobei naheliegend ist, dass auf elektrifizierten Strecken nur Fahrzeuge eingesetzt werden, die zu dem dort installierten Spannungssystem passen. Triebfahrzeuge, die fahrdrahtunabhängig verkehren können werden für nichtelektrifizierte Strecken vorgesehen, wobei sich die Verwendung von Dieseltriebwagen oder neuerdings Triebwagen mit Brennstoffzellen- oder Wasserstoff-Antrieb unter Fahrdraht auf Hauptstrecken und Knotenbahnhöfen nicht immer vermeiden lässt. Dabei handelt es sich aber nicht um das geplante Haupteinsatzgebiet.

Die umfangreichsten Erfahrungen liegen gegenwärtig für elektrische Antriebe, gespeist aus Wechsel- oder Gleichstrom sowie für Dieselantriebe vor, anders als für die relativ modernen, alternativen Antriebskonzepte basierend auf Brennstoffzellen oder Batterien, deren Betriebs- und Alltagstauglichkeit noch nicht nachgewiesen worden ist. Diese Fahrzeuge befinden sich dabei überwiegend noch im Erprobungs- und Zulassungsverfahren, einzig der iLint der Fa. Alstom, der einen Brennstoffzellenantrieb mit einem Batteriezusatzspeicher kombiniert, kann bereits mit einer Zulassung und einer Serienbestellung aufwarten. Trotz fehlender Betriebserfahrungen zeigen diese Antriebe aber wahrscheinlich den Sprung zu neuen Antriebstechnologien auf, mindestens stellen sie aber eine Brückentechnologie zum Antrieb der Zukunft dar, weshalb sie in die weiteren Betrachtungen einfließen.

Neben den Themen Masse, Antriebsleistung und Antriebstechnologie sind hier aber auch grundsätzliche Fragen der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes zu betrachten. Es gibt eine Vielzahl von Studien und Veröffentlichungen zu diesem Themenkomplex, was aber weit über das Ziel dieser Arbeit hinausgeht. Es sei daher nur grundsätzlich auf die folgenden globalen Trends verwiesen:

- Reduzierung der Verbrennung von fossilen Energieträgern zur Vermeidung von Kohlendioxid-, Stickoxid-, Ruß- und Feinstaubbelastung
- Reduzierung der Schallemissionen aus Antriebs- und Rollgeräuschen
- Reduzierung des Primärenergieverbrauchs durch den Verkehrssektor

Ohne Zweifel ist die Bahn auf die Bereitstellung von Primärenergie angewiesen, allerdings ist die Energieerzeugung und Verteilung durch das Bahnstromnetz sowie durch die Energierückspeisung von

Bremsenergie effizienter als die dezentrale Energieerzeugung auf Triebwagen. Da sich damit auch die Emission von Schadstoffen in den ohnehin höher belasteten Ballungszentren reduzieren lässt, ist es nur eine Frage der Zeit und der möglichen Alternativen, bis die Dieselsechnik hier immer weiter verdrängt wird. Unter diesem Gesichtspunkt sind auch zukünftige Elektrifizierungsprogramme zu sehen [59].

Zunächst folgt eine Bewertung der verfügbaren Antriebssysteme. Weiterhin erfolgt eine Betrachtung des Masseinflusses durch das jeweilige Antriebssystem, zum Traktionsvermögen und zur Reichweite bei fahrdrahtunabhängigen Systemen, um damit weitere Kriterien für zukünftige Triebfahrzeuge ableiten zu können.

5.1 Varianten der Antriebstechnik

Die aktuell eingesetzte und für zukünftige Anwendungen zur Verfügung stehende Antriebstechnik lässt sich in die folgenden Gruppen einteilen:

- a. Elektrische Traktion
 - Fahrzeuge mit Gleichspannungsversorgung (750 V, 1.200 V, 1.500 V, 3.000 V)
 - Fahrzeuge mit Wechselspannungsversorgung (15 kV, 16,7 Hz; 25 kV, 50 Hz)
- b. Dieseltraktion
 - dieselmechanische Antriebe (DM)
 - dieselhydraulische Antriebe (DH)
 - dieselektrische Antriebe (DE)
- c. Brennstoffzellenantrieb (BZ)
- d. Batteriespeicherantriebe (Batt)
- e. Wasserstoffantrieb mit Verbrennungsmotor (H₂)
- f. Kombinationen aus a bis e und innerhalb von a

Die folgende Matrix in Tab. 5-1 zeigt die sinnvollen Kombinationsmöglichkeiten. Dabei bezieht sich der Begriff „sinnvoll“ auf eine technisch und wirtschaftlich mögliche Kombination. Die Kombination eines dieselmechanischen mit einem dieselhydraulischen Antrieb ist in dieser Begrifflichkeit sinnlos, weil es sich nicht um eine Ergänzungsmöglichkeit handelt. Man erkennt aber, dass ausschließlich Kombinationen aus elektrischen Antrieben möglich sind. Eine Kombination aus dieselmechanischem Antrieb und Batteriespeicher ist nur dann möglich, wenn im Antriebsstrang ein Elektromotor verwendet werden würde, dies würde dann aber von vornherein eher zu einem dieselektrischen Antrieb passen. Antriebe für Wechselspannungs- oder Gleichspannungsversorgung lassen sich untereinander ebenfalls kombinieren, was diverse Zweisystemfahrzeuge beweisen.

	WS	GS	DM	DE	DH	BZ	Batt	H ₂
WS	x	x	x	x	/	x	x	x
GS		x	x	x	/	x	x	x
DM			-	/	/	/	/	/
DE				-	/	x	x	x
DH					-	/	/	/
BZ						-	x	x
Batt							-	x
H ₂								-

Tab. 5-1: Kombinationen von Antriebsausrüstungen (x = möglich, - = schließt sich aus, / = sinnlos)

Anmerkung 1: Hier wird bewusst zwischen einem Antrieb unter Verwendung von Brennstoffzellen und einem Wasserstoff-Antrieb unterschieden, weil es Brennstoffzellen sowohl auf Basis von Wasserstoff als auch von Methanol gibt. Bei Schienenfahrzeugen wird bisher nur eine Brennstoffzelle auf Basis von Wasserstoff angewendet. Aus dem Automobilbau sind jedoch auch Hubkolbenmotoren mit Wasserstoff als Energieträger bekannt.

Anmerkung 2: Grundsätzlich wäre auch die Verwendung von Verbrennungsmotoren auf Basis von Erdgasantrieben vorstellbar. Da es sich hierbei jedoch ebenfalls um einen Antrieb auf Basis fossiler Brennstoffe handelt, wird dieser aufgrund der weiterhin erzeugten Emissionen als nicht ausreichend nachhaltig und nicht zukunftsfähig bewertet und daher nicht berücksichtigt

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die Fa. Voith eine Dieselantriebsanlage entwickelt hat, die einen Dampfwischenspeicher verwendet [75]. Dieses System wurde aber bisher nicht in einer Fahrzeugserie eingesetzt und diente eher der Wirkungsgraderhöhung der Dieselantriebsanlage als der Bereitstellung eines vollwertigen zweiten, emissionslosen Antriebssystems.

Eine Antriebsanlage besteht aus den einzelnen Bauteilen der gesamten Wirkkette zwischen Energiebereitstellung und Umsetzung der Antriebskraft am Treibrad. Die wesentlichen Bestandteile dieser Wirkketten für die verschiedenen, konventionellen Traktionsausrüstungen sind der nachfolgenden Tabelle 5-2 zu entnehmen:

	Elektrische WS-Traktion	Elektrische GS-Traktion	Diesel-elekt- rische Traktion	Diesel-mecha- nische Traktion	Diesel-hyd- raulische Traktion
Dachstromabnehmer	X	(X)	-	-	-
Seitenstromabnehmer	-	(X)	-	-	-
Hauptschalter	X	-	-	-	-
Schnellschalter	-	X	-	-	-
Energiemesseinrichtung	X	x	-	-	-
Überspannungsableiter	X	x	-	-	-
Transformator	X	-	-	-	-
Vorladeeinrichtung	X	X	-	-	-
Netzdrossel	X	X	-	-	-
Netzstromrichter	X	(X)	-	-	-
Motorstromrichter	X	X	X	-	-
Radsatzgetriebe	X	X	X	X	X
Fahrmotor	X	X	X	-	-
Bremswiderstand	(X)	(X)	(X)	-	-
Hilfsbetriebeumrichter	X	X	X	-	-
Batterieladegerät	X	X	X	-	-
Batterie	X	X	X	X	X
Lichtmaschine	-	-	-	X	X
Kühlanlage (bei Antriebsanlagen mit Flüssigkeitskühlung)	(X)	(X)	X	X	X
Dieselmotor	-	-	X	X	X
Generator	-	-	X	-	-
Schaltgetriebe	-	-	-	X	-
Hydraulisches Getriebe	-	-	-	-	X
Abgasanlage (mit Partikelfilter und/oder Katalysator)	-	-	X	X	X
Kraftstoffbehälter	-	-	X	X	X
Harnstoffanlage mit Zusatz-tank	-	-	(X)	(X)	(X)

Tab. 5-2: wesentliche Bestandteile der Traktionsausrüstung konventioneller Triebwagen, (X)=optional, -= in der Regel nicht vorhanden

Tabelle 5-3 zeigt die notwendige Traktionsausrüstung für unkonventionelle, neuartige Antriebstechnologien:

	Brennstoffzellenantrieb	Batterieantrieb	Wasserstoffmotor
Hauptschalter	X	X	-
Brennstoffzelle	X	-	-
Tank für das Betriebsmittel	X1	-	X2
Traktionshochenergiespeicher	(X)	X	-
Traktionsbatterie	(X)	X	-
Batteriekühl-/heizeinrichtung	(X)	X	
DC/DC-Wechselrichter	(X)	X	-
Motorstromrichter	X	X	-
Radsatzgetriebe	X	X	X
Hauptgetriebe (mechanisch und/oder hydraulisch)	-	-	(X)
Generator	-	-	(X)
Fahrmotor	X	X	(X)
Hilfsbetriebeumrichter	X	X	(X)
Batterieladegerät	X	X	-
Batterie	X	-	X
Lichtmaschine	-	-	(X)
Kühlanlage (bei Antriebsanlagen mit Flüssigkeitskühlung)	(X)	(X)	X
Verbrennungsmotor	-	-	X
Abgasanlage	-	-	X
X1: Wasserstoff oder Methanol X2: Wasserstoff			

Tab. 5-3: wesentliche Bestandteile der Traktionsausrüstung für Hybridfahrzeuge (X)=optional, -= in der Regel nicht vorhanden

Bei Vergleich der Tabellen 5-2 und 5-3 wird eine Vielzahl von Komponenten erkennbar, die bei den auf Elektroantrieben basierenden Antrieben in ähnlicher Form vorhanden sind und bei entsprechender Auslegung Synergien für die Kombinationen ergeben, wie sie am Beginn des Kapitels benannt sind. Es lässt sich feststellen, dass eine Kombination von verschiedenen Antriebssystemen technisch sinnvoll vorstellbar ist, wenn im Antriebssystem Elektromotoren eine Anwendung finden, die dann aus verschiedenen Energiequellen gespeist werden können.

Inwieweit eine Kombination unter dem Gesichtspunkt der Masse und der notwendigen Leistung möglich ist, wird nachfolgend betrachtet.

5.2 Masse und installierte Leistung

Auf die Masse der Antriebsausrüstung haben vielfältigste Faktoren einen Einfluss. Wie schon in der Einleitung zu Kapitel 5 aus [72] zitiert, beginnt dies mit den reinen fahrdynamischen Anforderungen und der zu bewegenden Fahrzeuggröße, beinhaltet aber auch ganz spezifische Belange der Auslegung und bei Fahrzeugen mit eigenem Energiespeicher auch die Frage der Reichweite. Darüber hinaus ist nicht jeder wünschenswerte Antrieb in der gewünschten Leistungsklasse auf dem Markt verfügbar, was in der Regel einer gewissen herstellereitigen Standardisierung geschuldet ist.

Um aber trotzdem einen Einfluss der Traktionsart auf die Masse eines Fahrzeuges ableiten zu können, eignet sich der Vergleich von ähnlichen oder sogar gleichen Fahrzeugen einer Bauart, die mit unterschiedlichen Antriebssystemen, aber ähnlicher Leistung und Ausstattung verfügbar sind. Aus Tabelle 2-1 bis 2-5 und 2-7 sind dies die Fahrzeuge gemäß der folgenden Tabelle 5-4. Farblich und mit gleicher laufender Nummer sind die zusammengehörigen Fahrzeuge gleicher Bauart, aber mit unterschiedlicher Antriebstechnik gelistet. Für die Datengrundlage gelten auch hier die Hinweise aus Kapitel 2.1 dieses Dokuments.

Ergänzend sei erwähnt, dass einige Fahrzeuge im folgenden Vergleich (z.B. die BR 474), eine unterschiedliche installierte Leistung bei Gleichstrom- oder Wechselstrombetrieb aufweisen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass als Leistung bei Wechselspannung die Transformatorleistung in den Quellen genannt wird. Hier muss jedoch die Versorgung der Hilfsbetriebe als leistungserhöhend berücksichtigt werden.

Lfd.-Nr.	Fahrzeugtyp/-baureihe	Traktionssystem	Installierte Leistung	Fahrzeugmasse	Quelle
1	BR 474 (ES)	1,2 kV Gleichspannung	8 x 115 kW = 920 kW	100 t	[41]
	BR 474 (MS)	1,2 kV Gleichspannung, 15 kV Wechselspannung	8 x 115 kW = 920 kW 1.500 kVA	106 t	[41]
2	BR 490 (ES)	1,2 kV Gleichspannung	8 x 200 kW = 1.600 kW	125 t	[41]
	BR 490 (MS)	1,2 kV Gleichspannung, 15 kV Wechselspannung	8 x 200 kW = 1.600 kW 1.708 kVA	134 t	[41]
	BR 490 (MS)	1,2 kV Gleichspannung, 25 kV Wechselspannung	8 x 200 kW = 1.600 kW 1.708 kVA	132 t	projektiert aber nicht ausgeführt
3	BR 622	Dieselelektrisch	3 x 390 kW = 1170 kW	98 t	
	i-LINT	Brennstoffzelle	2 x 200 kW = 400 kW	92 t	
4	AGC (4-teilig)	Dieselelektrisch	2 x 662 kW = 1.324 kW	161,2 t	
	AGC (4-teilig)	Dieselelektrisch, 1,5kV Gleichspannung	2 x 662 kW = 1.324 kW und 1.300 kW	163,2 t	
	AGC (4-teilig)	1,5 kV Gleichspannung, 25 kV Wechselspannung	1.300 kW	152,8 t	
5	Talent 1, BR 644	Dieselelektrisch	2 x 505 kW = 1.010 kW	101 t	
	Talent 1 ÖBB Rh 4023	15 kV Wechselspannung	1.500 kW	94,5 t	
6	GTW 2/6 (Veolia NL)	1,5 kV Gleichspannung	1.100 kW	65,5 t	
	GTW 2/6 (GKB, AT)	Dieselelektrisch	1.100 kW	68 t	
7	Desiro ML (Mittelrheinbahn)	15 kV Wechselspannung	2.600 kW	133 t	[42]
	Desiro ML SNCB	3kV Gleichspannung	2.200 kW	141 t	[42]
	Desiro ML SNCB	3kV Gleichspannung, 25 kV Wechselspannung	2.200 kW	148 t	[42]
	Desiro ÖBB Cityjet	15 kV Wechselspannung, 25 kV Wechselspannung	2.600 kW	145,4	[62]
8	Flirt (SNTF)	25 kV Wechselspannung	2.300 kW	120 t	[63]
	Flirt SBB	15 kV Wechselspannung	2.600 kW	120 t	

Tab. 5-4: Vergleich der Massedifferenz nach Fahrzeugvariante

Bei der Baureihe 474 (Nr. 1) lässt sich bei gleicher installierter Leistung eine Masseerhöhung für den zusätzlichen Wechselstromanteil von 6 t erkennen, bei der Baureihe 490 (Nr. 2) sind es 9 t bei 15 kV und 7 t bei 25 kV Wechselspannung.

Bei den Fahrzeugen der Bauart Talent 1 (Nr. 5) erkennt man eine Massedifferenz zwischen dieselelektrischem und Wechselstromantrieb von 6,5 t zugunsten der elektrischen Traktion bei gleichzeitig höherer installierter Leistung.

Etwas geringer fällt der Nachteil mit 2,5 t für die dieselelektrische Traktion beim GTW 2/6 (Nr. 6) im Vergleich zur Gleichspannungstraktion aus.

Einen weiteren direkten Vergleich ermöglicht der AGC (Nr. 4), wo die reine Zweisystemvariante für GS- und WS-Betrieb 8,4 t leichter als die reine dieselelektrische Variante und 10,4 t leichter als die Zweisystemvariante für Diesel- und GS-Traktion bei fast gleicher installierter Leistung ist.

Ähnlich große Unterscheide zeigt Nr. 7 für den Desiro ML: die leichteste Variante ist die 15 kV-WS-Ausführung, wohingegen die reine 3 kV-Ausführung bei geringerer Leistung 8 t schwerer ist und die

Kombination aus 3 kV und 25 kV weitere 7 t Mehrgewicht, in Summe also 15 t gegenüber der reinen 15 kV-Variante aufweist. Die Variante mit 15 und 25 kV-WS-Ausrüstung ist hingegen nur 12,4 t schwerer.

Letztes Paar im Vergleich ist der Flirt (Nr. 8), wobei hier die 15 kV und die 25 kV Ausführung, bei geringerer Leistung der 25 kV-Variante, gleich schwer sind.

Das Paar Nr. 3 für den Lint zeigt in der dieselmechanischen Version 6 t Mehrgewicht gegenüber dem mit Brennstoffzelle angetriebenen iLint, hat allerdings auch fast dreimal so viel installierte Leistung.

Damit lassen sich folgende qualitative Aussagen zum Masseinfluss der unterschiedlichen Antriebssysteme vornehmen:

1. Tendenziell am leichtesten sind elektrische Antriebe, gespeist aus Gleichstrom mit geringer Spannung
2. Bei den Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb, gespeist aus Wechselspannung, lassen sich bei 25 kV, 50 Hz-Systemen geringere Gewichte als bei Speisung aus 15 kV, 16,7 Hz Wechselspannung erzielen
3. Deselektische Antriebe sind in der Regel schwerer als Fahrzeuge, die aus Gleich- oder Wechselspannung gespeist werden. Für dieselmechanische oder dieselhydraulische Antriebe liegen keine verwendbaren Angaben vor.
4. Bei Zweisystemfahrzeugen lässt sich kein einheitlicher Massetrend ableiten, zu unterschiedlich sind offenbar die abgeforderten Fahrleistungen.

Diese Reihenfolge erscheint überraschend, wenn man Abb. 2-24 erneut betrachtet. Dort kann man tendenziell geringere bezogene Massen bei Brennkrafttriebwagen erkennen. Hierfür kann als Grund nur angeführt werden, dass die fahrdynamischen Anforderungen an Brennkrafttriebwagen grundsätzlich geringer als bei Elektrotriebwagen sind, somit wird die Fahrzeugmasse durch kleinere Antriebsanlagen positiv beeinflusst. Hierzu noch folgende grobe Abschätzung:

Gemäß Datenblatt der Firma MTU [48] wiegt ein einbaufertiges Powerpack (also die Kombination aus Dieselmotor, Getriebe, Kompressor, Lichtmaschine inkl. Einbaurahmen) für einen 6-Zylinder-Reihenmotor mit einer Leistung von 315 kW bis 390 kW zwischen 3.400 kg und 4.500 kg im befüllten Zustand. Dies sind Motoren, welche sehr häufig bei den betrachteten Fahrzeugen gemäß Tabelle 2-5 verwendet werden. Dazu müssen dann noch die Kühlanlage, die Abgasanlage, die Radsatzgetriebe und der Kraftstofftank als wesentliche Einrichtung hinzugezählt werden, so dass ein Gesamtgewicht von ca. 6.500 kg für die große Dieselantriebsanlage zu veranschlagen ist.

Aufgrund der Redundanz der Antriebsanlagen summiert sich das Gewicht der Antriebsanlage eines Dieseltriebwegens somit auf einen Wert zwischen 10.800 kg und 13.000 kg.

Im Vergleich kann man bei einem mit Wechselspannung betriebenen Triebwagen folgende Ausstattung einplanen:

- Hochspannungsdachausrüstung mit Stromabnehmer und Hauptschalter (ca. 200 kg)
- Haupttransformator mittlerer Leistung (ca. 5.500 kg)
- vier bis acht Drehstromfahrmoren inkl. Getriebe (ca. 750 kg pro Fahrmotor)
- Netzstromrichter (ca. 150 kg, i. d. R. redundant, also zweimal vorhanden)
- Motorstromrichter (ca. 150 kg pro angetriebenes Drehgestell)
- Hilfsbetriebe- bzw. Bordnetzrichter und Batterieladegerät (ca. 200 kg, i. d. R. ebenfalls redundant vorhanden)
- periphere Einrichtungen (400 kg für Drosseln, Vorladeeinheit, Leitungen)

Für ein einfaches Fahrzeug mit vier angetriebenen Drehgestellen, bzw. acht angetriebenen Radsätzen, wie bei den S-Bahnen nicht unüblich, summiert sich somit die Traktionsausrüstung entsprechend obiger Aufstellung auf rund 13.400 kg. Viele der betrachteten Triebfahrzeuge haben darüber hinaus redundante Hochspannungsausrüstungen, was zu einem entsprechenden Mehrgewicht zu Ungunsten der elektrischen Traktion führt.

In diesem Vergleich ergibt sich für kleinere Dieselantriebe also ein Massevorteil von rund 3.000 kg, bei großen Dieselantrieben ergibt sich ein nährungsweise gleiches Gewicht wie bei einer für Wechselspannung ausgelegten Traktionsanlage.

5.3 Fahrdynamische Eigenschaften

Entsprechend der vorhergehenden Betrachtungen im Kapitel haben auch die fahrdynamischen Eigenschaften, also maximale Beschleunigung, maximale Anfahrzugkraft und die daraus resultierende installierte Antriebsleistung einen Einfluss auf die Masse der Fahrzeuge und ihrer Antriebsanlage.

Die nachfolgenden Tabellen 5-5 bis 5-8 zeigen neben der installierten Leistung auch die Anfahrzugkraft sowie die maximale Beschleunigung der bisher schon betrachteten Fahrzeuge aus den Tabellen 2-1 bis 2-5, ebenfalls wieder nach Fahrzeugtyp untergliedert:

Lfd. Nr.	Bauart/ Baureihe	Max. Beschleunigung in m/s ²	Dauerleistung	Max. Anfahrzugkraft in kN	Quelle
1.1	480	1,0	8 x 90 kW = 824 kW	90	[37]
1.2	481/482	1,0	6 x 100 kW = 600 kW	90	[38]
1.3	483 (2-teilig)	1,0	6 x 140kW = 840 kW	104	
1.4	484 (4-teilig)	1,0	12 x 140 kW = 1.680 kW	208	
1.5	485/885	0,75	4 x 150 kW = 600 kW	-	
2.1	472/473	1,15	12 x 125 kW = 1.500 kW	-	[39]
2.2	474/874 ES	-	8 x 115 kW = 920 kW	-	[40]
2.3	474/874 MS	-	8 x 115 kW = 920 kW	-	[40]
2.4	490/1490 ES	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	173	[41]
2.5	490/1490 MS	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	173	[41]

Tabelle 5-5: Angaben zu Leistung und fahrdynamischen Kenndaten von Gleichstrom-S-Bahnen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben)

Lfd. Nr.	Bauart/ Baureihe	Max. Beschleunigung in m/s ²	Dauerleistung	Max. Anfahrzugkraft in kN	Quelle
3.1	420	1,0	2.400 kW	180	[19]
3.2	422	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	145	[22]
3.3	423	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	145	[21]
3.4	424	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	150	[21]
3.5	430	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	145	[18]
3.6	442	1,1	3.030 kW	192	[43]
3.7	1442 (3-teilig)	1,1	2.020 kW	-	
3.8	1442 (4-teilig)	1,1	3.030 kW	192	[43]
3.9	1442 (5-teilig)	1,03	3.030 kW	-	
3.10	Lok 146.1 plus 3 Do-Wagen	-	5.600 kW	300	
3.11	Lok 146.1 plus 5 Do-Wagen	-	5.600 kW	300	
3.12	Lok 111 plus 3 x-Wagen	-	3.850 kW	280	[4]
3.13	Lok 111 plus 3 x-Wagen	-	3.850 kW	280	[4]

Tabelle 5-6: Angaben zu Leistung und fahrdynamischen Kenndaten von Wechselstrom-S-Bahnen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben)

Lfd. Nr.	Bauart/ Baureihe	Max. Beschleunigung in m/s ²	Dauerleistung	Max. Anfahrzugkraft in kN	Quelle
4.1	ET 425	1,0	8 x 200 kW = 1.600 kW	150	[21]
4.2	ET 426	0,88	4 x 200 kW = 800 kW	75	[21]
4.3	Desiro ML	-	8 x 210 kW = 1.680 kW	170	[6], [42]
4.4	427 (Flirt)	0,87	2.000 kW	200	
4.5	Flirt (DB Regio)	0,91	4 x 500 kW = 2.000 kW	-	
4.6	Flirt 3 (Veolia)	0,93	3 x 500 kW = 1.500 kW	-	
4.7	Flirt 6 (Veolia)	0,79	4 x 500 kW = 2.000 kW	-	
4.8	Flirt 4 (DB Regio)	1,0	4 x 500 kW = 2.000 kW	-	
4.9	Coradia Continental 3-teilig	-	2.160 kW	-	
4.10	Coradia Continental 4-teilig	-	2.880 kW	-	
4.11	Coradia Continental 5-teilig	-	2.880 kW	-	
4.12	Coradia BR 1440	-	2.900 kW	-	
4.13	iLINT	-	2 x 200 kW = 400 kW	-	[44]
4.14	BR 442 (2-teilig)	1,1	2.020 kW	128	
4.15	BR 442 (3-teilig)	1,1	2.020 kW	128	
4.16	BR 442 (4-teilig)	1,1	3.030 kW	192	[43]
4.17	BR 442 (5-teilig)	1,03	3.030 kW	192	
5.1	Lok 141 plus 3 n-Wagen	-	2.310 kW	206	[45]
5.2	Lok 141 plus 5 n-Wagen	-	2.310 kW	206	[45]
5.3	RRX (Desiro HC)	-	8 x 420 kW = 3.360 kW	-	[5]
5.4	KISS (Odeg, 4-teilig)	0,63	4 x 750 kW = 3.000 kW	200	
5.5	445 (4-teilig)	1,2	2 x 2.300 kW = 4.600 kW	181	[8]
5.6	445 (4-teilig)	1,2	2 x 2.300 kW = 4.600 kW	181	[8]
5.7	446 (5-teilig)	1,2	2 x 2.300 kW = 4.600 kW	181	[8]

Tabelle 5-7: Angaben zu Leistung und fahrdynamischen Kenndaten von elektrisch angetriebenen Regionalbahnen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben)

Lfd. Nr.	Bauart/ Baureihe	Max. Beschleunigung in m/s ²	Dauerleistung	Max. Anfahrzugkraft in kN	Quelle
6.1	Regio Shuttle RS 1	1.2	2 x 265 kW = 530 kW	-	
6.2	Regio Shuttle RS 1	1.2	2 x 265 kW = 530 kW	-	
6.3	BR 640, Lint (1-teilig)	-	315 kW	-	
6.4	BR 614 (3-teilig)	-	2 x 368 kW = 736 kW	-	
6.5	BR 628.4	-	485 kW	-	[11]
6.6	BR 642 Desiro Classic	1,1	2 x 275 kW = 550 kW	-	
6.7	BR 648.0, Lint (2-teilig)	-	2 x 315 kW = 630 kW	-	
6.8	BR 648.1, Lint (2-teilig)	-	2 x 315 kW = 630 kW	-	
6.9	BR 648.2, Lint (2-teilig)	-	2 x 335 kW = 670 kW	-	
6.10	BR 648.3, Lint (2-teilig)	-	2 x 335 kW = 670 kW	-	
6.11	BR 620 (3-teilig)	1,0	4 x 390 kW = 1.560 kW	-	[9], [46]
6.12	BR 622 (2-teilig)	1,0	3 x 390 kW = 1.170 kW	-	[9], [46]
6.13	BR 646.0, GTW 2/6 (DB Regio)	0,85	550 kW	62	
6.14	BR 646.1, GTW 2/6 (UBB)	0,85	550 kW	62	
6.15	BR 646.0, GTW 2/6 (Odeg)	0,77	2 x 382 kW = 764 kW	80	
6.16	BR 643	0,85	2 x 315 kW = 630 kW	-	
6.17	BR 644	1,0	2 x 505 kW = 1.010 kW	-	
6.18	Itino RMV	0.82	2 x 570 kW = 1.140 kW	72	
6.19	Integral	0,7	3 x 315 kW = 945 kW	-	[47]
6.20	Pesa Link	-	2 x 390 kW = 780 kW	-	
6.21	BR 632	-	2 x 390 kW = 780 kW	-	[49]
6.22	BR 633	-	2 x 625 kW = 1250 kW	-	[49]

Tabelle 5-8: Angaben zu Leistung und fahrdynamischen Kenndaten von nicht-elektrisch angetriebenen Regionalbahnen (alle Daten, wenn nicht anders ausgewiesen: Herstellerangaben)

Leider bleibt der Vergleich lückenhaft, denn von den Herstellern werden nicht alle benötigten Angaben in der notwendigen Eindeutigkeit veröffentlicht. So fehlt die klare Kennzeichnung von Dauerleistung oder Kurzzeitleistung in der Regel ebenso, wie der Geschwindigkeitsbereich, bis zu dem die maximale Beschleunigung gehalten wird. Viele Hersteller machen gar keine Angaben zu Beschleunigung oder Zugkraft.

Obwohl die Werte für die Anfahrbeschleunigung für alle Fahrzeugtypen auf ähnlichem Niveau liegen, ergibt sich hier nur eine scheinbare Gleichheit. Häufig entsprechen die Angaben nur der Beschleunigung bis zum Typenpunkt der Antriebsmotoren oder bis zum ersten Schaltpunkt der mechanischen Getriebe, und fallen danach ab. Sie liegt im Bereich von 0,7 bis 1,0 m/s². Eine vergleichbare Angabe, wie sie z.B. beim Kraftfahrzeug mit den Werten für den Bereich von 0 bis 100 km/h oder die Elastizität von 60 bis 100 km/h angegeben werden, würde viel Transparenz bringen, ist aber nicht üblich.

Bei einer Visualisierung der installierten Leistung bei Bezugnahme auf die Anzahl der Sitzplätze und auf die Leermassen aus Kapitel 2 ergeben sich die Darstellungen in Abb. 5-1 und 5-2. Es lässt sich ableiten, dass die installierte Leistung der Brennkrafttriebswagen sowohl bezogen auf die Sitzplätze als auch bezogen auf die Leermasse deutlich geringer ist, als bei den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

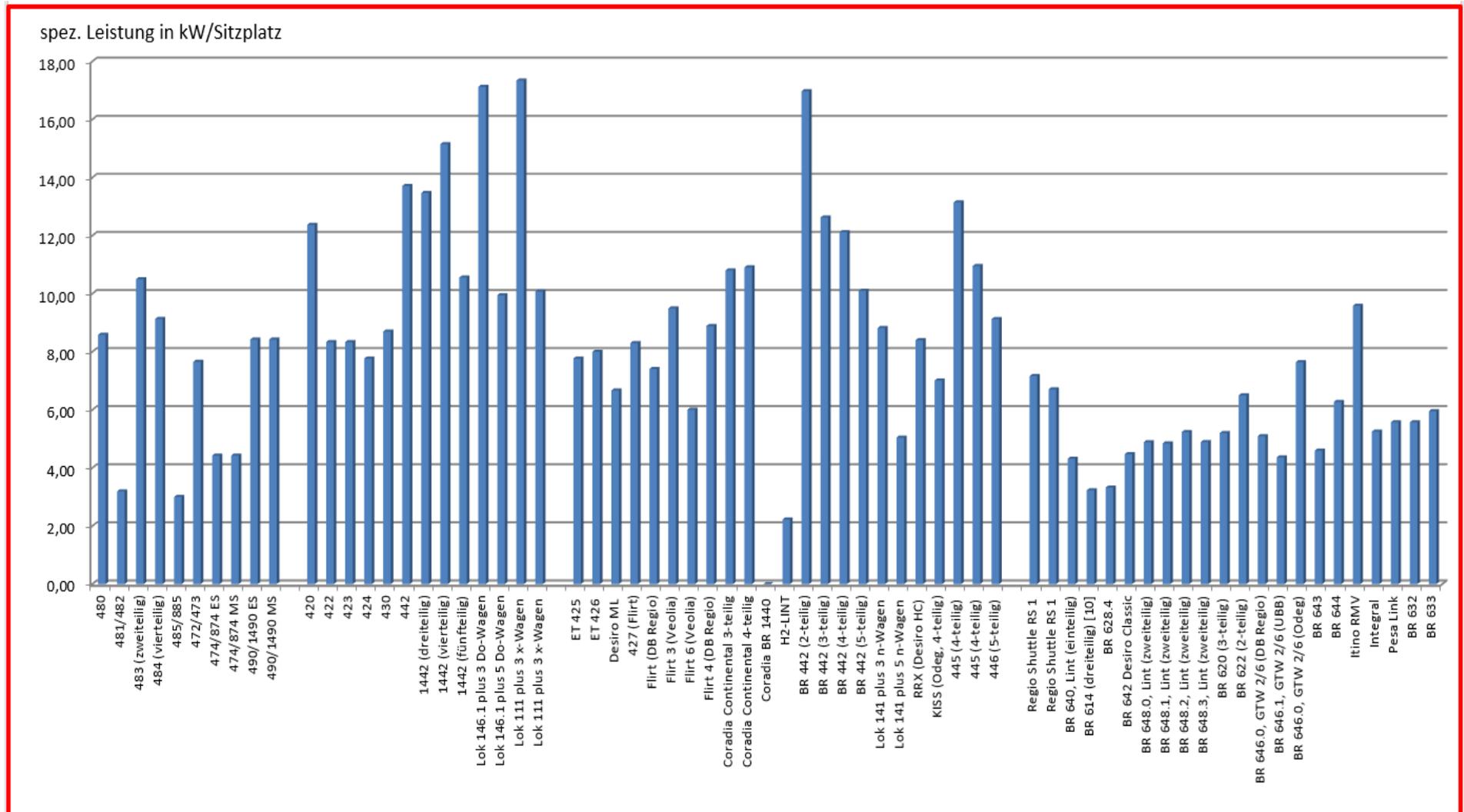


Abb. 5-1: Spezifische Leistung in kW pro Sitzplatz für alle betrachteten Fahrzeuge

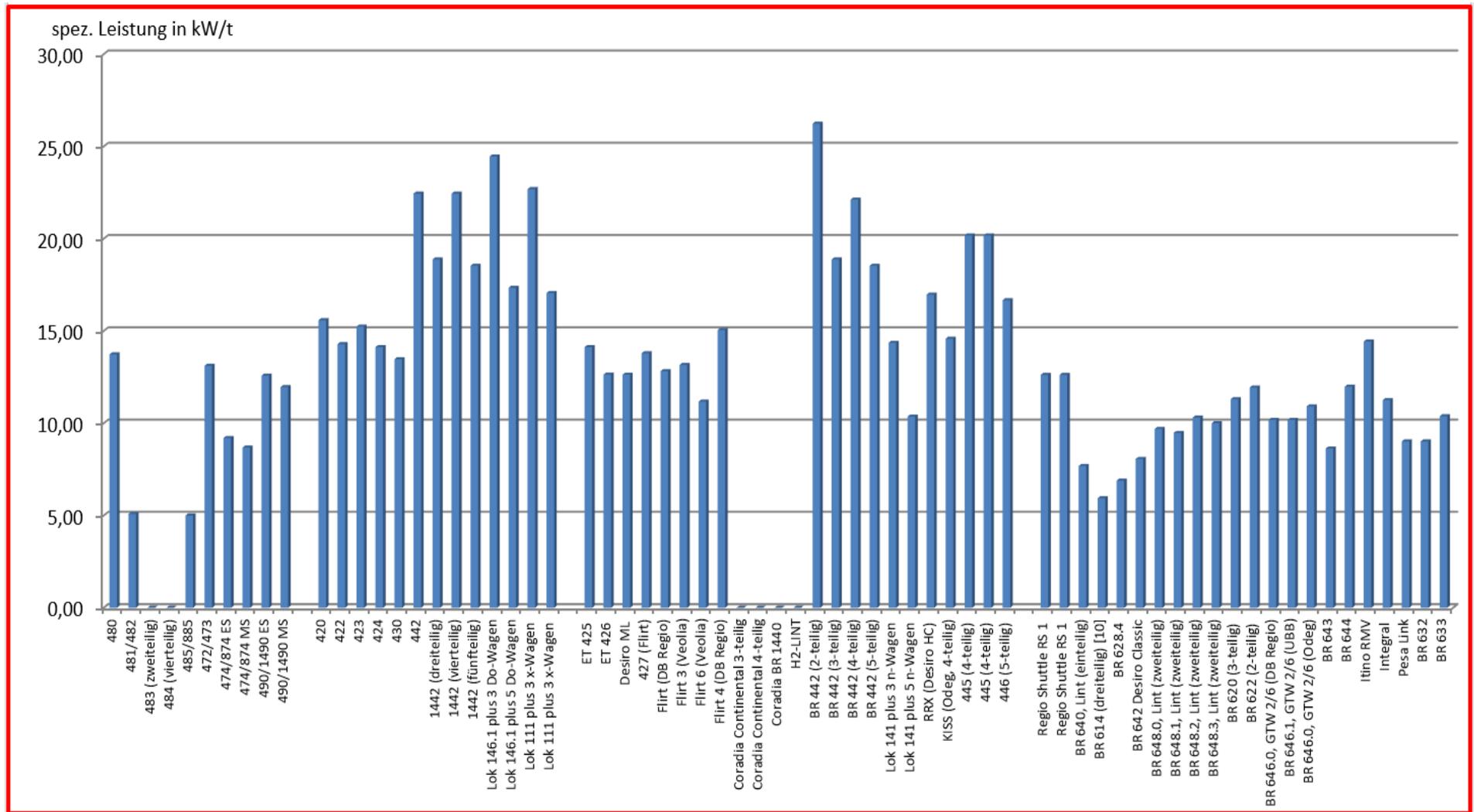


Abb. 5-2: Spezifische Leistung bezogen auf die Fahrzeugleermasse, Angaben in kW/t

Die Anfahrzugkraft ist ebenfalls deutlich niedriger (zumindest auf Basis der wenigen, vorliegenden Daten). Tabelle 5-9 zeigt die zusammengefassten Werte für die installierte Leistung und die Anfahrzugkraft. Die Mittelwertbildung für die Anfahrzugkraft erfolgt dabei selbstverständlich auf Basis der hinterlegten Werte und nicht gemittelt über alle Fahrzeuge des jeweiligen Einsatzbereiches.

Einsatzbereich	Installierte Leistung in kW	Mittelwert der installierten Leistung in kW	Anfahrzugkraft in kN	Mittelwert der Anfahrzugkraft in kN
Gleichstrom-S-Bahnen	600 – 1.680	1.108	90 - 208	140
Wechselstrom-S-Bahnen (ohne Varianten mit Lokomotive)	1.600 – 3.030	2.212	145 - 192	164
Wechselstrom-S-Bahnen (mit Varianten mit Lokomotive)	1.600 – 5.600	2.985	145 - 300	210
Elektrisch angetriebene Regionalbahnen	800 – 4.600	2.964	75 - 206	178
Brennstoffzellentriebwagen	400	400	-	-
Brennkrafttriebswagen	315 – 1.410	767	62 - 80	68

Tabelle 5-9: Angaben zur installierten Leistung und Anfahrzugkraft der betrachteten Fahrzeuge gemäß Tabellen 5-5 bis 5-8

Der einzige Triebwagen mit Brennstoffzelle (iLint) liegt bezüglich seiner installierten Leistung im Bereich der Brennkrafttriebswagen (aus denen er ja auch abgeleitet wurde) und besitzt hier in jeder Hinsicht eine Sonderrolle.

Betrachtet man an dieser Stelle andere Verkehrsträger, so fällt auf, dass insbesondere beim Automobil dem Thema Wasserstoff eine besondere Bedeutung zukommt (z.B. [79]). Dieser Energieträger bietet betrieblich aufgrund seiner relativ schnellen Betankung, der geringen Emissionen und der im Vergleich zur Batterie großen Reichweite Vorteile, die dem Betriebsverhalten eines Dieseltriebwegens nahe kommen.

5.4 Triebwagen mit Traktionsbatterie

Neben den bisher betrachteten Fahrzeugtypen befinden sich darüber hinaus Elektrotriebwagen in teilweise weit vorangeschrittenem Entwicklungsstadium, bei denen zusätzlich zur Energiebereitstellung über den Fahrdrabt auch Batterien für Traktionszwecke eingesetzt werden. Einen Überblick über die Entwicklung von Triebwagen mit Traktionsbatterie in Deutschland und dem europäischen Ausland gibt [76]. Darin wird auch auf die weiter vorangeschrittene Entwicklung bei Straßenbahnen hingewiesen, allerdings auch bemerkt, dass Abschnitte ohne Fahrdrabt bei Straßenbahnen deutlich kürzer und die Fahrzeuge viel leichter als im Vollbahnbereich sind. Ähnlich sieht die Situation bei Bussen des Nahverkehrs aus. Daher werden Vergleiche mit diesen Fahrzeugen wegen ihrer mangelnden Übertragbarkeit nicht weiter verfolgt.

Mit [69] ist eine umfassende Studie zum Stand der Technik bei den Batterien und ihr geplanter Einsatz bei neuen Fahrzeugen vorgestellt worden. Diese Studie wird hier herangezogen, um den Einfluss der Batterietechnik auf neue Fahrzeugkonzepte zu bewerten. Tabelle 5-10 zeigt Kenndaten von drei aktuell in der Entwicklung befindlichen Zwei-System-Elektrotriebwagen, also Fahrzeuge mit der Kombination aus 15 kV-Wechselspannungsversorgung und zusätzlicher Traktionsbatterie sowie die Baureihe 515. Bei der Baureihe 515 handelt es sich um das letzte Serienfahrzeug, welches in Deutschland mit Batterieantrieb im Einsatz war. Bei dieser Baureihe fehlte jedoch die Möglichkeit zum Nachladen im Betrieb, es handelte sich hier um einen reinen Batterietriebwagen, der nach Betriebsende an einer stationären Ladestation aufgeladen wird.

	ÖBB-Cityjet ECO	Talent 3 BEMU	Mireo	ETA 515 1. BS	ETA 515 5. BS
Quelle	[68], [73]	[69]	[69]	[70], [71]	
Kapazität der Traktions- batterie in kWh	528	300	700	390	520
Batterietyp	NCM/LTO	NCM/C	NCM/LTO	Bleibatterie	
Reichweite im Batteriebe- trieb in km	80	35 - 40	80 - 120	200 – 350	
Batteriegewicht in kg	14.000*	7.500**	9.500**	17.000**	22.600**
Vmax	120	140	-	100	
Gewichtsbezogene Kapazität kg/kWh	26,5	17 - 25	13,6	43,6	43,5

*) Gewicht der Batterie plus zusätzliche, notwendige Ausrüstung zur Nutzung der Batterien

***) reines Batteriegewicht

Tab 5-10: Vergleich einiger Kenndaten von Fahrzeugen mit Traktionsbatterie

Nach [69] liegt die minimal notwendige Batteriekapazität bei 700 kWh. Ob hierin auch eine ausreichende Reserve für die Hilfsbetriebe, insbesondere Klima- und Heizanlagen enthalten ist, geht aus der Studie nicht hervor. Erstaunlich ist in diesem Zusammenhang der gegenüber dem ETA 515 betriebene technische Aufwand, der zwar in einer deutlich gesteigerten Batterieleistungsfähigkeit mündet, nicht hingegen zu den schon damals erreichten Reichweiten führt.

In [78] wird hinsichtlich der Lebenszykluskosten eines Elektrotriebzuges mit zusätzlicher Traktionsbatterie gegenüber einem Dieseltriebwagen ein Kostenvorteil von rund 25 % ermittelt. Da dieser Vergleich aber nur die Fahrzeugbeschaffungskosten, die Energiekosten und sonstige LCC-Kosten ohne den notwendigen Tausch der Batterien beinhaltet, ist diese Aussage zumindest fragwürdig. In Verbindung mit den o.g. Aussagen zu den Fahrzeugmassen kann der Batteriezug nicht unter dem Gesichtspunkt der finanziellen Wirtschaftlichkeit, sondern nur unter dem Gesichtspunkt der Attraktivitätssteigerung des Regionalverkehrs und der Reduzierung der lokalen Emissionen (Schadstoffe sowie Geräusentwicklung) angemessen bewertet werden. Die Schaffung von umsteigefreien Direktverbindungen kann dabei im Vordergrund stehen.

Zum Thema der Wirtschaftlichkeit ist noch darauf hinzuweisen, dass die Verwendung von Traktionsbatterien bei Schienenfahrzeugen einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die Betriebsführung des Betreibers hat. Wesentlich für die Lebensdauer von Batterien ist der Entnahmegrad des Batteriestromes, welcher auf 50 bis maximal 60% der Nennkapazität zu begrenzen ist, sowie der Temperaturhub [69], [77]. Betreiber sind es heute durchaus gewohnt, ihre Fahrzeuge über einen längeren Zeitraum (z.B. am Wochenende oder an Feiertagen, bei denen das Verkehrsangebot reduziert ist) vollständig abgerüstet abzustellen. Dieser Modus wird bei Fahrzeugen mit Traktionsbatterien nicht mehr möglich sein, denn die Batterien sind auf eine bestimmte Temperatur angewiesen. Im Sommer kann dies kühlen bedeuten, im Winter beheizen. Somit müssen die reinen Stillstandszeiten, anders als bei reinen Elektro- oder Dieseltriebwagen, bei energetischen Betrachtungen berücksichtigt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei den Traktionsbatterien ist die Verfügbarkeit der Grundmaterialien für die Batterieherstellung und deren zu erwartenden Kosten. Gemäß [90] sind chemische Elemente wie Lithium, Magnesium, Kobalt, Mangan, Blei und Nickel als begrenzt verfügbar eingestuft. Wenn auch der motorisierte Individualverkehr zukünftig in größerem Umfang auf Traktionsbatterien für Elektroautos als Antriebsquelle setzt, so ist von einer deutlich gesteigerten Nachfrage nach diesen chemischen Elementen auszugehen. Damit steigen naturgemäß die Beschaffungskosten und damit auch die Lebenszykluskosten. Natürlich ist davon auszugehen, dass im gleichen Maße, wie die Nachfrage steigt, auch das Recycling von verbrauchten Batterien und damit die Rückgewinnung dieser Elemente erfolgen wird, aber auch in diesem Fall steigen unweigerlich die Beschaffungskosten für Batterien.

5.5 Zusammenfassung zu den Antriebsausrüstungen

Im Kapitel 5 dieses Dokuments werden die verschiedenen Antriebsausrüstungen und ihre sich ergebenden wesentlichen Kennwerte (Masse, Leistung, Zugkraft, Beschleunigung) betrachtet. Auch die heute sich abzeichnenden alternativen Antriebe wie Brennstoffzelle oder Traktionsbatterie werden betrachtet.

Es kann festgehalten werden, dass Antriebe, gespeist aus Wechselspannung, eine deutlich höhere installierte Leistung aufweisen und entsprechend höhere Zugkräfte abgeben, als die anderen betrachteten Antriebe, wobei die Mehrmasse, z. B. gegenüber Antrieben gespeist aus Gleichspannung moderat ausfällt. Nur bei reduzierten Fahrleistungen, wie sie die Mehrzahl der Dieseltriebwagen zeigen, lassen sich auch leichtere Antriebe darstellen.

Sollen die Elektrotriebzüge darüber hinaus in der Lage sein, eine Teilstrecke fahrleitungslos zurückzulegen, dann muss mit einer Mehrmasse von mindestens 7,5 t bei kleinen Fahrzeugen gerechnet werden. Diese Mehrmasse muss bei zukünftigen Fahrzeugkonzepten räumlich aber auch hinsichtlich der Radsatzlasten berücksichtigt werden.

Die Verwendung von Brennstoffzellenantrieben (ggf. zusammen mit Traktionsbatterien) bleibt gegenwärtig kleinen Fahrzeugen mit geringen Anforderungen an die Fahrdynamik vorbehalten.

Der bekannte Konflikt zwischen der Investition in die Infrastruktur versus der Investition in Zweisystemfahrzeuge bleibt bestehen: Zweisystemfahrzeuge für die elektrische Energiezuführung über eine Fahrleitung und die Zwischenspeicherung in Batterien für fahrleitungslose Abschnitte sind attraktiv, weil die Infrastruktur nicht ausgebaut werden muss und gleichzeitig Angebote geschaffen werden, bei denen der Fahrgast nicht in einen Dieseltriebwagen wechseln oder sogar mit einem Dieseltriebwagen unter Fahrleitung fahren muss.

Andererseits werden die Fahrzeuge dadurch teurer, schwerer und bis zu einem gewissen Grade wieder komplexer (also weisen eine abnehmende Zuverlässigkeit auf). Der zunehmende Bedarf für Batteriesysteme beim Kraftfahrzeug wird aufgrund der begrenzten Anzahl von Anbietern und Rohstoffen für Batterien nicht zu einer nennenswerten Kostenreduzierung führen. Es kann daher postuliert werden, dass die Batterietechnik keine übermäßige Verbreitung in der Bahntechnik erfahren wird.

Demgegenüber bleibt die Wasserstofftechnik sowohl unter Umweltgesichtspunkten als auch durch die große Reichweite für die Betriebsführung die attraktivere Wahl. Bei Verwendung der in [80] und [81] genannten Beschaffungskosten (ohne Berücksichtigung der Preiseskalation), liegen die veröffentlichten Mehrkosten in der Beschaffung für einen iLint bei gleicher Stückzahl zwar um rund 26 % über den Kosten eines Dieseltriebwagens, hier ist aber durch die Amortisation der Entwicklungskosten beim Erstprojekt mit einer Kostenreduzierung bei Folgebestellungen zu rechnen.

Wenn es schon zukünftig Zweisystemfahrzeuge für ausgewählte, begrenzte Einsatzbereiche sein sollen, so liegt die Zukunft eher in der Kombination von Brennstoffzelle und elektrischem Wechselspannungsantrieb.

6. Zwischenstand zur Bestandsaufnahme bei aktuellen Fahrzeugen, Infrastruktur und Antriebstechnik

In den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit wurde eine Bestandsaufnahme zu den heute im deutschen Nah- und Regionalverkehr verwendeten Fahrzeugen durchgeführt. Die betrachteten Fahrzeuge wurden zehn unterschiedlichen Typen von Fahrzeugkonzepten zugeordnet. Es wurde untersucht, ob es einzelne Fahrzeugkonzepte gibt, die eine besonders hohe Effizienz für die Nutzung durch Fahrgäste aufweisen.

Die ermittelte Bandbreite der Effizienz ist groß, lässt sich aber nicht in einem festen Muster einem bestimmten Fahrzeugkonzept zuschreiben. Vielmehr ist es die geeignete Kombination aus Sitzplatzangebot, Zugänglichkeit und spezifischer Masse, die ein effizientes Fahrzeug auszeichnen. Nur so ist es zu erklären, dass so unterschiedliche Fahrzeugkonzepte wie ein gemischtes ein- und doppelstöckiges Fahrzeug, einstöckige Fahrzeuge mit Jakobsdrehgestellen und Fahrzeuge mit konventioneller Drehgestellanordnung bezüglich der Effizienz nahezu gleichauf liegen (siehe Abb. 3-9 im Kap. 3.2). Die hinter den möglichen Kombinationen liegende Systematik wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch vertieft.

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, welche Einschränkungen hinsichtlich der Infrastruktur existieren und welche weitere Entwicklung die Infrastruktur nehmen wird.

Hier wird erkennbar, dass der Oberbau immer weniger zu einer Massebeschränkung der Fahrzeuge führen wird und gleichzeitig, bedingt durch die europäische Standardisierung, die Fahrzeugbegrenzungslinie durch Anwendung des GC-Profiles neue Potentiale für Doppelstockfahrzeuge ermöglicht. Dies ist insofern wichtig, weil der zusätzliche Bau neuer Bahnstrecken durch die starke Verdichtung in Ballungszentren und ökologische Interessen nur im geringen Umfang erfolgen wird, somit eine Kapazitätserweiterung für die weiter anwachsenden Mobilitätsbedürfnisse der Bevölkerung weitgehend über eine bessere Ausnutzung der vorhandenen Infrastruktur erfolgen kann.

Erkennbar ist weiterhin der Trend zur zunehmenden Elektrifizierung von Zubringerstrecken bei gleichzeitiger Reduzierung des Anteils von Zugfahrten, die durch Verbrennungsmotoren angetrieben sind.

Seitens der Fahrzeugindustrie wird der Trend zur Elektrifizierung durch Hybridfahrzeuge unterstützt, die fahrdrahtlose Abschnitte mit zusätzlichen Batteriespeichern in den Fahrzeugen in unterschiedlichen Erprobungsträgern testen. Aufgrund der damit verbundenen Nachteile wie Mehrmasse, höhere Anschaffungskosten und der Erhöhung der Lebenszykluskosten ist bei Hybridfahrzeugen aber nur von einer Nischen- oder Übergangstechnologie auszugehen. Die Zukunft der fahrleitungsfreien Fahrzeuge gehört dem Wasserstoffantrieb.

Bei den Bahnsteigen ist, bedingt durch die lange Nutzungsdauer der Infrastruktur, über einen langen Zeitraum mit Höhen von 550 mm und 760 mm zu rechnen, wobei der Vorrang beim Bau von 760 mm hohen Bahnsteigen schon im § 13 EBO festgehalten ist.

7. Ableitung eines zukünftigen Regionalbahnfahrzeugs auf Basis konventioneller Fahrzeugkonzepte

Nach der Definition der infrastrukturseitigen Anforderungen erfolgt unter Berücksichtigung der im Kapitel 3 definierten Effizienz die Ableitung zukünftiger Fahrzeugkonzepte, die für den Einsatz im Regionalverkehr zu erwarten sind.

Im ersten Schritt werden dabei die Bausteine für ein effektives Fahrzeugkonzept herausgearbeitet und der Fokus liegt auf den für den Fahrgast relevanten Kriterien wie Platzverhältnisse und Einstieg. Inwieweit sich dann entsprechende Antriebe und notwendige Betriebsmittel integrieren lassen, wird im folgenden Schritt beleuchtet.

7.1 Wirtschaftliche und verkehrliche Randbedingungen

Ein Fahrzeugkonzept unterliegt stets gewissen betrieblichen und kommerziellen Randbedingungen, die für den Erfolg des Konzepts von erheblicher Bedeutung sind. Insofern ist es grundsätzlich möglich, dass bestimmte Konzepte nur unter bestimmten Randbedingungen sinnvoll umsetzbar sind.

So wird in [50] untersucht, ob lokomotivbespannte Reisezüge wirtschaftlicher als Triebzüge sind. Die Ergebnisse aus dem Fernverkehr lassen sich nicht automatisch auf Fahrzeuge des Nah- und Regionalverkehrs übertragen, aber einige Aspekte aus [50] sind trotzdem relevant für die weiteren Betrachtungen, es wird dort festgestellt: *„Zusammenfassend eignet sich der lokomotivbespannte Reisezug für den klassischen Fernverkehr mit langen Zügen, während der Triebzug eher bei kurzen Zügen und hohen Anforderungen an die Anfahrbeschleunigung seine Stärken ausschöpfen kann. Die Vorteile der Lokomotivbespannung bestehen andererseits bei den Beschaffungskosten, andererseits auch bei der längerfristigen Flexibilität...“* Weiterhin wird in [50] festgestellt, dass Triebzüge nur in großen Schritten den Kapazitätsbedarfen angepasst werden können, während Lokomotivzüge quasi wagenweise ergänzt werden können. Ob dieser Vorteil hingegen im Regionalverkehr wirklich nutzbar ist, muss hingegen bezweifelt werden, da die heutigen Betreiber das Stärken und Schwächen aus betrieblichen Gründen auf ein Minimum reduziert haben.

In [54] wird darauf hingewiesen, dass *„falsch verstandene Wirtschaftlichkeitsansätze, wie eine maximale Raumausnutzung für Sitzplätze“* zu einer in der Realität *„sinkenden Wirtschaftlichkeit und zu betrieblichen Problemen führen.“*

Wenn man die Effizienz eines Fahrzeugkonzepts daran bemisst, wie viele Fahrgäste transportiert werden können, verfällt man schnell dem Trugschluss, dass die „dichteste Packung“ die beste und effektivste Form des Transports darstellt. Die Qualität der Beförderung bemisst sich aber auch daran, wie bequem die Beförderung für den Reisenden gestaltet wird und wie er auch mit dem Transport von Fahrrädern und herkömmlichem Gepäck unterstützt wird. So wird in [51] davor gewarnt, Innovation dem niedrigsten Preis unterzuordnen, und den Schienenverkehr einem ausschließlichen kommerziellen Konkurrenzdruck mit dem Bus auszusetzen, den die Bahn realistischerweise nicht gewinnen kann. Ebenso wird in [51] darauf hingewiesen, dass sich der technische Fortschritt der Bahn nicht nur auf den Multimedia-Bereich beschränken darf, denn dies können die anderen Verkehrsträger ebenso gut. In [52] wurde, wiederum am Beispiel des Fernverkehrs, untersucht, inwieweit die Gepäckbeförderung einen Hinderungsgrund für die Benutzung der Bahn darstellt. Darin wird dargestellt, dass Gepäck in der Bahn dazu führt, *„dass bis zu 20 % der Sitzplätze nicht genutzt werden können, weil diese durch nicht ordnungsgemäß verstaubares Gepäck blockiert werden.“* Dazu kommt, dass die Fahrgäste ihr Gepäck in der Nähe ihres Sitzplatzes verstauen wollen, um den Verlust durch Diebstahl zu vermeiden. Weiterhin kann die Gepäckmitnahme nach [52] zu einer Vervielfachung der Fahrgastwechselzeiten führen.

Entsprechende Ansätze zur Optimierung werden in [53] genannt. Darin wird ausgeführt: *„Eine sehr positive Wirkung auf den Gesamtzeitbedarf zeigen Konzepte, bei denen sich die Fahrgastströme nach dem Betreten des Fahrzeugs aufteilen können. Dies kann entweder durch doppelstöckige Fahrzeuge erfolgen oder durch eine Türanordnung in den Viertelpunkten des Fahrzeuggrundrisses. Letzteres teilt den Fahrgastraum in vier gleich große Bereiche, jeder Eingangsbereich wird nur durch die halbe Anzahl*

an Reisenden betreten und jeder Reisende braucht nur den halben Weg zu einem Sitzplatz zurückzulegen. Die Fahrgastwechselzeit lässt sich dadurch spürbar verringern.“

Weiterhin wird in [53] u.a. empfohlen:

- Niveaugleicher Einstieg oder maximal eine Stufe
- Gangbreiten von mindestens 60 cm, besser 70 cm bis 90 cm
- Bodennahe gut verteilte Gepäckunterbringung (auch für große Gepäckstücke), keine Gepäckracks im Einstiegsbereich, am Waggonende oder in der Fahrzeugmitte
- Aufgelockerte Sitzplatzkonzepte mit höherem vis-a-vis-Bestuhlungsanteil

Aus den vorgenannten Gründen wird für die Ableitung eines zukünftigen Fahrzeugkonzeptes ein zweistufiger Ansatz gewählt. In der ersten Stufe wird entsprechend eines konventionellen Layouts ein Fahrzeugkonzept erarbeitet, welches auf der Basis der traditionellen Bewertung unter Berücksichtigung der Effizienz nach Gleichung 3 erfolgt. Im zweiten Schritt wird dann daraus ein Fahrzeugkonzept abgeleitet, welches die Hinweise nach [52] und [53] verstärkt aufnimmt.

7.2 Gesetzliche / normative Randbedingungen

Ein zukünftiges Fahrzeugkonzept muss mindestens den heutigen Stand der Normen und Gesetze einhalten, hinzu kommen noch die zu erwartenden Veränderungen. Ohne Zweifel kommt insbesondere der Frage nach der Zugänglichkeit zum Fahrzeug hierbei eine besondere Bedeutung zu, nicht nur, aber insbesondere für mobilitätseingeschränkte Menschen.

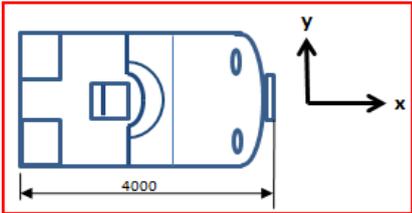
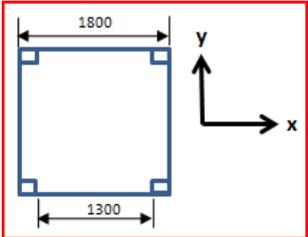
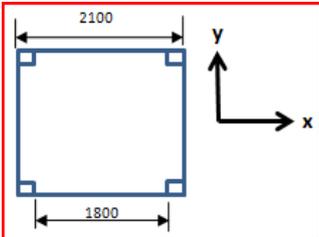
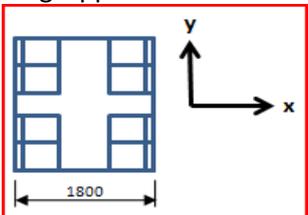
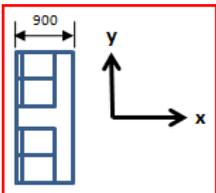
Die Verordnung Nr. 1300/2014 der EU-Kommission definiert die Anforderungen für die Fahrzeuge mit Blick auf mobilitätseingeschränkte Personen (TSI PRM). Entsprechend dieser Verordnung sind mindestens 10 % aller Sitzplätze eines Triebzuges oder Reisezugwagens je Klasse als Vorrangsitze für mobilitätseingeschränkte Personen zu kennzeichnen. Diese Sitze müssen mindestens eine Sitzbreite von 450 mm aufweisen. Weiterhin gilt es, mindestens zwei Rollstuhlplätze für Fahrzeuge bis 205 m Länge bereitzustellen.

In der folgenden Betrachtung werden die genannte Sitzbreite und auch die in der TSI PRM genannten Sitzfreiräume auf alle Sitzplätze übertragen, jeder Sitz hat damit die Qualität eines Behindertensitzes, mit Ausnahme der Klappsitze. Ebenso werden zwei Rollstuhlstellplätze entsprechend der TSI in der Form berücksichtigt, dass es nicht zu einer (in der heutigen Praxis häufig vorgenommenen) Doppelbelegung des Mehrzweckbereiches für Rollstuhlfahrer und Radfahrer oder Eltern mit Kinderwagen kommt. Diese Konkurrenzsituation ist ohne Frage nicht mehr zukunftsfähig. Das Thema Fahrradtransport wird im Kap. 8.4.2 betrachtet.

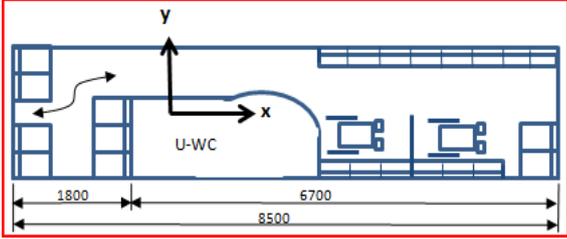
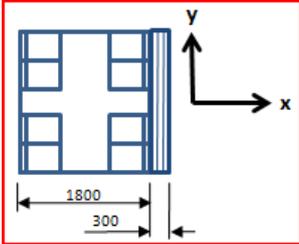
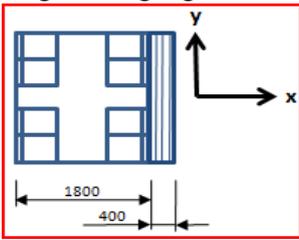
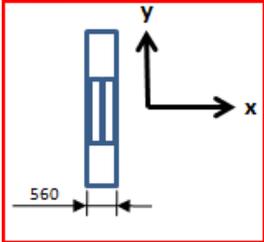
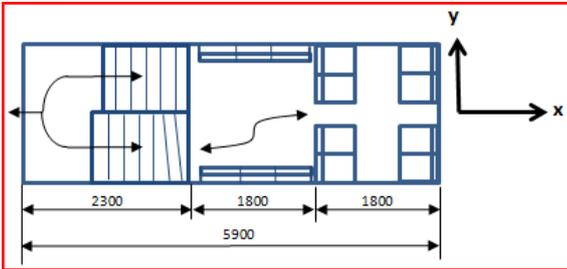
7.3 Bausteine für ein Fahrzeuglayout

Das Layout eines Regionalbahnfahrzeugs kann grundsätzlich aus den folgenden 14 Bausteinen gemäß Tabelle 7-1 bestehen, wobei sowohl der Entfall als auch Vielfache der Bausteine möglich sind. Die Bausteine 9, 10, 11, 13 und 14 sind ausschließlich bei Doppelstockfahrzeugen verwendbar, der Baustein 1 ist nur bei Endwagen möglich.

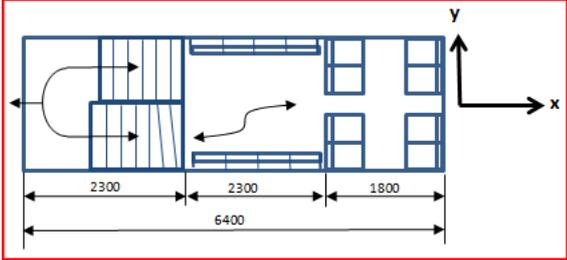
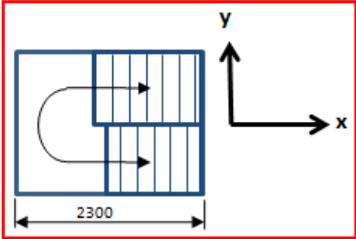
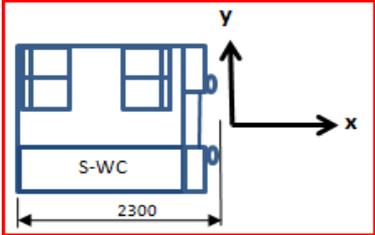
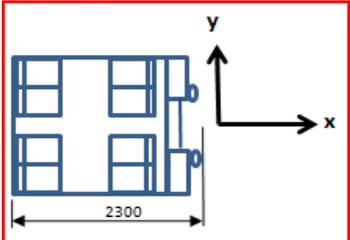
Die Abmessungen, die betrachtete Sitzplatzkapazität und auch die nach EN 15663 anzusetzenden Stehplatzflächen, auch für Treppenhäuser, sind in den Tabellen 7-1.1 bis 7-1.3 ausgewiesen.

Lfd.-Nr.	Bezeichnung/Darstellung	Inhalt
1	Führerraum 	Raum für den Triebfahrzeugführer und Bereich bis zur Stirnfläche der Stirnkupplung; eine Variante mit Schraubenkupplung und Seitenpuffer wird hier nicht betrachtet
2	Einstiegsbereich 1a 	Einstiegsbereich mit zwei Doppeltüren, 1.300 mm lichte Durchgangsweite; der Türauffangraum hat eine Breite von 1.800 mm; Stehfläche: 4,7 m ²
3	Einstiegsbereich 1b 	Einstiegsbereich mit zwei Doppeltüren, 1.800 mm lichte Durchgangsweite; der Türauffangraum hat eine Breite von 2.100 mm Stehfläche: 5,53 m ²
4	Sitzgruppe 	Standardsitzgruppe für acht vis-à-vis-Sitze oder äquivalent zu acht Sitzen in Reihenbestuhlung bei 900 mm Sitzteiler Stehfläche: 1,08 m ²
5	Einzelsitzreihe 	Sitzreihe für vier Sitze in Reihenbestuhlung bei 900 mm Sitzteiler Stehfläche: 0,54 m ²

Tab. 7-1.1: Bausteine für ein Regionalbahnfahrzeug

Lfd.-Nr.	Bezeichnung/Darstellung	Inhalt
6	Universaltoilette und nebenliegende PRM-Plätze sowie Sitzgruppe zum Verschwenken des Ganges 	Universaltoilette mit zwei Rollstuhlfahrerstellplätzen, 14 Klappsitzen und zwei PRM-Begleitersitzen sowie vorgelagerter Sitzgruppe mit sieben Sitzplätzen Stehfläche: 12,56 m ²
7	Wagenübergangsbereich kurz 	Wagenende mit halbem Wagenübergang zu einem benachbarten Wagen; kurze Ausführung für Fahrzeuge mit Jakobsdrehgestellen Stehfläche: 1,26 m ²
8	Wagenübergangsbereich lang 	Wagenende mit halbem Wagenübergang zu einem benachbarten Wagen; lange Ausführung für Fahrzeuge mit konventionellen Drehgestellen Stehfläche: 1,32 m ²
9	Treppenbereich 	Treppenbereich bei Niederflurfahrzeugen am Übergang zwischen Niederflur- und Hochflurbereich mit zwei Trittstufen (200 mm Stufenhöhe, 280 mm Stufentiefe) Stehfläche: 0,56 m ² Gepäckfläche: 0,90 m ²
10	Treppenhaus 1a 	Treppenhaus für Doppelstockwagen in geteilter Ausführung mit Podest zum Wagenende; acht feste und sechs Klappsitze im Obergeschoss, zwei Bereiche à 1.800 mm frei konfigurierbar im Untergeschoss; insbesondere für darunterliegende 1300er Tür Stehfläche im OG inkl Treppen und Zwischenetage: 7,67 m ²

Tab. 7-1.2: Bausteine für ein Regionalbahnfahrzeug

Lfd.-Nr.	Bezeichnung/Darstellung	Inhalt
11	<p>Treppenhaus 1b</p> 	<p>Treppenhaus für Doppelstockwagen in geteilter Ausführung mit Podest zum Wagenende; acht feste und acht Klappsitze im Obergeschoss, zwei Bereiche à 1.800 mm frei konfigurierbar im Untergeschoß; insbesondere für darunterliegende 1800er Tür</p> <p>Stehfläche im OG inkl Treppen und Zwischenetage: 8,67 m²</p>
12	<p>Treppenhaus zu 1a und 1b</p> 	<p>Für die weiteren Betrachtungen muss das Treppenhaus sowohl im Unter- als auch im Obergeschoss bzgl. der Abmessungen berücksichtigt werden. Die Stehfläche ist bei den Nummern neun und zehn einkalkuliert.</p>
13	<p>Wagenende mit Gummiwulstübergang und Standardtoilette sowie einer Sitzgruppe</p> 	<p>Wagenübergang mit Gummiwulstübergang, Sitzgruppe für vier Sitze und wahlweiser gegenüberliegender Standard-Toilette (z.B. bei Doppelstockwagen) oder Einbauraum für elektrische Ausrüstung</p> <p>Stehfläche: 1,08 m²</p>
14	<p>Wagenende mit Gummiwulstübergang und zwei Sitzgruppen</p> 	<p>Wagenübergang mit Gummiwulstübergang, Sitzgruppe für acht Sitze</p> <p>Stehfläche: 1,08 m²</p>

Tab. 7-1.3: Bausteine für ein Regionalbahnfahrzeug

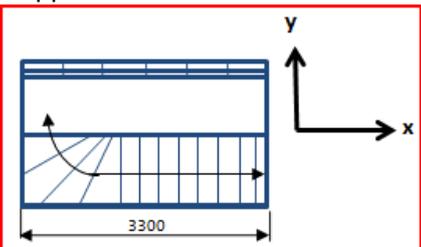
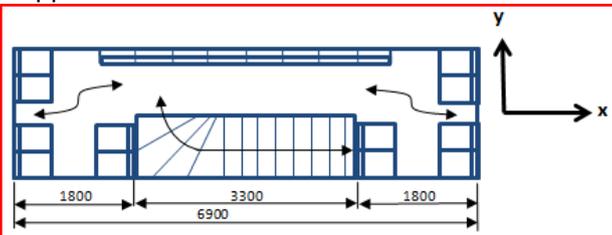
Die Abmessungen der Bausteine orientieren sich an den ausgeführten Fahrzeugen nach Tabelle 2-1 bis 2-6. Der Sitzteiler variiert bei den betrachteten Fahrzeugen zwischen 1.650 und 1.850 mm für die zweite Klasse, für die erste Klasse werden auch bis zu 2.100 mm Sitzteiler verwendet. Im Sinne dieser Grundsatzuntersuchung wird ein einheitlicher Sitzteiler von 1.800 mm gewählt, um eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit der Konzepte sicherzustellen. Dieser Wert ist auch durch die Anforderungen nach [90] abgedeckt. Die Verwendung eines ggf. großzügigeren Erste-Klasse-Bereiches oder von Kinderspielecken ist also für einen späteren Anwendungsfall möglich, hier aber nicht Betrachtungsgegenstand.

Die Orientierung bzgl. des Sitzteilers im oberen Bereich der heutigen ausgeführten Fahrzeuge soll einerseits dem zu erwartenden Komfortgewinn und andererseits der zu erwartenden weiteren Zunahme der Körpergröße der Fahrgäste Rechnung tragen.

Bei Anwendung der sogenannten Flugzeugbestuhlung wird mit 900 mm der halbe Wert vom vis-à-vis-Sitzteiler verwendet. Die Verwendung von Sitzen mit reduzierter Rückenlehnenstärke führt grundsätzlich, bei gleichem Komfort, zu einer Verkürzung des Sitzteilers in Reihenbestuhlung, stellt aber ebenfalls damit nur eine mögliche Ausführungsvariante für die Praxis dar und wird hier zunächst ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Die überwiegende Anzahl der betrachteten Fahrzeuge besitzt die klassische 2 + 2 Bestuhlung in einer Sitzreihe, was sich sowohl bei den tendenziell schmaleren (weil längeren) Einzelwagen als auch bei breiteren Wagen mit Jakobs-Drehgestellen stets realisieren lässt und somit universell anwendbar ist. Bei Verwendung der oben genannten Sitzbreite von 450 mm pro Einzelsitz und einem entsprechenden Freiraum zur Seitenwand und zum Nebensitz hat ein Doppelsitz eine Gesamtbreite von 1000 mm. In 2 + 2-Sitzanordnung lässt sich somit bei insgesamt 2.000 mm Quer-Platzbedarf für vier Sitze in einer Reihe ohne weitere Berücksichtigung des Fahrzeugaufbaus eine Gangbreite von mindestens 600 mm und damit eine gesamte Innenraumbreite von 2.600 mm realisieren. Es verbleiben damit problemlos auf jeder Wagenseite 100 mm für die Wagenkastenstruktur, die Isolierung und die Seitenwandverkleidung. Damit lassen sich sowohl die klassischen Einzelwagen von 26,4 m bzw. 26,8 m als auch alle Arten von Gelenkfahrzeugen abdecken. Diese Annahmen sind somit in erster Näherung - also vorbehaltlich einer weiteren, späteren Optimierung - allgemeingültig anwendbar. Kürzere Fahrzeugtypen können dann über einen ggf. breiteren Mittelgang oder breitere Sitze zusätzlichen Komfort bieten. Auf eine 3+2-Bestuhlung wird hier nicht eingegangen, da es sich, ähnlich wie bei einer zusätzlichen 1. Klasse, lediglich um eine Variante eines bestimmten Konzepts handelt, für die Vergleichbarkeit von Konzepten aber keinen Mehrwert bietet.

Weiterhin folgen hier die Bausteine 15 und 16, welche eine alternative Treppenform darstellen, auf die zu einem späteren Zeitpunkt noch eingegangen wird. Visualisierung gemäß Tabelle 7-2.

Lfd.-Nr.	Bezeichnung/Darstellung	Inhalt
15	<p>Treppenhaus 2</p> 	<p>Treppenhaus für Doppelstockwagen in ungeteilter Ausführung; sechs Klappsitze im Untergeschoss auf 3.300 mm Länge gegenüber der Treppe, Stehfläche im UG: 4 m² Die Stehfläche der Treppe ist unter 16 einkalkuliert.</p>
16	<p>Treppenhaus 2</p> 	<p>Treppenhaus für Doppelstockwagen in ungeteilter Ausführung mit verschwenktem Gang vor und hinter der Treppe; zwölf feste Sitze und acht Klappsitze im Obergeschoss Stehfläche im OG inkl. Treppe: 11,94 m²</p>

Tab. 7-2: ergänzende Bausteine für ein Regionalbahnfahrzeug

7.4 Zugrundegelegte Masse für die Betrachtung der Fahrzeugkonzepte

Basierend auf den im Kapitel 7.3 genannten Bausteinen werden nun verschiedene Fahrzeugkonzepte auf standardisierter Basis untersucht und das effektivste Konzept abgeleitet. Entsprechend Gl. 3 sind die notwendigen Eingangsdaten dabei die Anzahl der Sitzplätze, die Anzahl der Türspuren, die Masse und die Fahrzeuglänge. Sitzplätze, Länge und Türspuren werden auf Basis der 14 Bausteine abgeleitet. Was als notwendige Eingangsgröße fehlt, ist die Fahrzeugmasse. Es würde zu weit führen und hinsichtlich der Aussagekraft nur wenig die Genauigkeit erhöhen, wenn für jedes Layout eine eigene Massebilanz erstellt werden würde. Daher wird der Mittelwert der Fahrzeugmassen pro Meter aus den leichtesten aktuell zulassungsfähigen Fahrzeugen gemäß Abb. 3-9 für die Varianten einstöckiger Triebzug, doppelstöckiger Triebzug und doppelstöckiger Wagen herangezogen. Für den einstöckigen Triebzug werden dabei 10 Fahrzeuge zur Mittelwertbildung herangezogen, siehe dazu Tabelle 7-3.

Fahrzeugbaureihe	Leermasse in t	Masse pro Meter in t/m
GTW 2/8 für GKB	93	1,66
Flirt 6 (Veolia)	179	1,67
iLINT	92	1,70
BR 620 (3-teilig)	138	1,71
Flirt (DB Regio)	156	1,72
Flirt 4 (DB Regio)	132,9	1,78
BR 622 (2-teilig)	98	1,81
BR 1442 (5-teilig)	163,5	1,85
BR 442 (5-teilig)	163,5	1,85
BR 1442 (4-teilig)	135	1,87
Mittelwert	-	1,76

Tab. 7-3: Ermittlung der Masse pro Meter für die erste Iterationsschleife bei einstöckigen Fahrzeugen

Die Aussage „zulassungsfähig“ unterstellt dabei, dass diese Fahrzeuge weitgehend den heute aktuellen Normungs- und Zulassungsstand repräsentieren. Die BR 646.1 ist zwar absolut und längenbezogenen eines der leichtesten Fahrzeuge im Vergleich, der zugrundeliegende Normenstand aber fast 15 Jahre alt. Daher kann dieses Fahrzeug hier bzgl. der Masse nicht seriös herangezogen werden. Die betrachteten Fahrzeuge gemäß Tabelle 7-3 stellen einen Querschnitt durch die verwendeten Traktionsanlagen dar, sind somit hinreichend durch die Praxis validiert und stellen daher keine optimistische, sondern eine realistische Annahme dar.

Für die Doppelstockfahrzeuge, die konzeptbedingt größere und schwerere Wagenkästen und Drehgestelle aufweisen, wird in gleicher Weise verfahren, allerdings werden die Daten auch nur aus den Doppelstocktriebfahrzeugen abgeleitet, siehe Tabellen 7-4 und 7-5. Da hier keine zehn Referenzfahrzeuge zur Verfügung stehen, erfolgt die Mittelwertbildung nur über neun Fahrzeugbaureihen, getrennt nach Triebwagen und Wagen, wobei die Lokomotiven nicht einbezogen werden.

Fahrzeugbaureihe	Leermasse in t	Masse pro Meter in t/m
RRX (Desiro HC)	198	1,88
KISS (Odeg, 4-teilig)	205,8	1,96
S-Bahn Zürich RABe 511 (Kiss)	296	1,97
BR 445 (4-teilig)	228	2,16
BR 445 (4-teilig)	228	2,16
BR 446 (5-teilig)	276	2,09
Omneo kurz 2	201	2,43
Mittelwert	-	2,10

Tab. 7-4: Ermittlung der Masse pro Meter für die erste Iterationsschleife bei doppelstöckigen Triebfahrzeugen

Fahrzeugbaureihe	Leermasse in t	Masse pro Meter in t/m
5 Do-Wagen	240	1,78
3 Do-Wagen	146	1,81
Mittelwert	-	1,80

Tab. 7-5: Ermittlung der Masse pro Meter für die erste Iterationsschleife bei doppelstöckigen Wagen

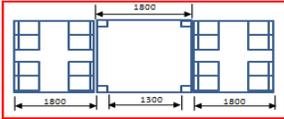
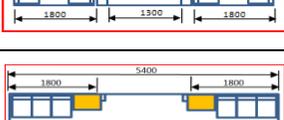
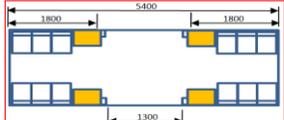
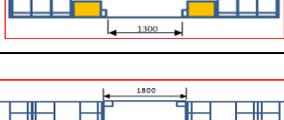
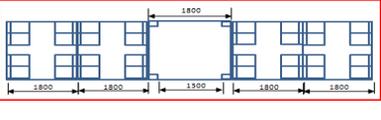
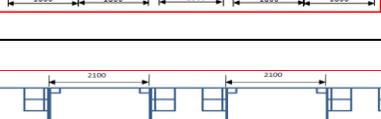
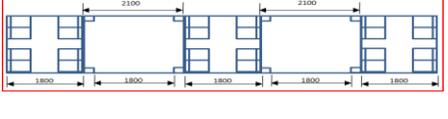
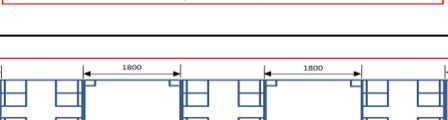
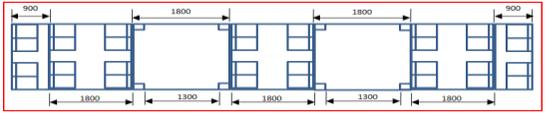
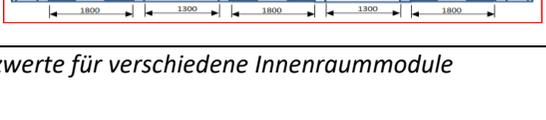
7.5 Vorbetrachtungen zum Layout

Das Fahrzeugkonzept wird nicht nur durch die Anordnung der Drehgestelle, der Traktionsausrüstung und weiterer notwendiger technischer Einrichtungen definiert, sondern zuerst vom Layout für die Fahrgasträume. Daher dient die folgende Vorabbetrachtung der Frage, welche Anordnung von Türen und Fahrgastraumbereichen die Effizienz eines Fahrzeuges besonders beeinflussen.

Zu diesem Zwecke werden nachfolgend einzelne, aus den 14 Bausteinen gebildete Ausschnitte eines Fahrzeuges (Innenraummodule) betrachtet:

- Variante 1 ist die einfachste Form, ein Einstiegsbereich 1a mit zwei Sitzmodulen
- Variante 2 nutzt den Einstiegsbereich 1b und ebenfalls zwei Sitzmodule
- Variante 3 entspricht der Variante 1, jedoch mit doppelter Sitzanzahl
- Variante 4 entspricht Variante 4, jedoch mit doppelter Sitzanzahl
- Variante 5 basiert auf Variante 1, jedoch mit drei Sitzgruppen und zwei Einstiegen 1a
- Variante 6 entspricht Variante 5, jedoch mit zwei Einstiegsbereichen 1b
- Variante 7 enthält zusätzlich zur Variante 5 noch zwei Sitzreihen
- Variante 8 entspricht Variante 7, besitzt aber den Einstieg 1b

Unter Verwendung der Gl. 3 und der genannten Parameter aus Kapitel 7.4 ergeben sich die in Tabelle 7-6 dargestellten Effizienzwerte für einstöckige Fahrzeugsegmente sowie die in Abb. 7-1 dargestellte Visualisierung der Ergebnisse. Die dort genannte Modulmasse ergibt sich aus dem Mittelwert von 1,76 t/m für einen einstöckigen Triebzug multipliziert mit der Modullänge.

Variante	Darstellung	Länge in mm	Tür-spu-ren	Sitz-plätze	Modul-Masse in t	Effizienzwerte			
						A	B	C	E
1a		5.400	2	16	9,504	1,25	1,76	0,53	3,55
2a		5.700	3	16	10,032	0,99	1,76	1,60	4,35
1b		5.400	2	12	9,504	3,17	1,76	0,30	5,23
2b		5.700	3	12	10,032	3,34	1,76	0,30	5,40
3		9.000	2	32	16,368	1,02	1,76	1,07	3,85
4		9.300	3	32	20,064	1,25	1,76	0,53	3,55
5		9.000	4	24	15,84	1,32	1,76	0,60	3,68
6		9.600	6	24	16,896	1,41	1,76	0,40	3,57
7		10.800	4	32	19,008	1,19	1,76	0,80	3,75
8		11.400	6	32	20,064	1,25	1,76	0,53	3,55

Tab. 7-6: Effizienzwerte für verschiedene Innenraummodule

Demnach ist für kleinere Anzahlen von Sitzen die Verwendung von Türen mit einer lichten Öffnungsweite von 1.300 mm effektiver, als die Verwendung von Türen mit einer lichten Öffnungsweite von 1.800 mm. Hingegen dreht sich diese Aussage, wenn größere Anzahlen von Sitzplätzen zu bedienen sind. Ab ca. 24 Sitzplätzen pro Einstieg erhöht sich die Effizienz durch Verwendung von Türen mit größerer lichter Weite.

Dieses Ergebnis entspricht durchaus der heute geübten Praxis, handelt es sich doch bei der Variante 1a quasi um einen Ausschnitt aus gängigen S-Bahn-Fahrzeugen, die für schnellen Fahrgastwechsel bei grundsätzlich geringer Anzahl von Sitzplätzen pro Türspur dimensioniert werden.

Die Varianten 1b/2b sind aufgrund der geringen Sitzanzahl grundsätzlich weniger effektiv, hierauf wird im Weiteren aber noch eingegangen.

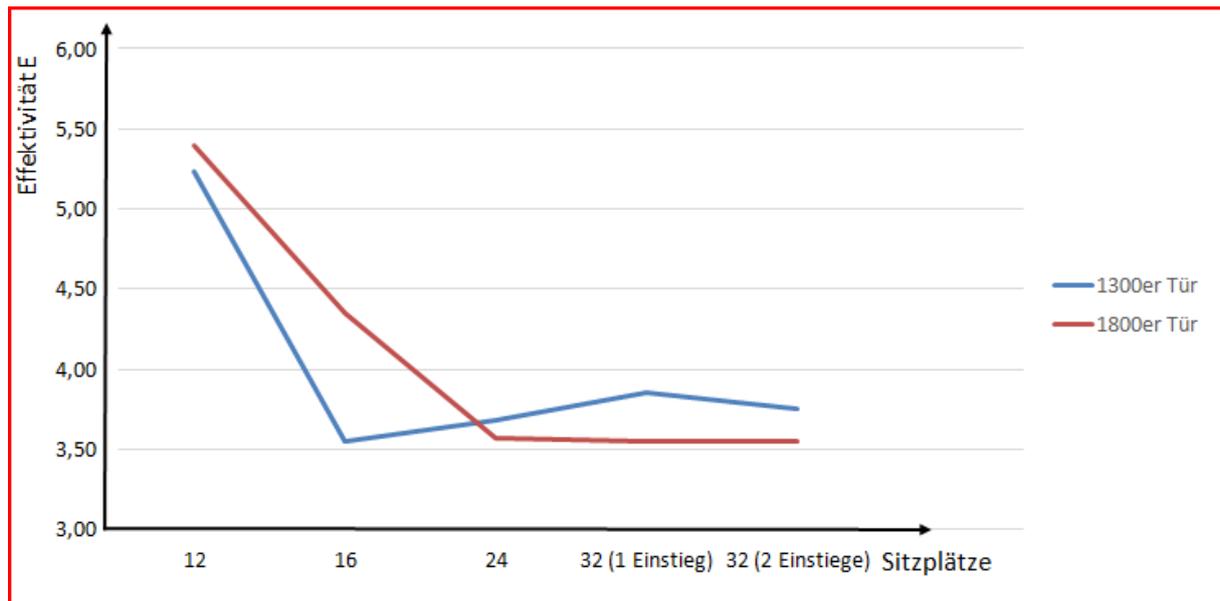


Abb. 7-1: Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 5-4

7.6 Ableitung von Fahrzeugkonzepten

Auf der Basis der Bestandsermittlung gemäß Kapitel 3, wonach kein bestimmtes Fahrzeugkonzept eine besonders hohe Effizienz aufweist, wird nun anhand der Bausteine aus Kapitel 7.3 generisch und systematisch untersucht, welche Anordnung eine hohe Effizienz erreicht. Dies erfolgt aufgrund der baulichen Unterschiede getrennt für ein- und doppelstöckige Fahrzeuge.

Um nicht in der jetzigen Phase der Konzeptuntersuchung eine permanente Einschränkungsberechnung, ohne die entsprechende Datenbasis durchführen zu müssen, gelten zunächst Fahrzeuglängen, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen und somit mit Blick auf die vorhandene Infrastruktur abgesichert sind. Entsprechend der Aussage in Kapitel 7.3 und unter Berücksichtigung der Daten aus Tabelle 2-1 bis 2-6 gelten damit zunächst folgende Längenbegrenzungen:

- 26,4 m für einstöckige Einzelwagen
- 26,8 m für Doppelstockwagen bzw. -triebswagen,
- 21,25 m für einen Endwagen mit einem konventionellen und einem (halben) Jakobsdrehgestelle und
- 16,1 m für einen Mittelwagen mit (zwei halben) Jakobsdrehgestellen

Zusätzlich werden überlange Einzelwagen mit einer Länge von 27,9 m betrachtet. Diese Länge wird bei den Mittelwagen der BR 412 (ICE4) verwendet.

Bei Wagen mit einem Jakobsdrehgestell wird nicht zwischen ein- oder doppelstöckigen Gelenkwagen unterschieden, da die Länge aus dem Abstand der Drehgestellmitten abgeleitet wird. Diese Hauptabmessungen sind aus den Fahrzeugen 4.5, 4.6 und 4.7 nach Tabelle 2-3 abgeleitet.

7.6.1 Einstöckige Triebfahrzeuge

Entsprechend der Vorbemerkungen zu Kapitel 7.6 werden folgende Fahrzeugvarianten (Tab. 7-7) unter Verwendung der Bausteine aus Kapitel 7.3 untersucht:

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagen-seite	Längenbegrenzung
1a	Zwei, jeweils 26,4 m langen Einzelwagen, zwei Drehgestelle pro Wagen,	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 26,4 m = 52,8 m
1b		4 Türen à 2 Spuren, insgesamt 8 Türspuren	
1c	Drei, jeweils 26,4 m lange Einzelwagen, zwei Drehgestelle pro Wagen	6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	3 x 26,4 m = 79,2 m
2a	Dreiteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und zwei Jakobsdrehgestellen	3 Türen à 3 Spuren, insgesamt 9 Türspuren	2 x 21,25 m + 1 x 16,1 m = 58,6 m
2b		3 Türen à 2 Spuren, insgesamt 6 Türspuren	
2c		4 Türen à 2 Spuren, insgesamt 8 Türspuren	
2d		4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	
3a	Zwei verkürzte Einzelwagen, vier konventionelle Drehgestelle	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 22 m = 44 m
3b		2 Türen à 3 Spuren, insgesamt 6 Türspuren	
3c		4 Türen à 2 Spuren, insgesamt 8 Türspuren	
3d	Drei verkürzte Einzelwagen, sechs konventionelle Drehgestelle	6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	3 x 22 m = 66 m
4a	Vierteiler mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und drei Jakobsdrehgestellen	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 21,25 + 2 x 16,1 = 74,7 m
4b		6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	
5	Fünfteiler mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und vier Jakobsdrehgestellen	8 Türen à 3 Spuren, insgesamt 24 Türspuren	2 x 21,25 + 3 x 16,1 = 90,8 m
6	Sechsteiler mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und fünf Jakobsdrehgestellen	10 Türen à 3 Spuren, insgesamt 30 Türspuren	2 x 21,25 + 4 x 16,1 = 106,9 m
7		11 Türen à 3 Spuren, insgesamt 33 Türspuren	
8a	Zweiteiliges, überlanges Fahrzeug mit konventionellen Drehgestellen	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 27,9 m = 55,8 m
8b	Zweiteiliges, überlanges Fahrzeug mit konventionellen Drehgestellen	6 Türen à 2 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	
8c	Zweiteiliges, überlanges Fahrzeug mit konventionellen Drehgestellen	6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	
8d	Dreiteiliges, überlanges Fahrzeug mit konventionellen Drehgestellen	9 Türen à 3 Spuren, insgesamt 27 Türspuren	3 x 27,9 m = 83,7 m

Tab. 7-7: betrachtete Varianten für die erste Untersuchung der generischen Konzepte

In den Tabellen 7-8.1 bis 7-8.6 sind die Ergebnisse und die für die jeweilige Variante verwendeten Innenraummodule dargestellt. Tabelle 7-8.1 folgt beispielhaft auf der nächsten Seite, alle anderen Tabellen sind der Anlage 16.2.1 zu entnehmen.

Baustein	Führer- raum	Einstieg 1 a	Einstieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Übergangs- hälfte kurz	Übergangs- hälfte lang	Treppe						
Visualisierung															
Lfd.-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Bausteinlänge	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560						
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0						
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0						
Variante 1a	Zwei lange Einzel-Wagen mit vier Drehgestellen, acht Radsätzen, vier großen Einstiegen									Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	4	11	1	1	0	2	4	Leermasse	91,94 t	1,40	1,76	1,09	4,26
Bausteinlänge	8000	0	8400	19800	900	8500	0	4400	2240	Länge	52,24 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	88	4	23	0	16	0	Sitzplätze	131				
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	11060	12100	550	7890	0	2440	2200	Gesamt- masse	128,34 t				
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,4 = 52,8 m										Durchschn. Radsatzlast	16,04 t				
Variante 1b	Zwei lange Einzel-Wagen mit vier Drehgestellen, acht Radsätzen, vier kleinen Einstiegen														
Anzahl	2	4	0	12	0	1	0	2	4	Leermasse	91,41 t	1,35	1,76	1,69	4,80
Bausteinlänge	8000	7200	0	21600	0	8500	0	4400	2240	Länge	51,94 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	96	0	23	0	16	0	Sitzplätze	135				
Türspuren	0	8	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	8				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	9400	0	13200	0	7890	0	2440	2200	Gesamt- masse	126,70 t				
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,4 = 52,8 m										Durchschn. Radsatzlast	15,84 t				

Tab. 7-8.1: Vergleich verschiedener Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug, hier: lange Einzelwagen

Abbildung 7-2 zeigt beispielhaft die Umsetzung der Variante 1a aus Tabelle 7-7 unter Berücksichtigung der gewählten Bausteine entsprechend Tabelle 7-8.1.

Anmerkung: Aufgrund der standardisierten Bausteinlängen lässt sich die maximal mögliche Fahrzeuglänge nicht in jedem Fall erreichen. Auch unterschiedlich lange Wagen, je nach verwendeten Bausteinen, würde man in der Praxis so nicht umsetzen. Für die generischen Betrachtungen ist dies aber zunächst nicht relevant. Die Vereinheitlichung der Wagenlängen wäre eine Aufgabe für die Detailkonstruktion im Rahmen einer möglichen Industrialisierung des jeweiligen Konzeptes.

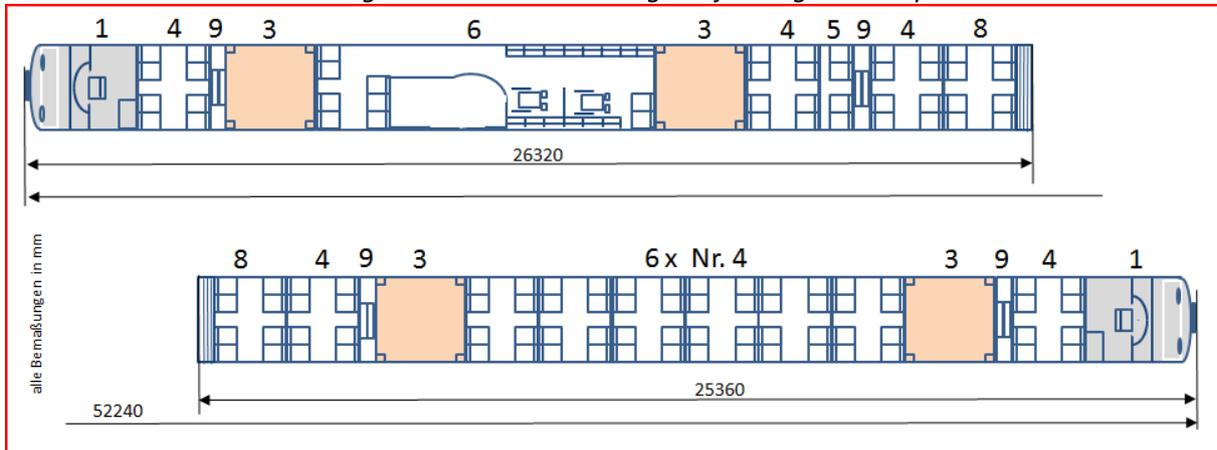


Abb. 7-2: Beispielhafte Visualisierung der Variante 1a aus Tabelle 7-8.1

Die Abbildung 7-3 zeigt in grafischer Form die Zusammenfassung der Effizienzbewertung für die Modulkombinationen aus Tabelle 7-7.

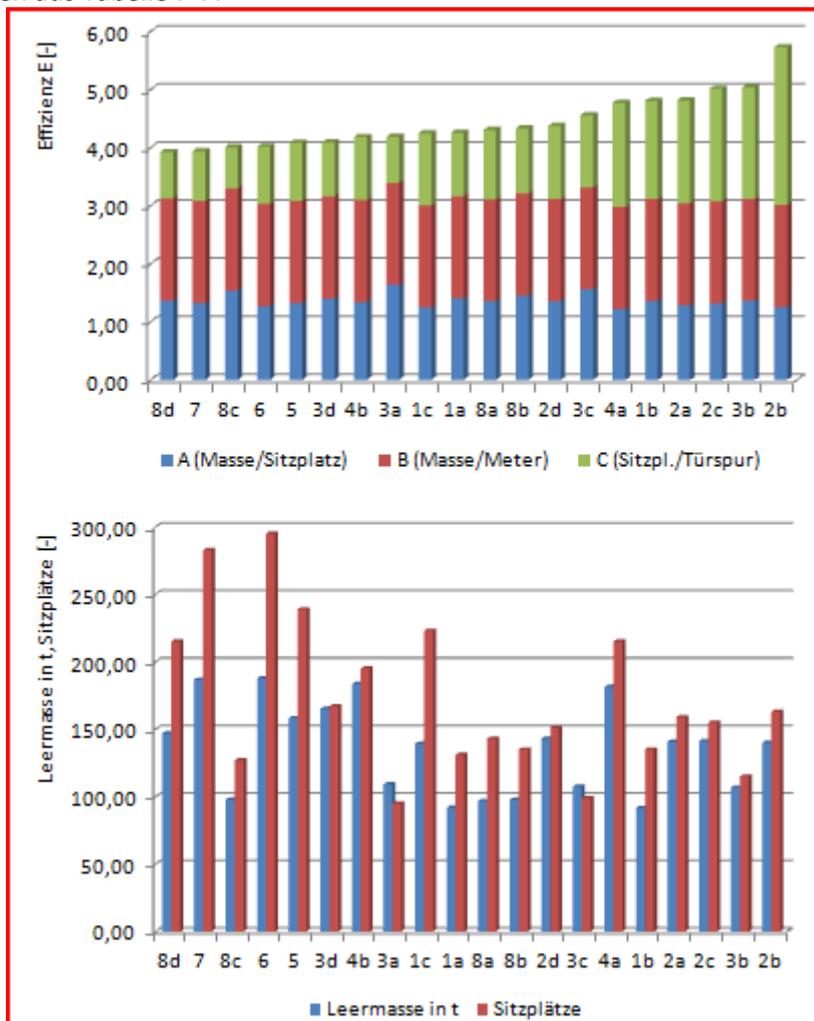


Abb. 7-3: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-7 für einstöckige Triebwagen

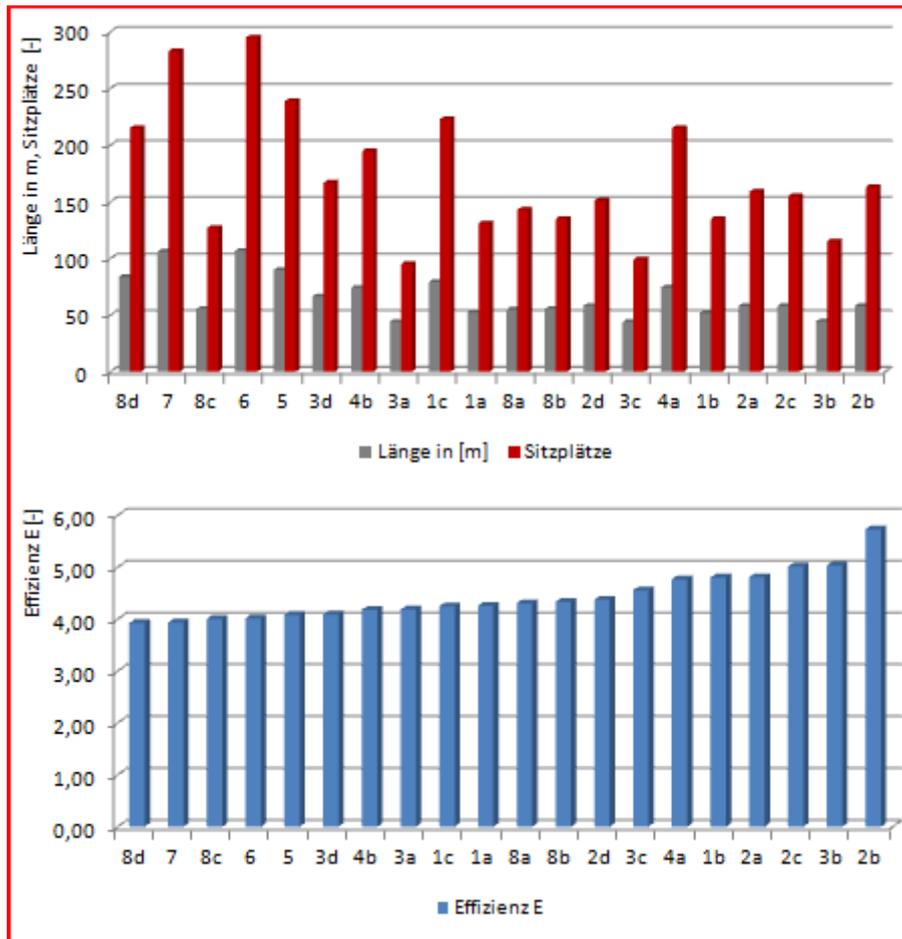


Abb. 7-4: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-7 für einstöckige Triebwagen

Abbildung 7-4 zeigt neben der Effizienz und der Anzahl der Sitzplätze auch die Fahrzeuglänge. Es lässt sich erkennen, dass eine Veränderung der Effizienz nicht nur der Längenzunahme und damit der anteilig reduzierten, nicht für den Fahrgasttransport nutzbaren Länge für die Führerräume zuzuordnen ist, sondern sehr wohl konzeptionell bedingt ist. Sehr deutlich wird dies im direkten Vergleich der Varianten 8c und 8d sowie 1c und 8d für Fahrzeuge mit konventionellen Drehgestellen und für die Variante 6 und 7 für Fahrzeuge mit Jakobsdrehgestellen.

Weiterhin kann unterstellt werden, dass die Variante 8d mit drei Wagenkästen gegenüber der Variante 7 mit sechs Wagenkästen auch kommerziell günstiger ist.

7.6.2 Doppelstöckige Wagen

Entsprechend der Vorbemerkungen zu Kapitel 7.6 werden die folgenden Fahrzeugvarianten gemäß Tab. 7-9 unter Verwendung der Bausteine aus Kapitel 7.3 für Doppelstockwagen ohne Antrieb und ohne Führerraum untersucht:

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagen- seite	Längenbegrenzung
1a	Doppelstockeinzelwagen, 26,8 m lang, zwei konventionelle Drehgestelle, Tief- einstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; PRM-gerecht	2 Türen à 2 Spuren, ins- gesamt 4 Türspuren	26,8 m
1b		2 Türen à 3 Spuren, ins- gesamt 6 Türspuren	26,8 m
1c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehge- stelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht	4 Türen à 3 Spuren, ins- gesamt 12 Türspuren	2 x 26,8 m = 53,6 m
2a	Zwei Doppelstockwagen, verbunden mit einem Jakobsdrehgestell, zwei konventi- onelle Enddrehgestelle, je ein Treppen- haus im Bereich des Enddrehgestells, nur ein Wagen PRM-gerecht	4 Türen à 2 Spuren, ins- gesamt 8 Türspuren	2 x 21,25 m = 42,5 m
2b		4 Türen à 3 Spuren, ins- gesamt 12 Türspuren	2 x 21,25 m = 42,5 m
2c	Zwei Doppelstockwagen, verbunden mit einem Jakobsdrehgestell, zwei konventi- onelle Enddrehgestelle, je ein Treppen- haus im Bereich des Enddrehgestells, verkürzte Wagenlänge, nur ein Wagen PRM-gerecht	3 Türen à 2 Spuren, ins- gesamt 6 Türspuren	2 x 21,25 m = 42,5 m
2d	Drei Doppelstockwagen, verbunden mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionelle Enddrehgestelle, zwei Jakobsdrehge- stelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, ein mittiges Treppen- haus im Mittelwagen, fünf kleine Ein- stiege, verkürzte Wagen	5 Türen à 2 Spuren, ins- gesamt 10 Türspuren	2 x 21,25 m + 16,1 m = 58,6 m
2e	Drei Doppelstockwagen, verbunden mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionelle Enddrehgestelle, zwei Jakobsdrehge- stelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, ein mittiges Treppen- haus im Mittelwagen, fünf große Ein- stiege, verkürzte Wagen	5 Türen à 3 Spuren, ins- gesamt 15 Türspuren	2 x 21,25 m + 16,1 m = 58,6 m
3a	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, End- wagen jeweils 26 m lang, je zwei konven- tionelle Enddrehgestelle, 1 dreiachsiges Mittendrehgestell, Tiefeinstieg, 2 Trep- penhäuser jeweils oberhalb der Drehge- stelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-ge- recht	4 Türen à 2 Spuren, ins- gesamt 8 Türspuren	2 x 26 m = 52 m
3b	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, End- wagen jeweils 24 m lang, je zwei	4 Türen à 2 Spuren, ins- gesamt 8 Türspuren	2 x 24 m = 48 m

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagen- seite	Längenbegrenzung
	konventionelle Enddrehgestelle, 1 dreiachsiges Mittendrehgestell, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht		
3c	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 24 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 1 dreiachsiges Mittendrehgestell, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 24 m = 48 m
3d	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 24 m und Mittelwagen 24 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 2 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht	6 Türen à 2 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 24 m + 24 m = 72 m
3e		6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	2 x 24 m + 24 m = 72 m

Tab. 7-9: betrachtete Varianten für die erste Untersuchung der generischen Konzepte bei doppelstöckigen Fahrzeugen

Die Variante eines Doppelstockwagens mit Hocheinstieg wird nicht betrachtet, da sie ohne Lift nicht PRM-konform ist.

Die Varianten 3a bis 3e basieren auf dem Konzeptvorschlag nach [105] für ein Fahrzeug mit dreiachsigem Mittendrehgestell und zu den Drehgestell-Enden hin verlagertem Drehpunkt für die Wagenkästen.

Die Varianten eines Doppelstocktriebzuges werden in Kapitel 7.6.3 dargestellt.

In den Tabellen 7-10.1 bis 7-10.13 sind die Ergebnisse und die für die jeweilige Variante verwendeten Innenraummodule dargestellt. Tabelle 7-10.1 folgt beispielhaft auf der nächsten Seite, alle anderen Tabellen sind der Anlage 16.2.2 zu entnehmen. Abbildung 7-5 zeigt beispielhaft das Layout eines Doppelstockwagens gemäß Variante 1a aus Tab. 7-9.

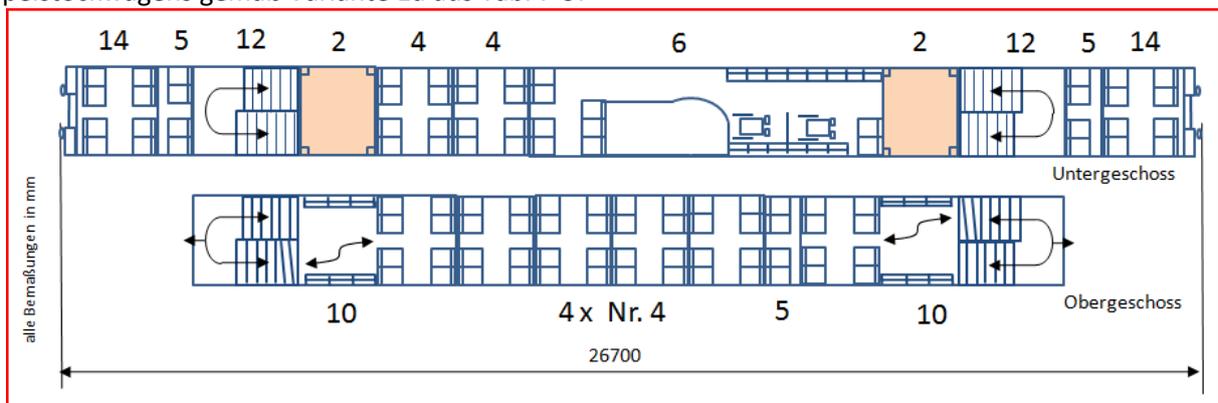


Abb. 7-5: Beispielhafte Visualisierung der Variante 1a aus Tabelle 7-10.1

Anmerkung: Aufgrund der standardisierten Bausteinlängen lässt sich die maximal mögliche Fahrzeuglänge nicht in jedem Fall erreichen. Auch unterschiedlich lange Wagen, je nach verwendeten Bausteinen, würde man in der Praxis so nicht umsetzen. Für die generischen Betrachtungen ist dies aber zunächst nicht relevant. Die Vereinheitlichung der Wagenlängen wäre eine Aufgabe für die Detailkonstruktion im Rahmen einer möglichen Industrialisierung des jeweiligen Konzeptes.

Baustein	Führer- raum	Ein- stieg 1 a	Ein- stieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Treppen- bereich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wa- gen- ende Do mit WC	Wagen- ende Do ohne WC					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300					
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8					
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	80	2350	2765	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. un- ter 11	4815	5455	820	1100					
Variante 1a	Doppelstock-Einzel-Wagen mit zwei Drehgestellen, 4 Radsätzen und zwei kleinen Einstiegen													Ermittelte Werte		A	B	C	
Untergeschoss														Leermasse in t	48,06	0,76	1,80	3,18	
Anzahl	0	2	0	2	2	1	0	0	0	2	0	0	0	2	Türspuren				4
Bausteinlänge in mm	0	3600	0	3600	1800	8500	0	0	0	4600	0	0	0	4600	Sitzplätze unten				63
Sitzplätze	0	0	0	16	8	23	0	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze oben				64
Türspuren	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitz- plätze				127
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	4700	0	2200	1100	7890	0	0	0	0	0	0	0	2200	Zuladung in t				32,67
Obergeschoss														Gesamt- masse in t	72				
Anzahl	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,2			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	7200	900	0	0	0	0	0	11800	0	0	0	Effizienz E	5,73			
Sitzplätze	0	0	0	32	4	0	0	0	0	0	28	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	0	0	4400	550	0	0	0	0	0	9630	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 26,8 m																			

Tab. 7-10.1: Modulkombination 1a für einen Doppelstockeinzelwagen

Die Abbildung 7-6 zeigt in grafischer Form die Zusammenfassung der Effizienzbewertung für die Modulkombinationen aus Tabelle 7-10.

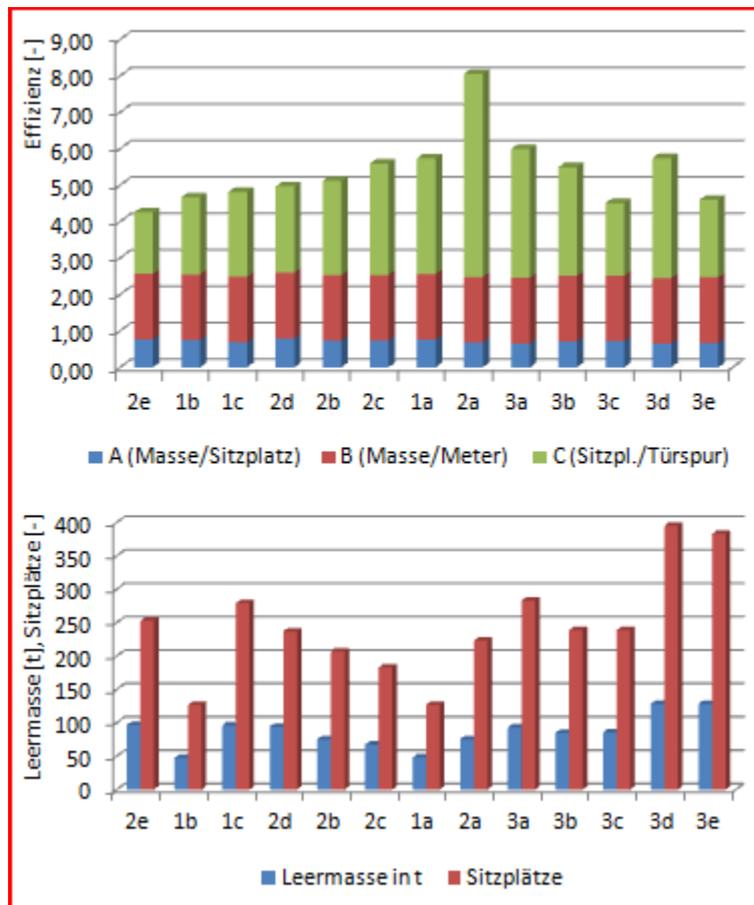


Abb. 7-6: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-9 für Doppelstockwagen

Nach Auswertung der Tabellen 7-10.1 bis 7-10.13 ist die Variante 2e mit drei über Jakobsdrehgestelle verbundenen Wagen mit einem Wert $E = 4,25$ die effizienteste Fahrzeugvariante. Diese Variante weist allerdings eine durchschnittliche Radsatzlast von 20,7 t auf, was für dieses Untersuchungsstadium, trotz der verkürzten Wagenlänge, zu hoch ist. Somit stellt die Variante 1 b mit einem konventionellen Doppelstockwagen und einer durchschnittlichen Radsatzlast von 20,4 t die effizientere Form des Doppelstockwagens unter den hier betrachteten Varianten dar. Radsatzlasten unter 20 t erreichen nur die Varianten 2c und 2d.

In jedem Fall ist zu beachten, dass diese Varianten nicht-angetriebene Wagen darstellen, somit eine Lokomotive hinzugerechnet werden muss. Dies verändert die Aussage zur Effizienz nicht, ist aber bei einem direkten Vergleich zu den Konzepten in Kapitel 7.6.3 zu beachten. Daher wird nachfolgend eine moderne Lokomotive der BR 187 für vergleichende Betrachtungen herangezogen. Diese Lokomotive hat nach Herstellerangaben [97] eine Masse von 84 t und eine Länge von 18,9 m. Die Visualisierung ist Abb. 7-7 zu entnehmen.

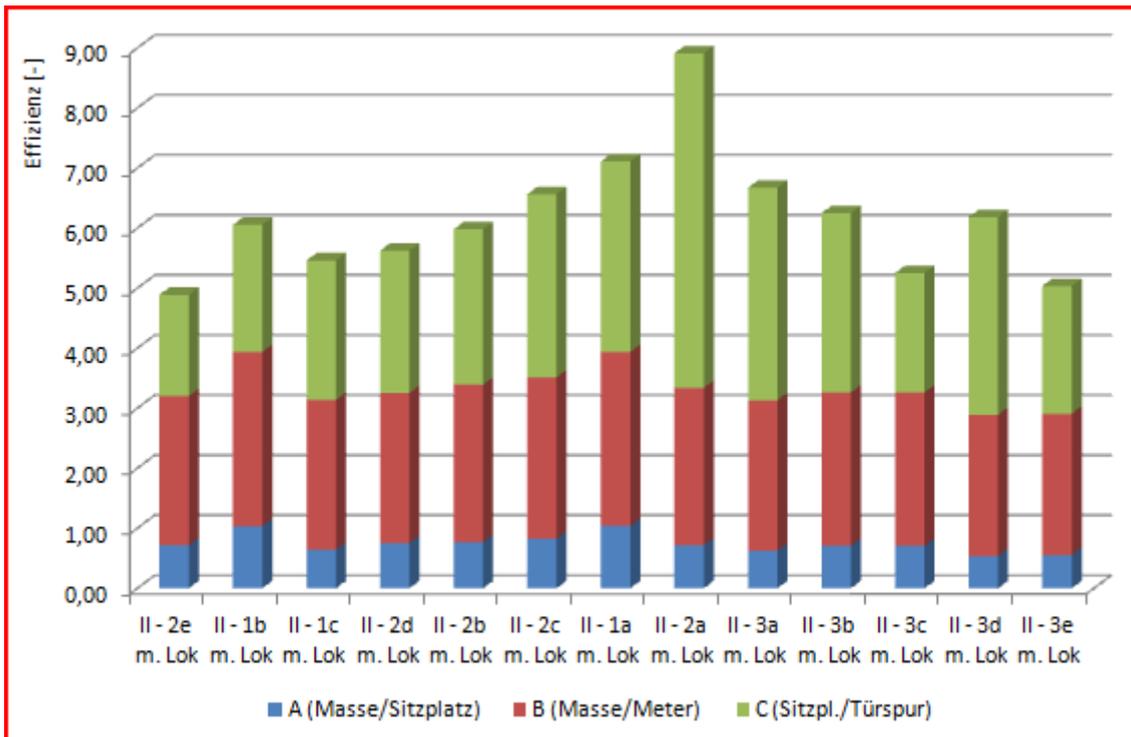


Abb. 7-7: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-9 für Doppelstockwagen und Berücksichtigung einer Lokomotive

Berücksichtigt man darüber hinaus, dass eine Lokomotive ein Vielfaches der jeweils genannten Varianten befördern kann, so erhält man bei jeweils doppelter Wagenanzahl gemäß Tabelle 7-9 die folgende Übersicht gemäß Abb. 7-8:

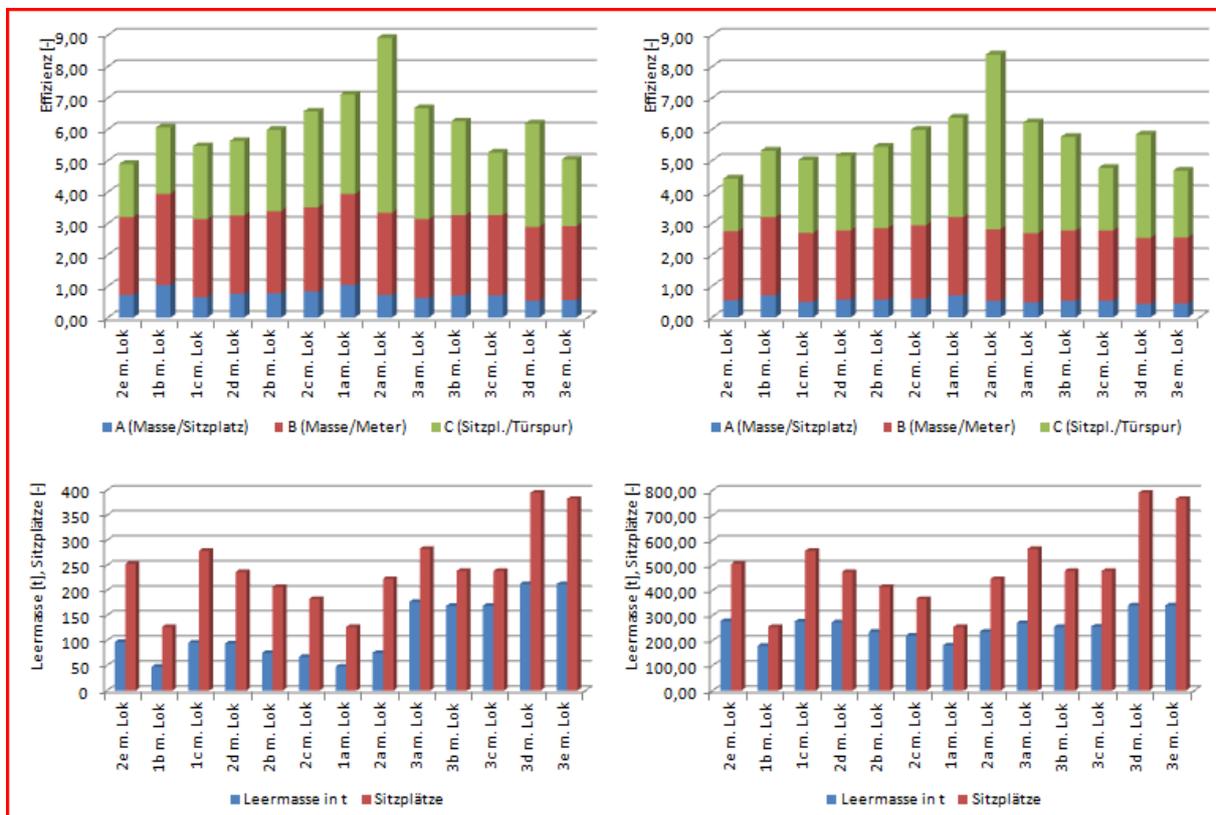


Abb. 7-8: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-9 für Doppelstockwagen und Berücksichtigung einer Lokomotive (links: Wagenanzahl gem. Tabelle 7-9, rechts doppelte Wagenanzahl)

Bei teilweise erheblicher Kapazitätserhöhung durch die Berücksichtigung einer doppelten Wagenanzahl, erkennt man eine nur geringe Effizienzerhöhung. Maßgeblich bleibt also das Verhältnis der Masse pro Sitzplatz bzw. Masse pro Meter Fahrzeuglänge, insbesondere aber der Anteil der Türspuren. Der Anteil der Lokomotive verändert zwar die Werte A und B, nicht aber C.

7.6.3 Doppelstöckige Triebfahrzeuge

Entsprechend der Vorbemerkungen zu Kapitel 7.6 werden nachfolgende Fahrzeugvarianten gemäß Tab. 7-11 unter Verwendung der Bausteine aus Kapitel 7.3 für Doppelstockwagen mit Antrieb und mit Führerraum untersucht.

Aufgrund der Betrachtungen in Kapitel 7.6.2 werden Varianten mit Jakobsdrehgestellen wegen der ohnehin schon hohen Radsatzlasten hier nicht mehr betrachtet. Vereinfachend wird nicht explizit ein Maschinenraum für die Unterbringung der notwendigen Antriebstechnik berücksichtigt, sehr wohl aber die notwendige Masse. Dies stellt die Vergleichbarkeit der Konzepte sicher, ergibt aber tendenziell zu viele Sitzplätze und eine zu hohe Zuladung.

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagenseite	Längenbegrenzung
1	Doppelstockeinzelwagen, 26,8 m lang, zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; PRM-gerecht; zwei Führerräume	2 Türen à 2 Spuren, insgesamt 4 Türspuren	26,8 m
2a	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	4 Türen à 2 Spuren, insgesamt 8 Türspuren	2 x 26,8 m = 53,6 m
2b	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 26,8 m = 53,6 m
2c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je max. 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	4 Türen à 3 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	2 x 24 m = 48 m
3a	Drei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	6 Türen à 2 Spuren, insgesamt 12 Türspuren	3 x 26,8 m = 80,4 m
3b	Drei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	3 x 26,8 m = 80,4 m
3c	Drei Doppelstockeinzelwagen, je 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb	6 Türen à 3 Spuren, insgesamt 18 Türspuren	3 x 24 m = 72 m

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagenseite	Längenbegrenzung
	der Drehgestelle pro Wagen; nur ein Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume		
4a	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 26 m lang, Mittelwagen 24 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	8 Türen à 2 Spuren, insgesamt 16 Türspuren	$2 \times 26 + 2 \times 24 \text{ m} = 100 \text{ m}$
4b	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	8 Türen à 2 Spuren, insgesamt 16 Türspuren	$2 \times 24 + 2 \times 22 \text{ m} = 92 \text{ m}$
4c	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume	8 Türen à 2 Spuren, insgesamt 16 Türspuren	$2 \times 24 + 2 \times 20 \text{ m} = 88 \text{ m}$
4d		8 Türen à 3 Spuren, insgesamt 24 Türspuren	

Tab. 7-11: betrachtete Varianten für die erste Untersuchung der generischen Konzepte bei doppelstöckigen Triebwagen

Die Variante eines Doppelstockwagens mit Hocheinstieg wird weiterhin nicht betrachtet, da sie ohne Lift nicht PRM-konform ist.

Die Varianten 4a bis 4d basieren auf dem Konzeptvorschlag nach [105] für ein Fahrzeug mit dreiachsigem Mittendrehgestell und zu den Drehgestell-Enden hin verlagertem Drehpunkt für die Wagenkästen.

In den Tabellen 7-12.1 bis 7-12.11 sind die Ergebnisse und die für die jeweilige Variante verwendeten Innenraummodule dargestellt. Tabelle 7-12.1 folgt beispielhaft auf der nächsten Seite, alle anderen Tabellen sind der Anlage 16.2.3 zu entnehmen.

Anmerkung: Aufgrund der standardisierten Bausteinlängen lässt sich die maximal mögliche Fahrzeuglänge nicht in jedem Fall erreichen. Auch unterschiedlich lange Wagen, je nach verwendeten Bausteinen, würde man in der Praxis so nicht umsetzen. Für die generischen Betrachtungen ist dies aber zunächst nicht relevant. Die Vereinheitlichung der Wagenlängen wäre eine Aufgabe für die Detailkonstruktion im Rahmen einer möglichen Industrialisierung des jeweiligen Konzeptes.

Baustein	Führer- raum	Ein- stieg 1 a	Ein- stieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Trep- pen- be- reich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wa- gen- ende Do mit WC	Wa- gen- ende Do ohne WC					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300					
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8					
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	80	2350	2765	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. un- ter 11	4815	5455	820	1100					
Variante 1	Doppelstockeinzelwagen, zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefenstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; PRM-gerecht; zwei Führerräume													Ermittelte Werte	A	B	C		
Untergeschoss														Leermasse in t	55,65	1,28	2,10	2,18	
Anzahl	2	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	Länge in m				26,5
Bausteinlänge in mm	8000	3600	0	1800	0	8500	0	0	0	0	0	4600	0	0	Türspuren				4
Sitzplätze	0	0	0	8	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten				31
Türspuren	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben				56
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	160	4700	0	1100	0	7890	0	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitz- plätze				87
Obergeschoss														Zuladung in t	27,33				
Anzahl	0	0	0	3	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Gesamt- masse in t				83
Bausteinlänge in mm	0	0	0	5400	900	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t				20,7
Sitzplätze	0	0	0	24	4	0	0	0	0	28	0	0	0	0	Effizienz E				5,55
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	0	0	3300	550	0	0	0	0	9630	0	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 26,8 m																			

Tab. 7-12.1: Modulkombination 1 für einen Doppelstockeinzeltriebwagen

Die Abbildung 7-9 zeigt in grafischer Form die Zusammenfassung der Effizienzbewertung für die Modulkombinationen aus Tabelle 7-12.

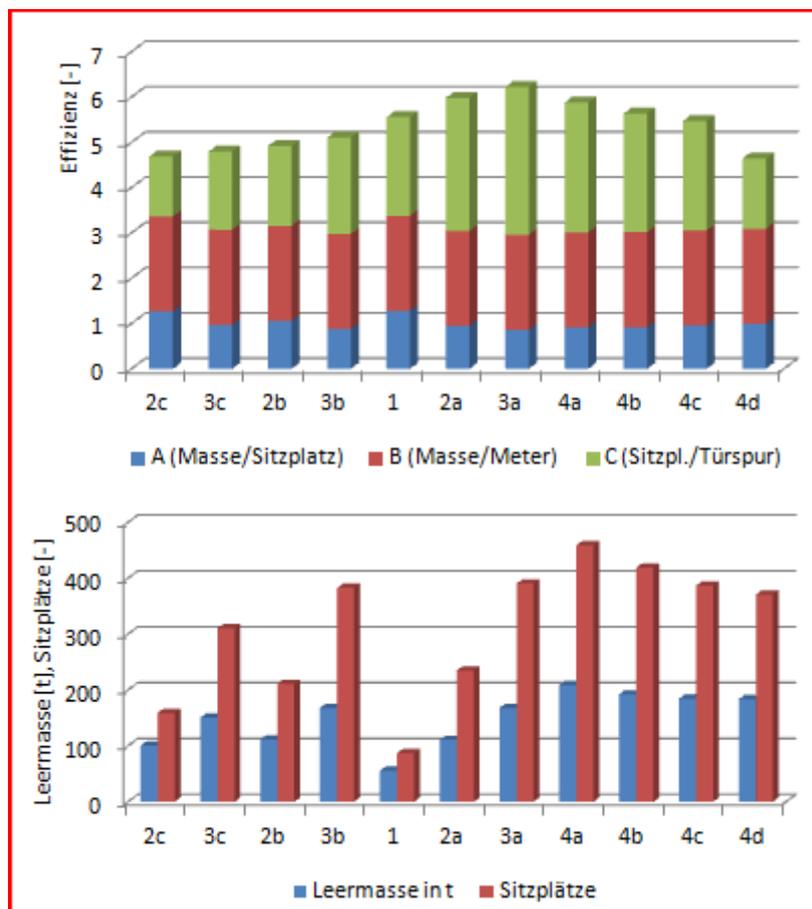


Abb. 7-9: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-12 für Doppelstocktriebwagen

Nach Auswertung der Tabellen 7-12.1 bis 7-12.6 ist die Variante 2c mit zwei verkürzten Doppelstockwagen mit einem Wert $E = 4,69$ die effizienteste Fahrzeugvariante. Diese Variante weist außerdem auch mit 19,7 t die niedrigste durchschnittliche Radsatzlast der betrachteten Konzepte auf. Wie eingangs erwähnt, sind die ermittelten Radsatzlasten tendenziell zu hoch angenommen, weil zwar die Masse der Antriebsausrüstung berücksichtigt ist, nicht jedoch der notwendige Bauraum, welcher sich in einer geringeren Fahrgastkapazität auswirkt. Damit sinkt einerseits die ermittelte Radsatzlast, andererseits sinkt damit auch die Effizienz, was im direkten Vergleich irrelevant ist, nicht aber im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Fahrzeugvarianten.

7.6.4 Kombinationen aus ein- und doppelstöckigen Fahrzeugen

Entsprechend der Vorbemerkungen zu Kapitel 7.6 werden folgende Fahrzeugvarianten (Tab. 7-13) unter Verwendung der Bausteine aus Kapitel 7.3 untersucht:

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagenseite	Längenbegrenzung
1a	Triebzug aus zwei 26,4 m langen einstöckigen, angetriebenen Endwagen mit je einem Führerstand und zwei 26,8 m langen Doppelstockeinzelwagen; jeweils zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle in den Doppelstockwagen, ein PRM-gerechter Doppelstockwagen	2 Türen à 2 Spuren pro Wagen, insgesamt 16 Türspuren	2 x 26,4 m + 2 x 26,8 m = 106,4 m
1b	Triebzug aus zwei 26,4 m langen einstöckigen, angetriebenen Endwagen mit je einem Führerstand und zwei 26,8 m langen Doppelstockeinzelwagen; jeweils zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle in den Doppelstockwagen, ein PRM-gerechter Doppelstockwagen	2 Türen à 3 Spuren pro Wagen, insgesamt 24 Türspuren	2 x 26,4 m + 2 x 26,8 m = 106,4 m
2a	Triebzug aus zwei 24 m langen einstöckigen, angetriebenen Endwagen mit je einem Führerstand und zwei 24 m langen Doppelstockeinzelwagen; jeweils zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle in den Doppelstockwagen, ein PRM-gerechter Doppelstockwagen	2 Türen à 2 Spuren pro Wagen, insgesamt 16 Türspuren	4 x 24 m = 96 m
2b	Triebzug aus zwei 24 m langen einstöckigen, angetriebenen Endwagen mit je einem Führerstand und zwei 24 m langen Doppelstockeinzelwagen; jeweils zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle in den Doppelstockwagen, ein PRM-gerechter Doppelstockwagen	2 Türen à 3 Spuren pro Wagen, insgesamt 24 Türspuren	4 x 24 m = 96 m
3	Vierteiliger Triebzug mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionellen angetriebenen Enddrehgestellen unter den einstöckigen Endwagen und drei nicht angetriebenen Jakobsdrehgestellen unter den Doppelstockmittelwagen; ein PRM-gerechter Endwagen, ein Treppenhaus über den Drehgestellen pro Doppelstockwagen	2 Türen à 2 Spuren pro Wagen, insgesamt 16 Türspuren	2 x 21,25 m + 2 x 16,1 m = 74,7 m

Tab. 7-13: betrachtete Varianten für die erste Untersuchung der generischen Konzepte bei ein- und doppelstöckigen Triebwagen

Die Variante eines Doppelstockwagens mit Hocheinstieg wird weiterhin nicht betrachtet, da sie ohne Lift nicht PRM-konform darstellbar ist.

In den Tabellen 7-14.1 bis 7-14.5 sind die Ergebnisse und die für die jeweilige Variante verwendeten Innenraummodule dargestellt. Tabelle 7-14.1 folgt beispielhaft auf der nächsten Seite, alle anderen Tabellen sind der Anlage 16.2.4 zu entnehmen.

Anmerkung: Aufgrund der standardisierten Bausteinlängen lässt sich die maximal mögliche Fahrzeuglänge nicht in jedem Fall erreichen. Auch unterschiedlich lange Wagen, je nach verwendeten Bausteinen, würde man in der Praxis so nicht umsetzen. Für die generischen Betrachtungen ist dies aber zunächst nicht relevant. Die Vereinheitlichung der Wagenlängen wäre eine Aufgabe für die Detailkonstruktion im Rahmen einer möglichen Industrialisierung des jeweiligen Konzeptes.

Baustein	Führer- raum	Ein- stieg 1 a	Ein- stieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Be- reich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Trep- penbe- reich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wa- gen- ende Do mit WC	Wa- gen- ende Do ohne WC					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300					
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8					
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	80	2350	2765	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. un- ter 11	4815	5455	820	1100					
Variante 1a	Ein- und Doppelstocktriebwagen, 24,6 bzw. 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; 1 PRM-gerechter Mittelwagen; zwei Führerräume													Ermittelte Werte	A	B	C		
Untergeschoss														Leermasse in t	188,59	0,85	1,78	2,77	
Anzahl	2	8	0	23	10	1	0	6	4	0	0	4	0	0	Länge in m				105,94
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	41400	9000	8500	0	13200	2240	0	0	9200	0	0	Türspuren				16
Sitzplätze	0	0	0	184	40	23	0	48	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten				295
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben				148
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	160	18800	0	25300	5500	7890	0	7320	2200	0	0	0	0	0	Gesamtsitz- plätze				443
Obergeschoss														Zuladung in t	99,1				
Anzahl	0	0	0	10	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	Gesamt- masse in t				287,7
Bausteinlänge in mm	0	0	0	18000	2700	0	0	0	0	23600	0	0	0	0	Max. Durchsch. Radsatzlast in t	20,3			
Sitzplätze	0	0	0	80	12	0	0	0	0	56	0	0	0	0	Effizienz E		5,4		
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	0	0	11000	1650	0	0	0	0	19260	0	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,4 m + 2 x 26,8 m = 106,4 m																			

Tab. 7-14.1: Modulkombination 1a für einen ein- und doppelstöckigen Triebwagen

Die Abbildung 7-10 zeigt in grafischer Form die Zusammenfassung der Effizienzbewertung für die Modulkombinationen aus Tabelle 7-14.

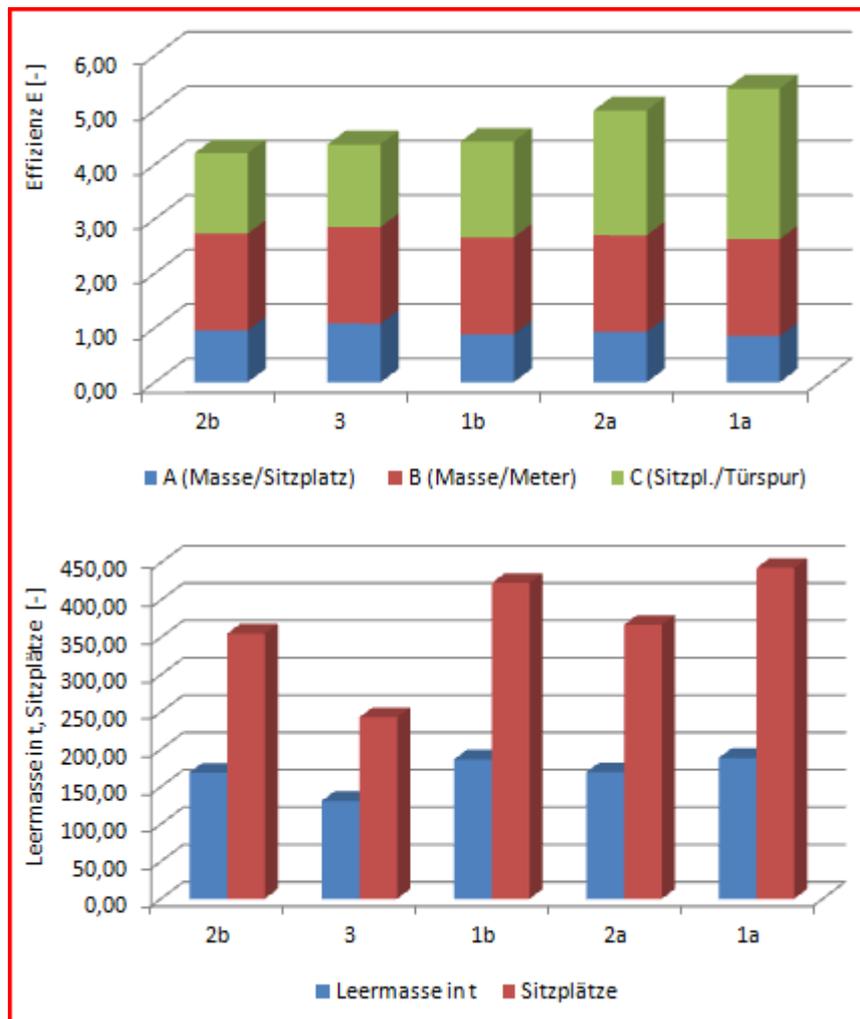


Abb. 7-10: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-14 für kombinierte ein- und zweistöckige Triebwagen

Nach Auswertung der Tabellen 7-14.1 bis 7-14.5 ist die Variante 2b mit zwei verkürzten Einstöckigen und zwei verkürzten Doppelstockwagen mit einem Wert $E = 4,21$ die effizienteste Fahrzeugvariante. Die Variante 3 folgt mit einer Effizienz von 4,37 dahinter, ist aufgrund der ermittelten maximalen, durchschnittlichen Radsatzlast von über 24 t wahrscheinlich praktisch nicht darstellbar. Anders als bei den anderen betrachteten Fahrzeugkonzepten mit Doppelstockanteil im Kapitel 7.6 sind hier die doppelstöckigen Fahrzeugteile antriebslos angenommen worden. Der Bauraum für die Antriebsausrüstung befindet sich in den einstöckigen Fahrzeugteilen (z.B. unterflur oder auf dem Dach). Damit ergibt sich hier keine weitere Reduzierung der Fahrgastkapazität bei einer späteren möglichen Realisierung eines Fahrzeuges.

Bemerkenswert ist an dieser Stelle, dass die Variante 2b dem Fahrzeug Rhein-Ruhr-Express (Desiro HC) sehr nahe kommt. Dieses Fahrzeug lag in der Bestandsaufnahme bereits mit Abstand unter den effektivsten Fahrzeugtypen (siehe z.B. Abb. 3-5).

7.7 Auswertung

Im Kapitel 2 dieser Arbeit wurden die verschiedenen Fahrzeugkonzepte für Regionalbahnfahrzeuge einer vergleichenden Betrachtung unterzogen, um festzustellen, welche Konzepte besonders effizient sind, um Fahrgäste zu transportieren. Es gibt eine große Anzahl von Konzepten, die aufgrund ihrer

individuellen Ausführung einen objektiven Vergleich erschweren. Zum Zwecke der besseren Vergleichbarkeit wurde im Kapitel 3 die Effizienz E definiert.

Im Kapitel 7 wurden nun standardisierte Bausteine für ein Innenraumlayout definiert und damit verschiedene Fahrzeugkonzepte abgebildet. Da hierbei herstellerspezifische Lösungen keinen Eingang gefunden haben, konnte nun eine konzeptspezifische Effizienz ermittelt werden. Die ermittelte Effizienz beruht dabei auf Gleichung 3 und den Korrekturwerten aus Kapitel 3.1. Daher muss auch hier nochmals ausdrücklich betont werden, dass bei einer anderen Gewichtung und Auswahl der Korrekturfaktoren natürlich auch andere Ergebnisse ermittelt werden. In den hier verwendeten Korrekturfaktoren wird neben dem Leichtbau und der Anzahl der Sitzplätze auch die Zugänglichkeit in die Fahrzeuge durch eine entsprechend hohe Anzahl von Türspuren positiv bewertet, siehe auch die Bemerkungen hierzu im Kapitel 7.1 dieser Arbeit. Insofern verwundert es nicht, dass die jeweils effektivsten Varianten drei Türspuren pro Tür besitzen. Ebenso erstaunt es dann nicht, dass die Variante aus zwei Doppelstocktriebwagen effizienter ist als die Varianten mit drei oder vier Wagen, da in ersterem Fall durch den PRM-Bereich rechnerisch eine geringere Anzahl von Sitzplätzen pro Türspur zur Verfügung steht.

Ähnlich wie bei den Auswertungen in den Kapiteln 2 und 3 dieser Arbeit lassen sich Effizienzwerte von kleiner als 4 nicht ermitteln, sofern man nicht besonders lange Fahrzeuge betrachtet (siehe Kapitel 7.6.1). Tabelle 7-15 zeigt die jeweils effektivsten Fahrzeugvarianten mit ihren wesentlichen, konzeptbestimmenden Merkmalen und Abbildung 7-11 zeigt die Ergebnisse in graphischer Form.

Variante	Merkmale	Masse in t	Sitz- plätze	Länge in m	Effizienz
Einstöckiger Triebzug					
8d	Drei überlange Einzelwagen, sechs konventionelle Drehgestelle, ein PRM-gerechter Wagen, zwei Führerräume	147,1	215	83,56	3,92
Doppelstöckige Wagen					
2e	Drei verkürzte Doppelstockwagen, verbunden mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionelle Enddrehgestelle, zwei Jakobsdrehgestelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, ein mittiges Treppenhaus im Mittelwagen, fünf große Einstiege, ein PRM-gerechter Wagen,	96,91	253	53,8	4,25
Doppelstöckiger Triebwagen					
2c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je max. 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; ein PRM-gerechter Wagen; zwei Führerräume	100,38	159	47,8	4,69
Ein- und doppelstöckiger Triebwagen					
2b	Triebzug aus zwei 24 m langen einstöckigen, angetriebenen Endwagen mit je einem Führerstand und zwei 24 m langen Doppelstockeinzelwagen; jeweils zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle in den Doppelstockwagen, ein PRM-gerechter Doppelstockwagen	168,82	355	94,8	4,21

Tab. 7-15: Übersicht der effektivsten Fahrzeugkonzepte bei standardisierter Bewertung

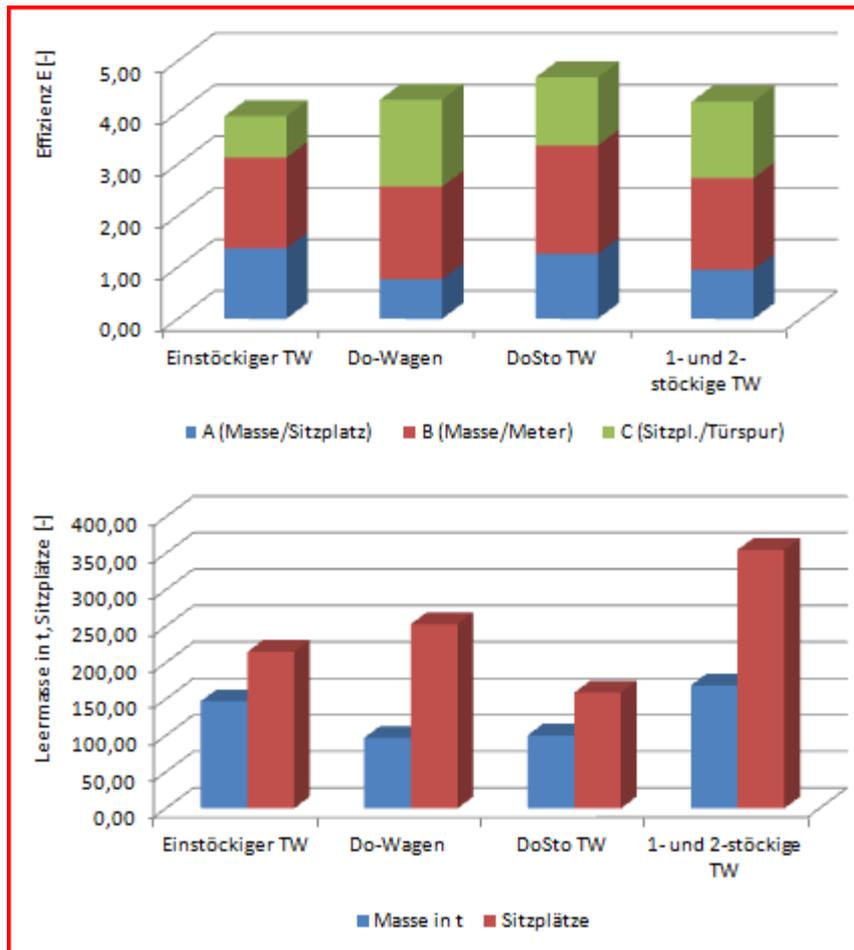


Abb. 7-11: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Kapitel 7

Somit kann man feststellen, dass sich bei Anwendung der Gleichung 3 mit den angenommenen Gewichtungsfaktoren ein dreiteiliger, einstöckiger Triebzug mit überlangen Wagen als effektivste Konzeptvariante herausgestellt. Betrachtet man dagegen sowohl die Gesamtkapazität als auch gleichzeitig die Effizienz, so stellt sich die Konzeptvariante des vierteiligen, ein- und doppelstöckigen Triebzuges als die effektivste dar.

Es bleibt bei der Feststellung, dass es das optimale Fahrzeugkonzept nicht gibt, sondern sich in Abhängigkeit der besonderen Fokussierung auf Schwerpunkte wie

- Gesamtkapazität oder
- Fahrzeuglänge am Bahnsteig oder
- Fahrzeugmasse oder
- Bequemlichkeit für den Fahrgast

jeweils ein anderes Fahrzeugkonzept ergibt.

Beispielhaft sei nachfolgend in Tabelle 7-16 für die vier betrachteten Fahrzeugarten die Gleichung 3 erneut angewendet, diesmal jedoch ohne den Wert C, also ohne Betrachtung der Sitzplätze pro Türspur. In diesem Fall gilt Faktor $z = 0$.

Variante	Merkmale	Masse in t	Sitz- plätze	Länge in m	Effizienz
Einstöckiger Triebzug					
4a	Vierteiler mit zwei konventionellen End- und drei Jakobsdrehgestellen, 1 PRM-gerechter Wagen; zwei Führerräume	130,91	215	74,38	2,98
Doppelstöckige Wagen					
2a	Zwei Doppelstockwagen mit zwei konventionellen End- und einem Jakobsdrehgestell, je ein Treppenhaus im Bereich der Enddrehgestelle, ein PRM-gerechter Wagen	122,61	223	41,92	2,48
Doppelstöckiger Triebwagen					
3a	Drei Doppelstockeinzelnwagen, je max. 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, zwei Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; ein PRM-gerechter Wagen; zwei Führerräume	168	391	80,0	2,96
Ein- und doppelstöckiger Triebwagen					
1a	Triebzug aus zwei 26,4 m langen einstöckigen, angetriebenen Endwagen mit je einem Führerstand und zwei 26,8 m langen Doppelstockeinzelnwagen; jeweils zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle in den Doppelstockwagen, ein PRM-gerechter Doppelstockwagen	188,59	443	105,94	2,63

Tab. 7-16: Übersicht der effektivsten Fahrzeugkonzepte bei standardisierter Bewertung ohne Betrachtung des Wertes C für die Türspuren

In der direkten graphischen Gegenüberstellung der Kennwerte für Tabelle 7-15 und 7-16 in Abbildung 7-12 erkennt man, dass die Sitzplatzkapazität in den Fahrzeugen ohne Berücksichtigung der Türspuren stark ansteigt, insbesondere bei den Varianten mit Doppelstockanteil. Die Effizienzwerte lassen sich durch Wegfall des Wertes C nicht mehr direkt vergleichen, zumal Wert B definitionsgemäß für diese Vergleiche für alle Varianten einer Fahrzeuggattung gleich gesetzt wurde.

Betrachtet man hingegen nur den Wert A (siehe Abb. 7-13), so erkennt man die Zunahme der Sitzplätze und gleichzeitig die Reduzierung des bezogenen Wertes für Masse pro Sitzplatz.

Erkennbar ist, dass je nach Anforderungslage und Gewichtung ein unterschiedliches Fahrzeugkonzept als das effizienteste ermittelt werden kann.

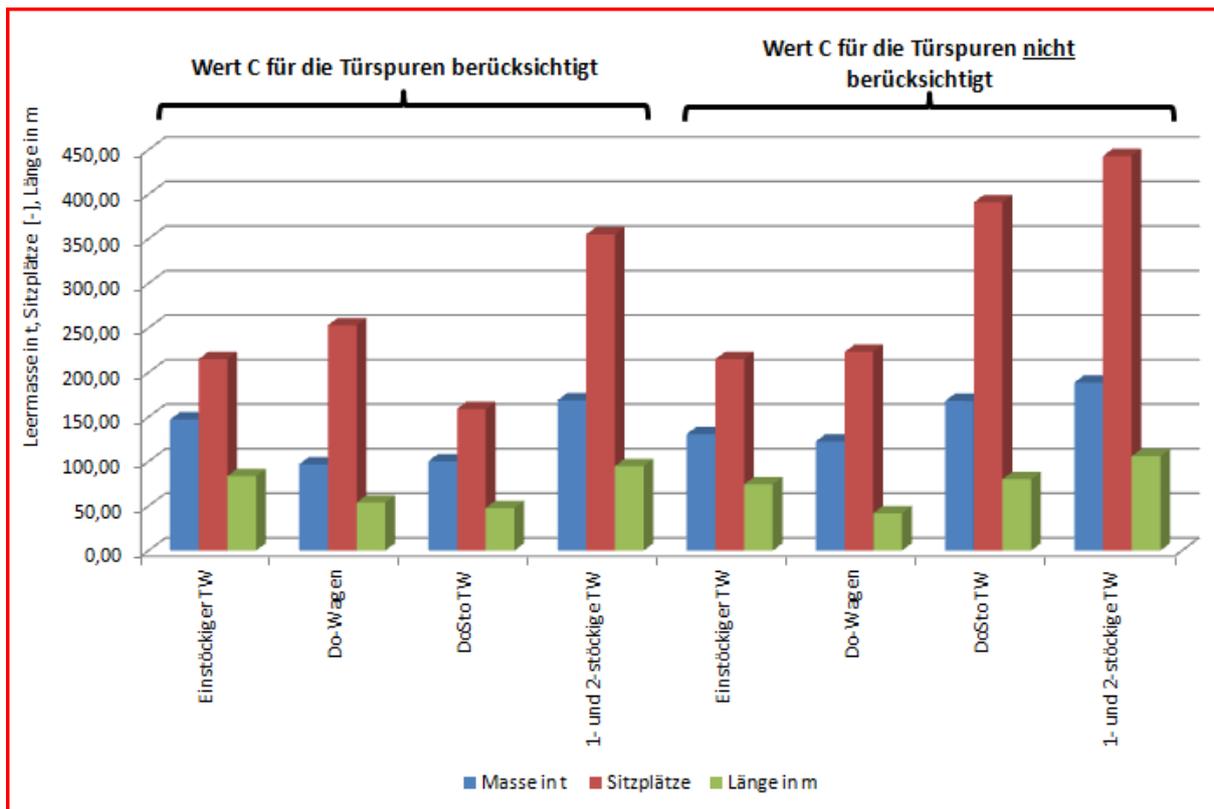


Abb. 7-12: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Kapitel 7, jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Wertes C für die Türspuren

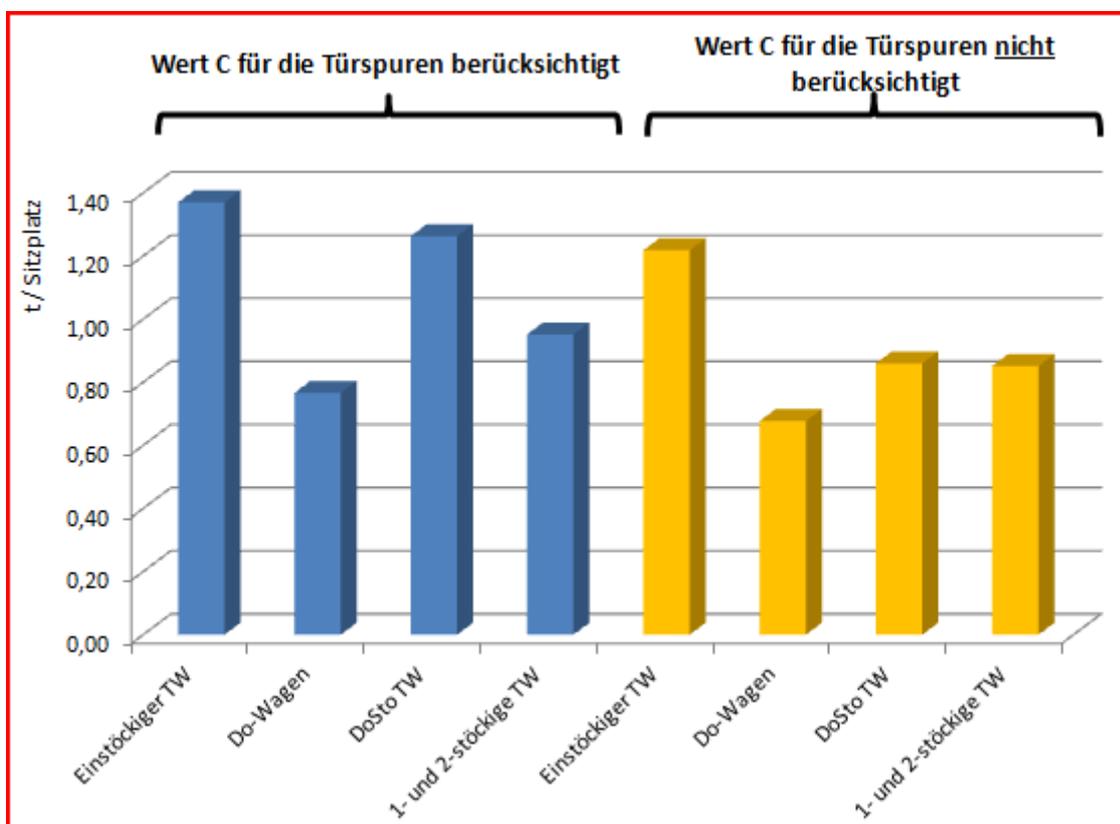


Abb. 7-13: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Kapitel 7, hier jedoch ausschließlich Wert A für die Masse pro Sitzplatz

8. Ableitung eines zukünftigen Regionalbahnfahrzeugs auf Basis unkonventioneller Fahrzeugkonzepte

8.1 Vorbemerkungen

In den Betrachtungen des Kapitels 7 wurden verschiedene, weitgehend konventionelle Fahrzeugkonzepte auf der Basis von standardisierten Innenraum-Bausteinen bezüglich ihrer Effizienz untersucht. In dem nun folgenden Kapitel werden verschiedene unkonventionelle Fahrzeugkonzepte betrachtet, die sich einer standardisierten Betrachtung entziehen, weil neuartige Komponenten hierbei betrachtet werden. Diese Komponenten betreffen den Fahrwerksbereich sowie alternative Innenraumgestaltungen und liegen in der betrachteten Form entweder noch nicht oder nur als Konzept vor. Konkret geht es hierbei um Fahrwerke mit verkleinertem Raddurchmesser (Kapitel 8.2), Einachsfahrwerke (Kapitel 8.3) und zusätzliche Innenraum-Module (Kapitel 8.4).

In ausgeführten Serienfahrzeugen werden Einachsfahrwerke überwiegend im Straßenbahnbereich angewendet. Bei Personenwagen im Vollbahnbereich sind aktuell ausschließlich die Fahrzeuge der S-Bahn Kopenhagen (siehe dazu [14] und [34]) sowie der Dieseltriebwagen Integral (siehe [13] und [17]) damit ausgestattet. Darüber hinaus sei auf die Schienenbusse von DB und DR (Baureihen 795 und 798 sowie 771 und 772) und diverse zweiachsige Wagen aus Reichsbahn- und Länderbahnzeit verwiesen. Außerdem befasst sich die DLR in ihrem Projekt NGT intensiv mit der Verwendung von Einachsfahrwerken [66].

Fahrwerke mit verkleinertem Raddurchmesser eröffnen in der Gestaltung von Wagenübergangsbereichen neue Perspektiven, sind aber in der praktischen Anwendung im Vollbahnbereich bisher nur bei Güterwagen bekannt (z.B. Bauart Saadkms 690 der DB).

Nachfolgend werden zu den drei Themenkomplexen die sich ergebenden Möglichkeiten mit Bezug auf die Fahrzeuggestaltung untersucht und bewertet.

8.2 Fahrzeuge mit kleinen Rädern

8.2.1 Fahrzeugvarianten

Die bisher betrachteten Fahrzeugkonzepte basieren ausschließlich auf der Verwendung der bekannten Wagenanordnungen. Diese sind im Regionalbahnbereich insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass die Wagenübergänge nicht zum Wagenwechsel von mobilitätseingeschränkten Menschen geeignet sind. Insbesondere Rollstuhlfahrer haben keine Möglichkeit, den Wagen zu wechseln (was z.B. bei Türstörungen wichtig sein kann). Daher wird nachfolgend untersucht, ob es andere Formen der Fahrzeuggestaltung gibt, die den Wagenwechsel auch für mobilitätseingeschränkte Personen ermöglichen. Ein wesentlicher Bestandteil ist dabei die Frage, wie die Fahrwerke gestaltet werden müssen, um einen ausreichend breiten und möglichst niederflurigen Bereich zu erhalten. Die Niederflurigkeit ist wichtig, um auf Rampen im Fahrzeug verzichten oder diese zumindest möglichst klein halten zu können.

Gemäß TSI PRM liegt der maßgebliche Platzbedarf für die Durchfahrt mit einem Rollstuhl im unteren Bereich bei mindestens 700 mm, im oberen Bereich bei mindestens 800 mm.

Echte Niederflurfahrwerke sind von modernen Straßenbahnen bekannt. Diese Fahrwerke sind gekennzeichnet durch Räder mit kleinem Raddurchmesser, häufig ohne verbindende Radsatzwelle, außenliegende Antriebe und Bremsanlagen. In einem ersten Schritt wird der Einfluss der Raddurchmesser betrachtet.

Zur konzeptionellen Untersuchung, ob Fahrzeugvarianten mit kleineren Rädern Potential für eine andere Form des Überganges zwischen zwei benachbarten Wagen bieten, werden daher drei sich ergänzende Varianten betrachtet:

- der konventionelle Einzelwagen (Variante 1)
- über Jakobs-Drehgestelle verbundene Wagen (Variante 2) und
- ein mindestens zweiteiliges Fahrzeug mit zwei konventionellen End- und einem Jakobsdrehgestell (Variante 3)

Maßgeblich wird die Ausprägung des Wagenübergangsbereiches durch die Fahrt im Bogen bzw. im S-Bogen mit Zwischengerade bestimmt. Im ersten Schritt wird daher die Untersuchung für die Fahrt durch den Bogen durchgeführt, wobei als kleinster Bogen hier der 120 m Bogen gewählt wird. Dies ist deutlich kleiner, als es den Vorgaben der EBO für den Neubau von Haupt- und Nebenstrecken entspricht (hier werden 300 m bzw. 180 m als kleinster Bogenradius definiert), berücksichtigt aber die immer noch zahlreich vorhandenen Altstrecken.

Anhand des Bewegungsverhaltens wird untersucht, welcher Platz in den genannten drei Varianten für den Wagenübergang zur Verfügung gestellt werden kann. Untersucht werden dabei die geometrisch möglichen Extrem-Stellungen der benachbarten Fahrzeuge, d.h. die theoretisch ungünstigsten Stellungen der Wagen und der Drehgestelle im Gleis. Beim Einzelwagen ist es die Stellung „Spießgang“, wobei das vorlaufende Drehgestell vollständig bogenaußen und das nachlaufende Drehgestell boginnen läuft und die Drehgestelle an der Kuppelstelle ebenfalls die gegenüberliegende Position im Gleis einnehmen. Bei der Variante 2a eines Gliederfahrzeuges wird angenommen, dass das mittige Jakobsdrehgestell vollständig bogenaußen läuft und die beiden Enddrehgestelle boginnen. Die Variante 3a entspricht der Variante 2a, lediglich um den Fahrzeugüberhang ergänzt. In den Varianten 2b und 3b wird für das Mittendrehgestell ein Spießgang überlagert. Diese Fälle sind hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Praktisch haben sie durch den mittigen Drehpunkt des Drehgestells keine Relevanz. Die Darstellung der Varianten mit unterschiedlichen Stellungen im Bogen ist den folgenden Abbildungen 8-1 bis 8-5 zu entnehmen:

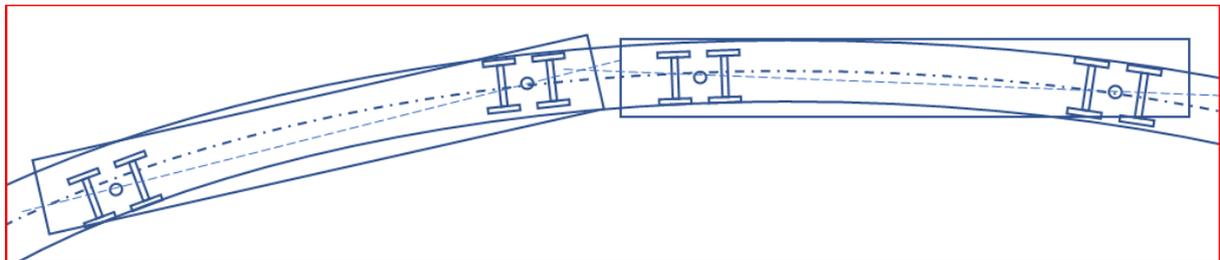


Abb. 8-1: Variante 1, Einzelwagen, jeweils im Spießgang

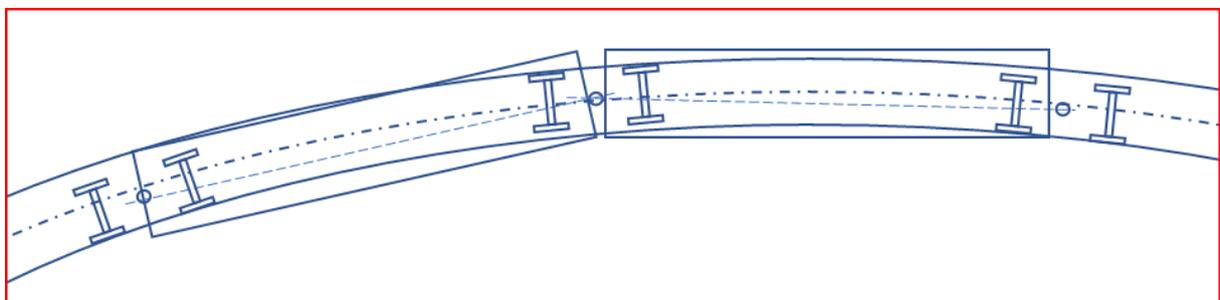


Abb. 8-2: Variante 2a: Wagen mit Jakobsdrehgestellen (mittleres Drehgestell in der Außenseitenstellung)

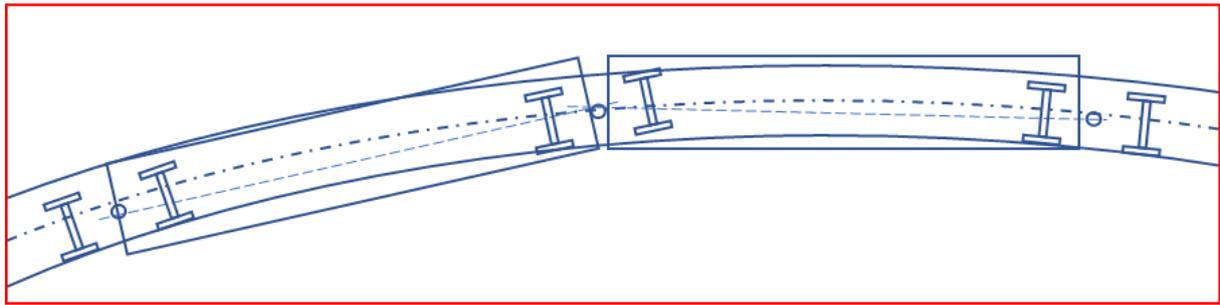


Abb. 8-3: Variante 2b: Wagen mit Jakobsdrehgestellen (mittleres Drehgestell im Spießgang)

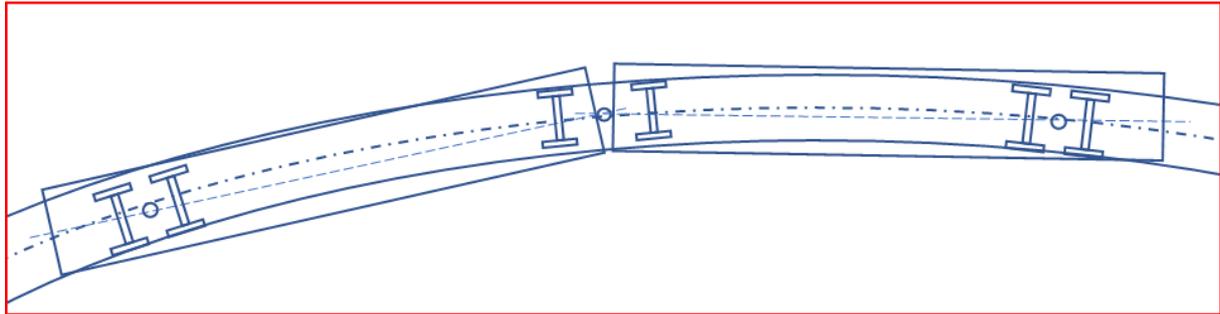


Abb. 8-4: Variante 3a: Wagen mit einem Jakobs- und einem Enddrehgestell (mittiges Drehgestell in der Außenstellung)

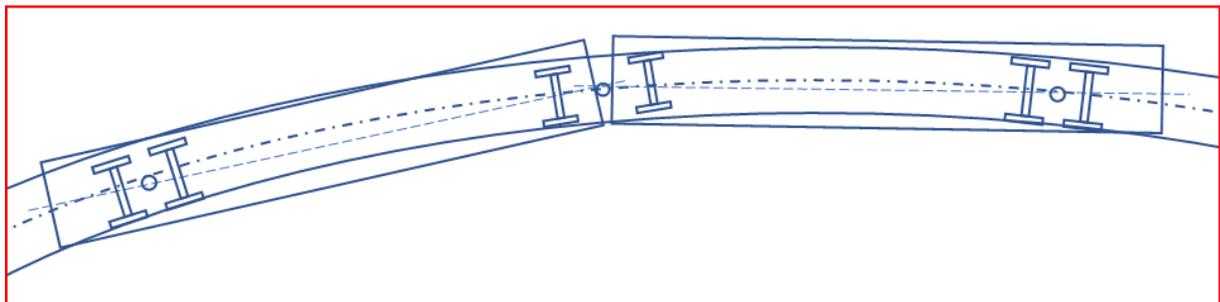


Abb. 8-5: Variante 3b: Wagen mit einem Jakobs- und einem Enddrehgestell (mittiges Drehgestell im Spießgang)

Basierend auf den Vorgaben der EBO für die Gestaltung der Gleisanlagen und der Radsätze werden für die Untersuchung die folgenden Werte gemäß Tabelle 8-1 verwendet:

Streckenparameter	Verwendeter Wert
Bogenradius	120 m
Spurweite im Bogen	1.445 mm
Gleisüberhöhung	0 mm
Beidseitiger, paralleler Gleishöhenwechsel (Auffahrt Schiebebühne)	100 mm auf 1.000 mm

Tab. 8-1: verwendete Streckenparameter

Die Untersuchung wird für die Raddurchmesser 840 mm, 760 mm und 550 mm durchgeführt. Es gelten nach EBO für diese Raddurchmesser die Parameter für die Räder nach Tabelle 8-2:

Radsatzparameter	Ø 840 mm	Ø 760 mm	Ø 550 mm
Radrückenabstand (AR)	1.359 mm		
Spurmaß (SR)	1.415 mm		
Radbreite (BR)	133 mm		
Spurkranzhöhe (Sh)	36 mm	38 mm	
Raddurchmesser abgenutzt nach UIC 510-2	760 mm	680 mm	470 mm

Tab. 8-2: verwendete Radsatzparameter

Basierend auf ausgeführten Fahrzeugen mit dem Komfort eines Regionalbahnfahrzeuges werden für die Abmessungen, Abstände und Federwege der Fahrzeuge die Parameter nach Tabelle 8-3 in der Betrachtung verwendet:

	Einzelwagen	Gliederzug	Gliederzug mit Enddrehgestellen
Wagenlänge	26,8 m	16,1 m	19,3 m
Wagenbreite	2,78 m	2,9 m	2,9 m
Abstand der Drehgestellmitten	20 m	16,1 m	16,1 m
Abstand der Kupplungsdrehpunkte zueinander	2.000 mm	entfällt für das hier vorrangig betrachtete Jakobsdrehgestell	
Luftfederbasis	2.000 mm	2.000 mm	2.000 mm
Radsatzabstand im Drehgestell	2.500 mm	2.700 mm	2.700 mm 2.500 mm
Wagenüberhang	3.200 mm	0	0 3.200 mm
Abstand der Wagenkästen	400 mm	550 mm	550 mm
Drehgestellhöhe (Oberkante gefüllte Luftfeder)	800 mm (bei 840 mm Rad) 760 mm (bei 760 mm Rad) 655 mm (bei 550 mm Rad)		
Max. Federweg primär, vertikal	30 mm		
Max. Federweg primär, lateral	5 mm		
Max. Federweg sekundär, vertikal	55 mm		
Max. Federweg sekundär, lateral	65 mm		
Max. Ausfederweg prim. und sek. vertikal	30 mm		

Tab. 8-3: verwendete Fahrzeugparameter

Die Abmessungen sowohl des Einzelwagens als auch der Wagen mit Jakobsdrehgestellen orientieren sich an heute aktuell ausgeführten Fahrzeugen. Als weitere Randbedingung sei erwähnt, dass beim Einzelwagen unterstellt wird, dass dieser eine Mittelpuffer- bzw. Kurzkupplung besitzt, da die Niederflrigkeit eines Wagenüberganges mit den Anforderungen nach UIC zu den Pufferhöhen inkompatibel sind. Dies kann in den Varianten 1 und 3 bei Bedarf aber durch ein entsprechend UIC-kompatibles Wagenende mit Seitenpuffern an den Wagenenden kompensiert werden.

8.2.2 Freigängigkeit im Bogen

Für den Einzelwagen ergibt sich aus den unter A genannten Werten ein Querversatz des Wagenkastens gegenüber der mittigen Stellung im Gleis von 85 mm am Drehzapfen und von 113 mm am Wagenende. Da der gegenüberstehende Wagen in gegenläufiger Bewegung betrachtet wird, ergibt sich ein Gesamtversatz von 226 mm. Gleichzeitig führt dies dazu, dass, je nach Bogenrichtung, der Gangbereich in seinem lichten Durchgang eingeschränkt ist und je Seite um mindestens 100 mm erweitert werden muss (siehe Abb. 8-6).

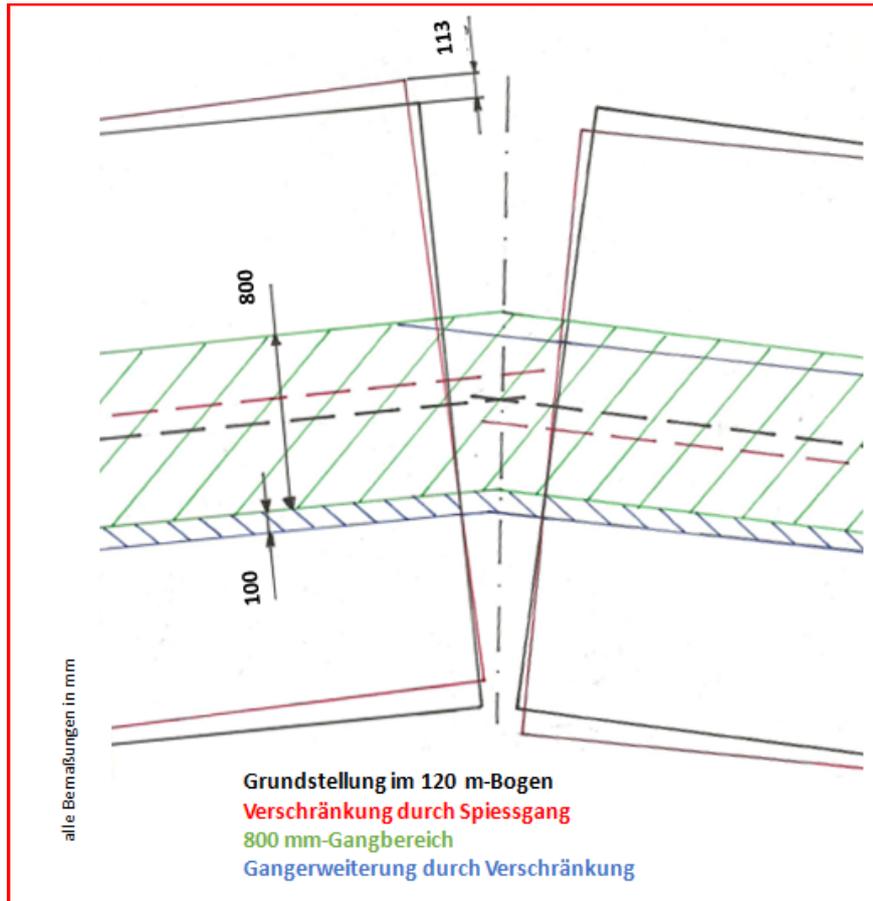


Abb. 8-6: Drehgestellversatz im 120 m Bogen für Variante 1 und Auswirkung auf den Durchgang zwischen zwei Wagen

Für den Gliederzug nach Varianten 2 und 3 ergibt sich aus den in Tabelle 8-3 genannten Werten ein Querversatz des Wagenkastens gegenüber der mittigen Stellung im Gleis von ebenfalls 85 mm am Drehzapfen, welcher in diesem Fall identisch ist, mit dem Querversatz am Wagenende. Da der gegenüberstehende Wagen kinematisch über dasselbe Drehgestell und denselben Drehpunkt gekoppelt ist, ergibt sich hier keine Verdoppelung des Querversatzes zweier Wagen zueinander. Dies trifft auch auf den Fall des Spiessganges des hier betrachteten Drehgestells zu, da die kinematische Veränderung um den Drehgestell-Drehpunkt hier neutral erfolgt. Daher ist für diesen Fall des Gliederzuges mit Jakobsdrehgestell der Gangbereich in seinem lichten Durchgang nicht eingeschränkt und kann bei 800 mm verbleiben, was der weiteren Innenraumgestaltung zugutekommt (siehe Abb. 8-7).

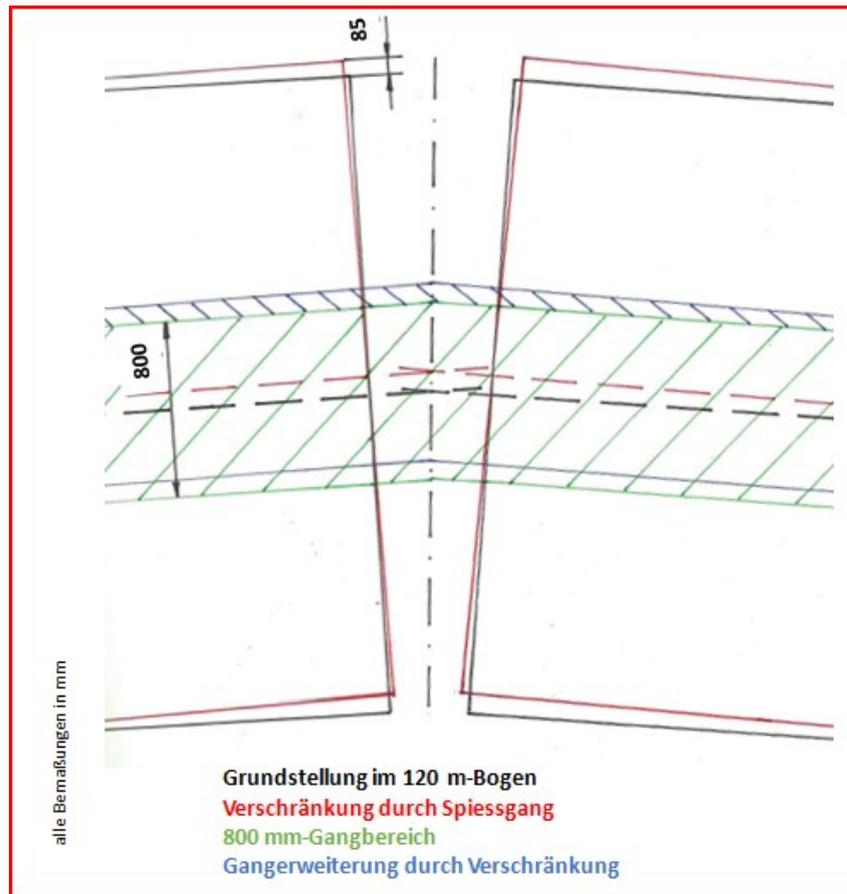


Abb. 8-7: Drehgestellversatz im 120 m Bogen für Variante 2 und 3 und Auswirkung auf den Durchgang zwischen zwei Wagen

Da eine neue, sinnvollere Nutzung des Ganges zwischen zwei Wagen beim Einzelwagen nicht erkennbar ist, wird auf eine weiterführende Prüfung des Bewegungsverhaltens im S-Bogen verzichtet. Für ein Fahrzeug mit Jakobsdrehgestell ergeben sich im S-Bogen keine ungünstigeren Bewegungen als im 120 m-Bogen, so dass für beide Varianten darauf verzichtet werden kann.

8.2.3 Innenraumnutzbarkeit

Neben dem eigentlichen Wagenübergangsbereich ist der Bereich zwischen den Rädern im Drehgestell für die weitere Nutzbarkeit für den Innenraum von entscheidender Frage. Von Regionalbahnen, aber insbesondere von Straßenbahnen sind vielfältige Formen von Podesten oder Radkästen bekannt, deren Ursache stets in der möglichst effektiven Nutzung des Fahrgastraumes liegt.

Für die Werte aus den Tabellen 8-1 bis 8-3 wird nun die Nutzbarkeit des Raumes zwischen den Rädern im 120 m-Bogen betrachtet. Zusätzlich zu den genannten Parametern gelten noch folgende Zuschläge nach Tabelle 8-4:

Parameter	Verwendeter Wert
Sicherheitsabstand zwischen bewegten Teilen des Drehgestells zum Wagenkasten	30 mm
Bauraum für die Radscheiben-Bremsanlage	150 mm
Fußboden inkl. Beblechung	50 mm
Vertikale Wagenkasten-Rohbau-Struktur inkl. Fußboden	150 mm
Laterale Wagenkasten-Rohbau-Struktur inkl. Innenverkleidung	100 mm

Tab. 8-4: verwendete Wagenkastenparameter

Bei dem Parameter für den Fußboden ist noch zu erwähnen, dass im Bereich der Räder von einer einfachen Stahl-Behlebung mit darüber liegendem Holzfußboden ausgegangen wird. Etwaige notwendige Querprofile können vor und hinter dem Rad angeordnet werden. Eine Struktur aus Aluminium-Strangpreßprofilen wäre in diesem Bereich nur mit einer Erhöhung der Materialstärke und einer anderen Fußbodenhöhe darstellbar (es wäre ein Zuschlag von ca. 30 bis 50 mm in der Höhe für die Strangpressprofile erforderlich).

Für ein 840 mm-Rad ergibt sich die folgende Darstellung nach Abb. 8-8 als Fahrzeugquerschnitt im betrachteten Bereich des Drehgestells:

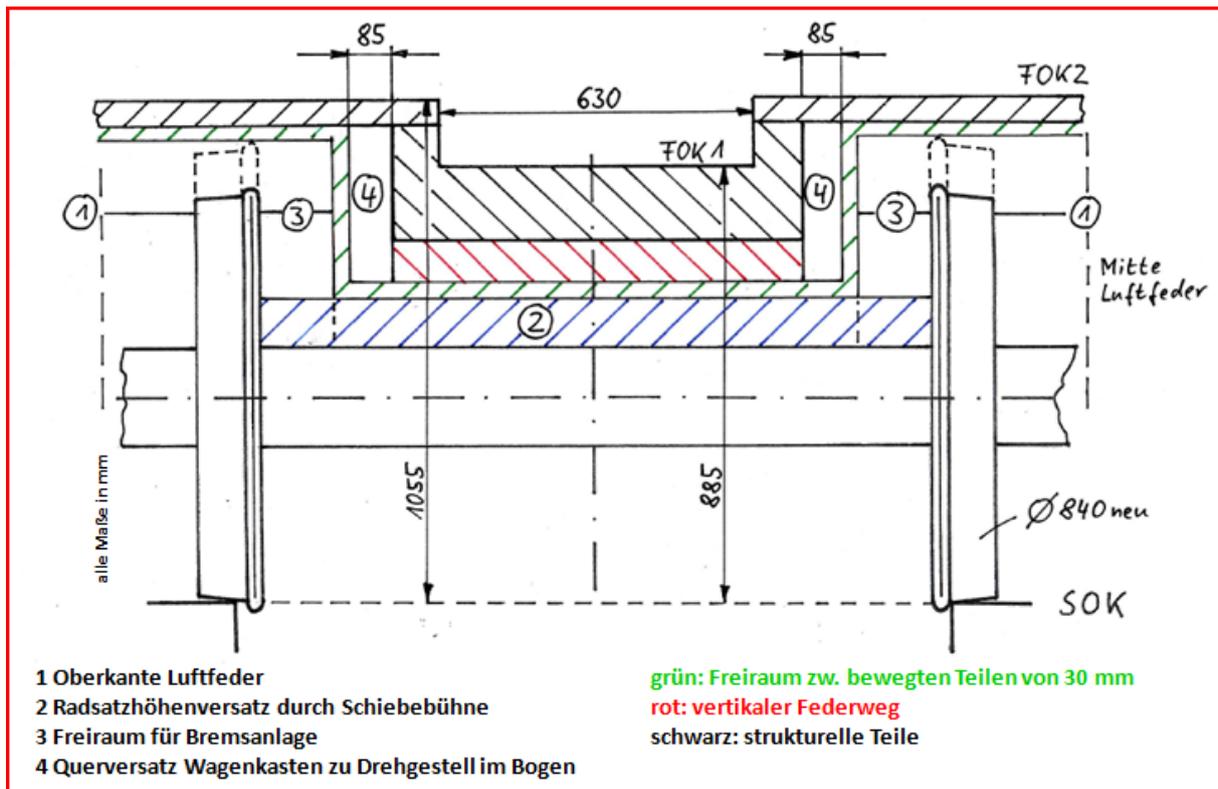


Abb. 8-8: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells bei 840 mm Raddurchmesser

Im geraden Gleis ergäbe sich ein Gang von 800 mm Breite bei einer Fußbodenhöhe von 885 mm über SOK (FOK 1) gegenüber einer regulären Fußbodenhöhe von 1.056 mm (FOK 2) oberhalb des Drehgestells. Durch die Fahrzeugbewegungen bei Bogenfahrt wird diese Breite jedoch auf 630 mm eingeschränkt und wäre für Rollstuhlfahrer nicht mehr befahrbar. Ähnlich sehen die Verhältnisse bei einem Raddurchmesser von 760 mm aus, allerdings reduziert sich hier die Fußbodenhöhe FOK 1 auf 845 mm (FOK 2: 976 mm). Die Gangbreite ändert sich hier nicht gegenüber dem größeren Rad (siehe Abb. 8-9)

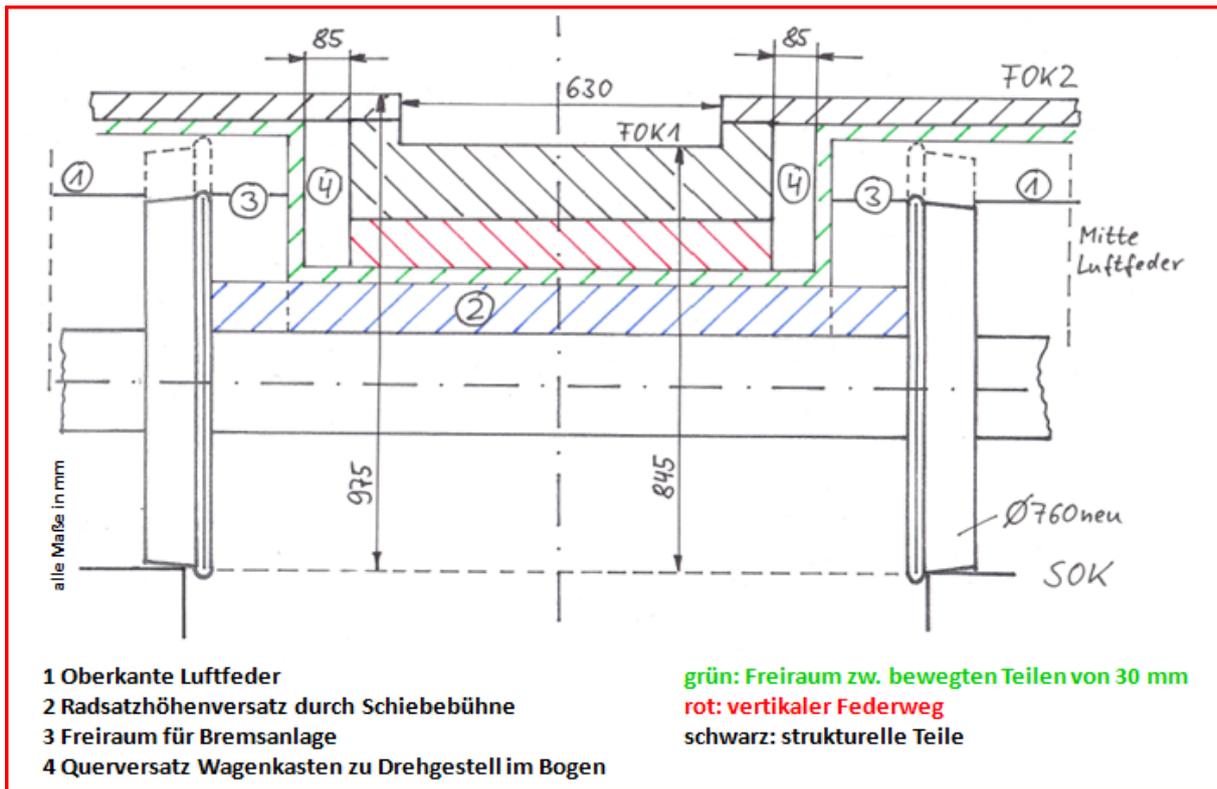


Abb. 8-9: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells bei 760 mm Raddurchmesser

Grundlegend andere Verhältnisse ergeben sich bei einem Rad mit 550 mm Durchmesser. Hier reduziert sich die Fußbodenhöhe FOK 1 auf 740 mm, wobei der Gang weiter mit 630 mm zu schmal für einen Rollstuhlfahrer wäre. Da die Fußbodenhöhe FOK 2 in dieser Variante bei 850 mm liegt, könnte hier aufgrund der geringen Höhendifferenz auf einen Mittelgang verzichtet werden. Es ergäbe sich ein nahezu vollständig ebener Fußboden für ein Fahrzeug, das überwiegend am 760 mm hohen Bahnsteig hält (siehe Abb. 8-10).

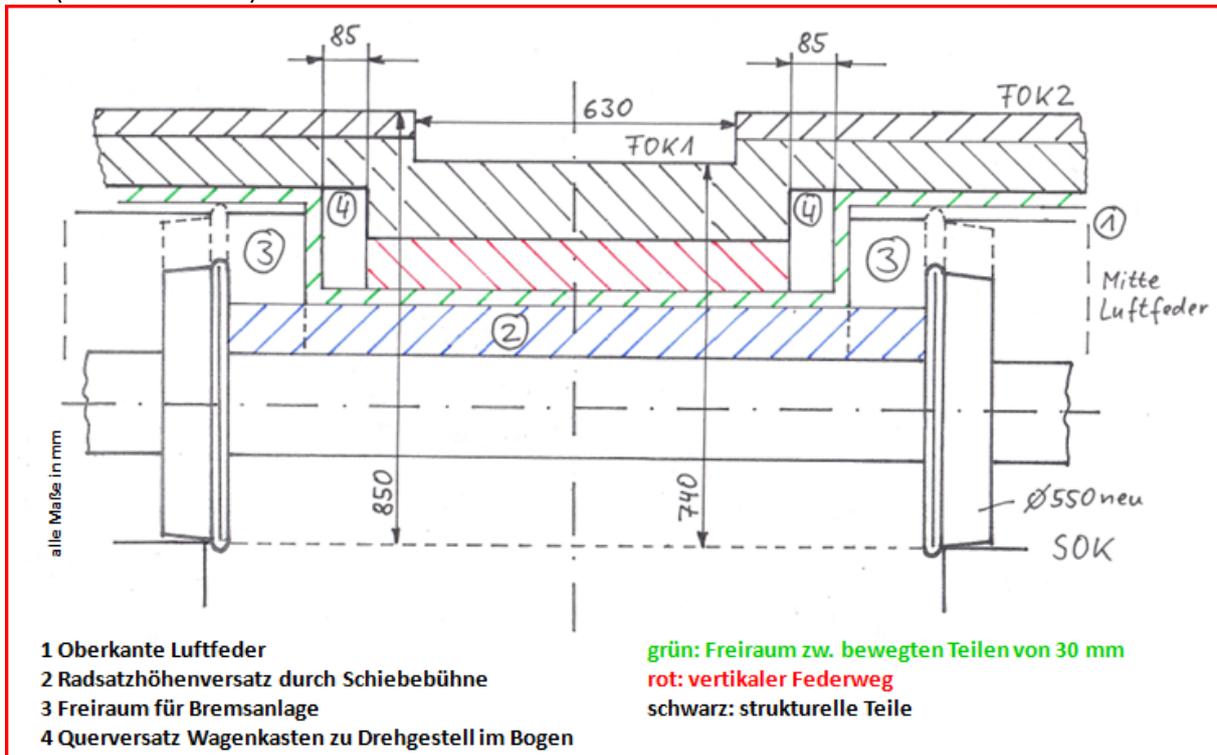


Abb. 8-10: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells bei 550 mm Raddurchmesser

Unterstellt man nun, dass solch ein Drehgestell mit kleinen Rädern entweder ungebremst ausgeführt wird oder mit einer platzsparenden Klotzbremse versehen wird und unterstellt man weiter, dass das Befahren einer Schiebepöhrne mit organisatorischen Maßnahmen ausgeschlossen werden kann, so entfallen die freizuhaltenen Bauräume 2 und 3 und es ergibt sich die Situation in Abb. 8-11 mit einer Ganghöhe über dem Drehgestell von 680 mm bei einer Gangbreite von 960 mm, welche auch für Rollstuhlfahrer befahrbar wäre. Berücksichtigt ist jedoch die vollständige Einfederung des Radsatzes.

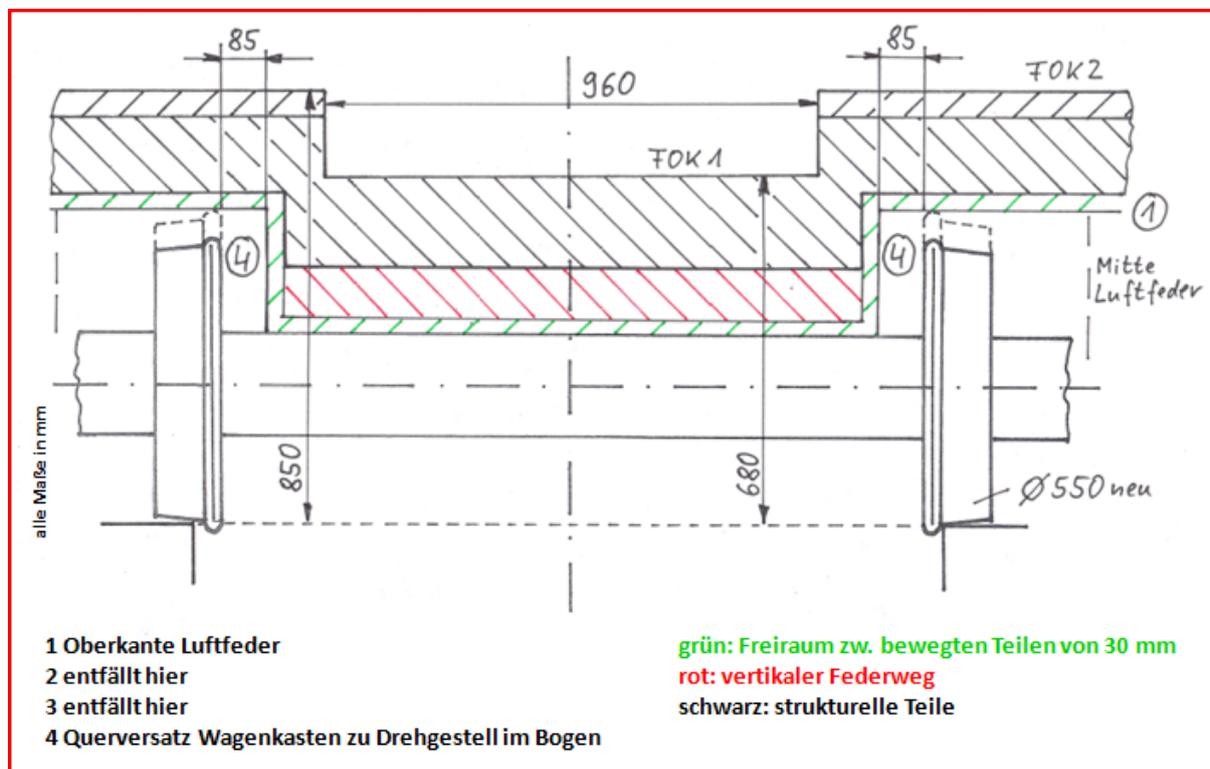


Abb. 8-11: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells ohne Bremsanlage bei 550 mm Raddurchmesser

Eine weitere Absenkung des Fahrzeugbodens zugunsten eines Durchganges ist nur dann erreichbar, wenn das Prinzip des starren Radsatzes zugunsten eines Losradsatzes aufgegeben wird, wie er z.B. beim Projekt „Next Generation Train – NGT“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) propagiert wird [66]. Dieses Prinzip lässt sich aus Gründen der Laufstabilität im hier zu betrachtenden Geschwindigkeitsbereich aber nur bei angetriebenen Fahrwerken anwenden, während die hier dargestellte Untersuchung mit starren Radsätzen die beiden Fälle angetriebener und nicht-angetriebener Fahrwerke abdeckt.

Auf der Basis der Betrachtung zu Abb. 8-11 lässt sich ein Wagenübergangsbereich gemäß Abb. 8-12 darstellen:

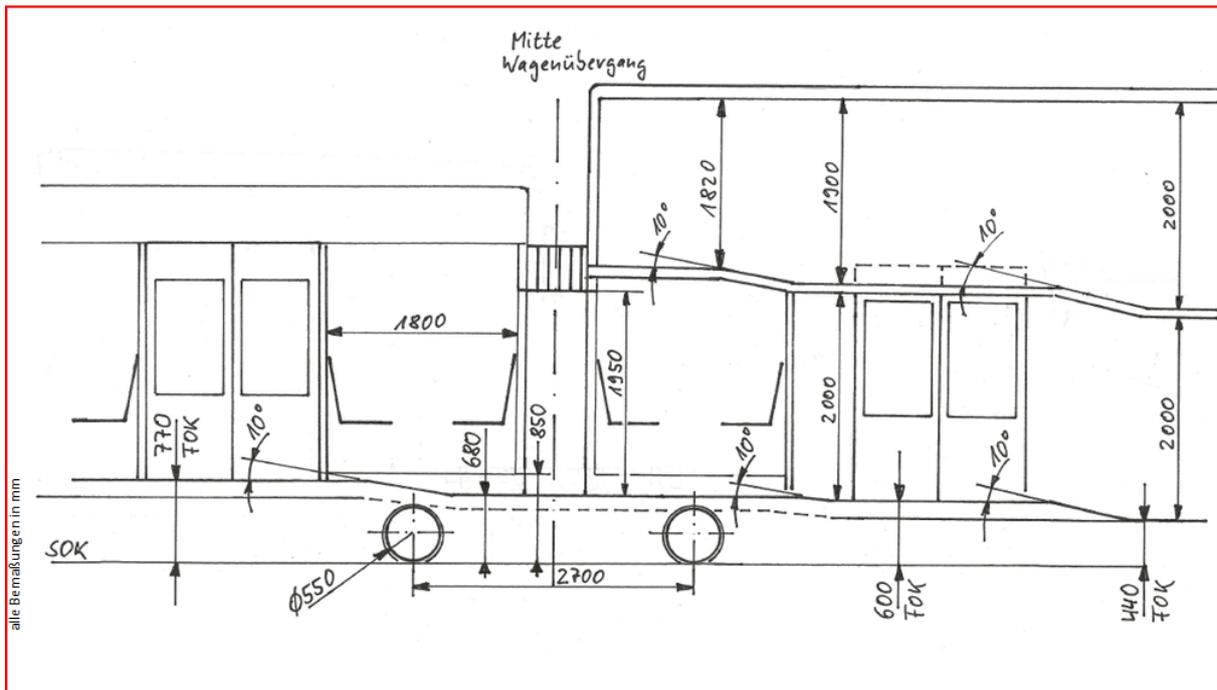


Abb. 8-12: Wagenübergangsbereich bei Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser

Abb. 8-12 zeigt dabei den Wagenübergangsbereich zweier mittels Jakobsdrehgestells miteinander verbundener Wagen, wovon der linke Wagenteil einstöckig und der rechte Wagenteil doppelstöckig ausgeführt ist. In dieser Konstellation wäre es möglich, einen einstöckigen Wagen vollständig PRM-gerecht zu gestalten und durch die Verbindung beider Wagen einen Ein- bzw. Ausstieg auf zwei verschiedenen (üblichen) Bahnsteighöhen zu ermöglichen. Die sich dabei im Doppelstockwagen ergebenden Innenhöhen sind der Abb. 8-13 zu entnehmen.

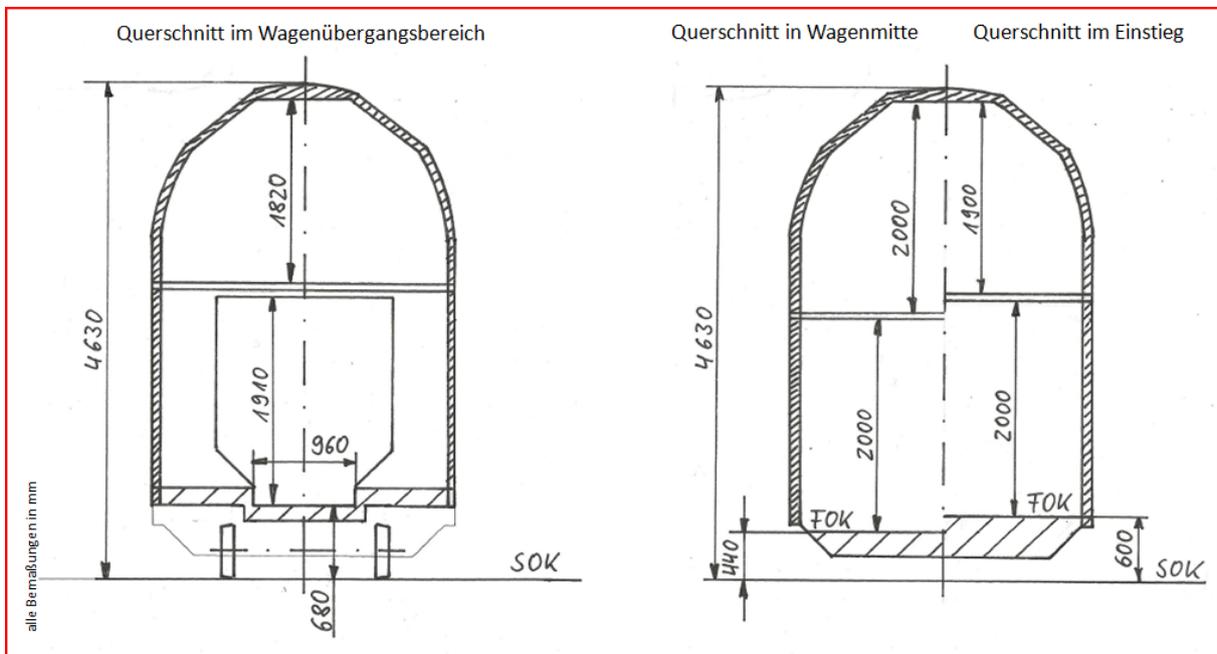


Abb. 8-13: Innenhöhen bei Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser

8.2.4 Übertragung der Ergebnisse auf einen Triebzug

In der Gesamtausprägung würde solch ein Fahrzeug Platzverhältnisse gemäß Abb. 8-14 aufweisen.

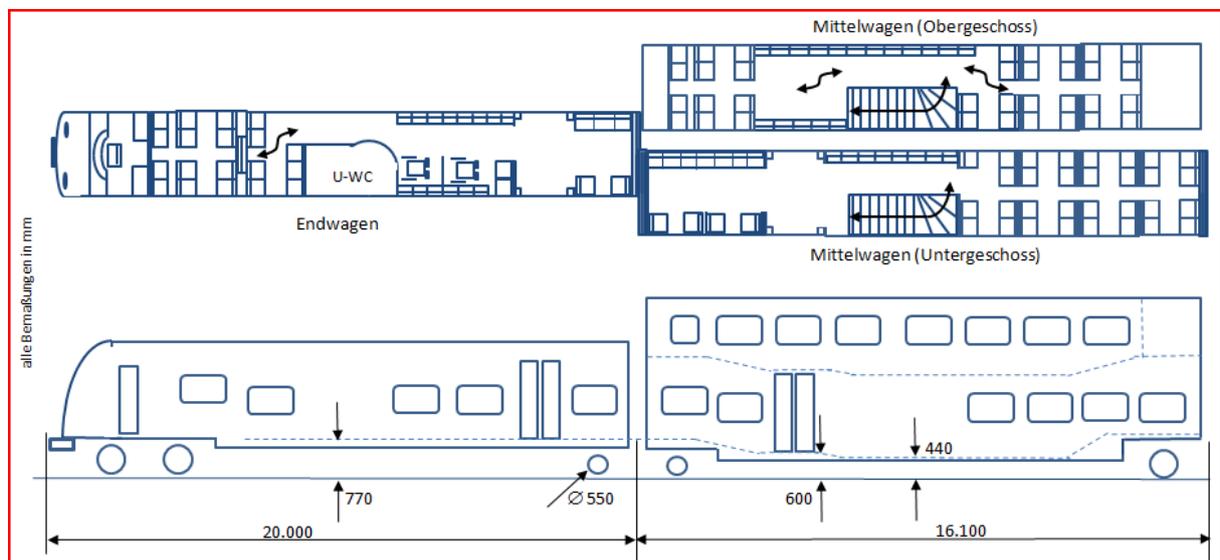


Abb. 8-14: mögliches Fahrzeuglayout unter Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser

Das in Abbildungen 8-12 bis 8-14 dargestellte Fahrzeug besitzt im Endwagen und im Bereich des Wagenüberganges einen ebenen Fußboden von 770 mm, welcher am 760 mm hohen Bahnsteig einen ebenen Einstieg ermöglicht. Der Mittelwagen besitzt einen Einstieg von 600 mm, optimiert für den 550 mm hohen Bahnsteig und einen Fußboden im Mittelbereich von 440 mm Höhe, analog heutiger Doppelstockwagen mit Tiefeinstieg. Zum anderen Wagenende wird wieder eine Rampe oder eine Treppe benötigt, um das zweite Jakobsdrehgestell zu überbrücken. Dieses wäre in diesem Fall mit einem konventionellen Drehgestell mit großen Rädern (z.B. 840 mm Durchmesser) ausgestattet und wäre komplett mit Antriebs- und Bremsanlage versehen. In Verbindung mit der einseitigen Längssitzanordnung im Übergangsbereich kann eine mobilitätseingeschränkte Person, z.B. mit einem Rollstuhl, den Wagenübergang passieren und findet stets eine zum Bahnsteig passende Ausstiegshöhe, um das Fahrzeug barrierearm betreten oder verlassen zu können. Denkbar wären hier begleitende visuelle Kennzeichnungen des jeweils passenden Einstieges.

Eine weitere mögliche Variante zeigt die Abbildung 8-15. Diese Variante zeichnet sich durch eine andere Treppenanordnung zum Obergeschoß und eine zweite Fahrgastraumtür aus. Die oben gemachten Aussagen zum Wagenübergangsbereich am Jakobsdrehgestell zwischen End- und Mittelwagen bleiben dabei weiterhin gültig.

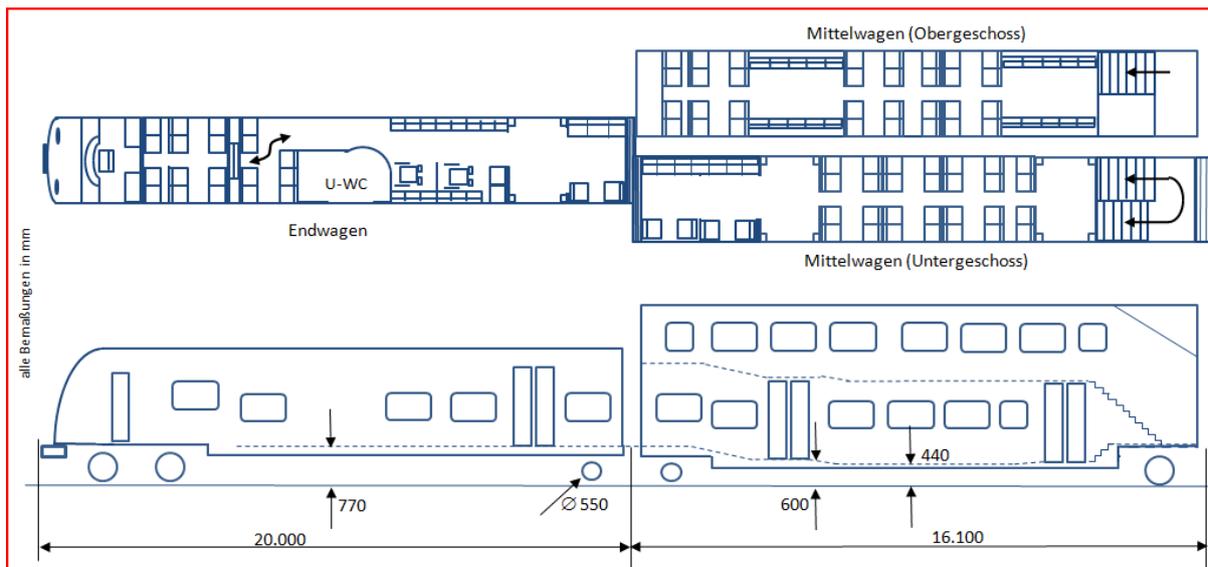


Abb. 8-15: Variante Fahrzeuglayout unter Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser

Basierend auf Abb. 8-15 lässt sich auch eine Kombination zweier mittels Jakobsdrehgestell verbundener Doppelstockwagen (Abb. 8-16) darstellen. Dies entspricht der Variante 3 aus Abb. 8-4 bzw. 8-5. In dieser Form lässt sich dann allerdings nicht der Vorteil des vollständig PRM-gerechten Ein- und Ausstiegs an zwei Bahnsteighöhen realisieren. Der Antrieb kann hier über eine Lokomotive erfolgen oder die beiden Wagen werden in einem Verband nach Abb. 8-14 bzw. 8-15 verwendet.

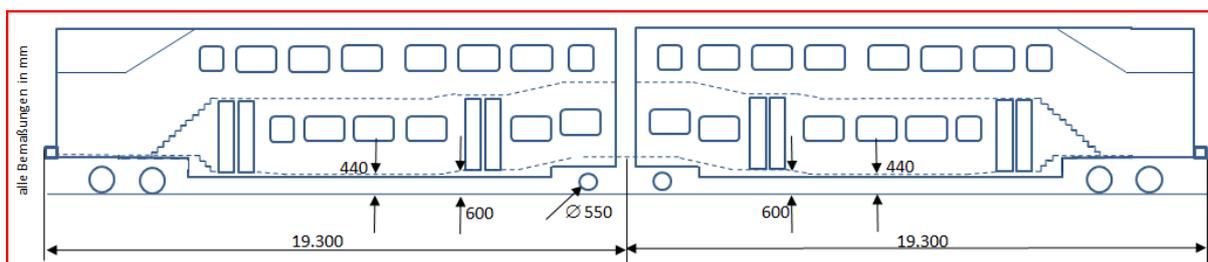


Abb. 8-16: Variante Fahrzeuglayout unter Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser

Abb. 8-17 zeigt einige der denkbaren Konzeptvarianten im direkten Vergleich.

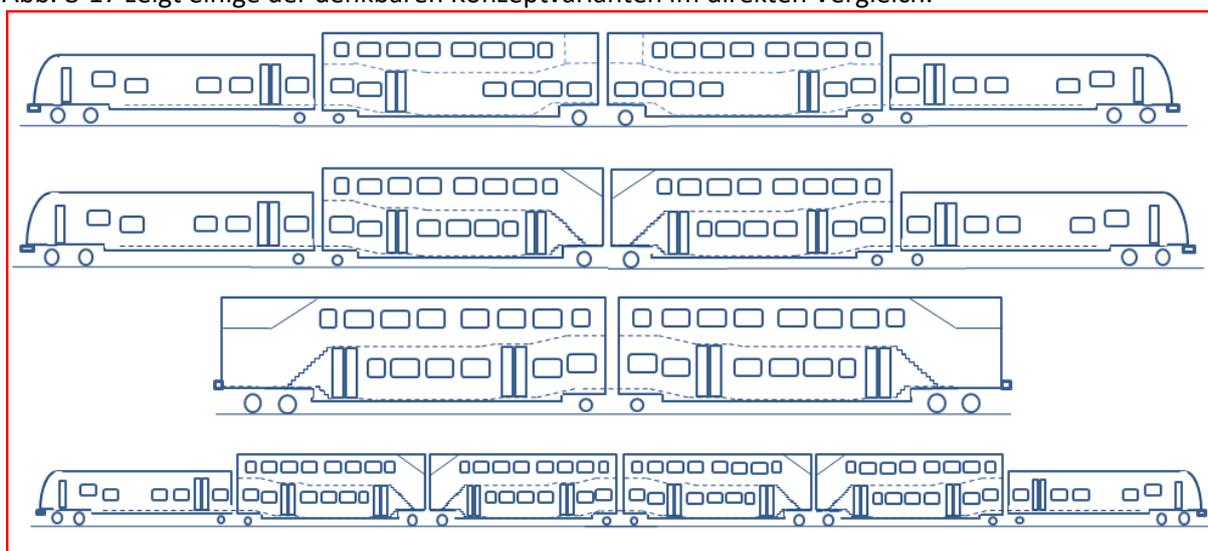


Abb. 8-17: mögliche Varianten eines Fahrzeuglayouts unter Verwendung von Jakobsdrehgestellen mit 550 mm Raddurchmesser im Vergleich

Kombiniert man den Ansatz eines Fahrwerkes mit kleinen Rädern und der daraus erzielbaren besseren Nutzbarkeit des Innenraumes mit der größeren kinematischen Fahrzeugbegrenzungslinie GC nach EN 15273-1, so ergeben sich weitere Verbesserungen in der Innenraumnutzbarkeit für Doppelstockwagen.

Bei Anwendung der Begrenzungslinie GC ergibt sich zwar nur eine geringfügig vergrößerte Fahrzeughöhe, jedoch kann nahezu die volle Breite der Fahrzeuge auch im Obergeschoß genutzt werden.

Aus Gründen der besseren Übertragbarkeit und Absicherung der Ergebnisse und weil keine finalen Drehgestellparameter für ein Fahrwerk mit kleinen Rädern vorliegen, werden die Fahrzeughauptabmessungen heutiger Doppelstockwagen mit 26,8 m Länge und 2,78 m Breite auf die Begrenzungslinie GC übertragen. Dies gilt auch z.B. für den Bereich der Innendecke im Obergeschoß oder die Höhe der Zwischendecke. Für eine reale Anwendung ergeben sich daraus also noch Optimierungspotentiale.

Basierend auf den Betrachtungen im Kapitel 8.2.3 lässt sich statt eines Jakobsdrehgestelles auch ein konventionelles Drehgestell mit den oben genannten Eigenschaften eines Doppelstockwagens kombinieren. Für das Drehgestell ergibt sich bzgl. der Hauptabmessungen ein Grob-Entwurf entsprechend Abb. 8-18 und 8-19:

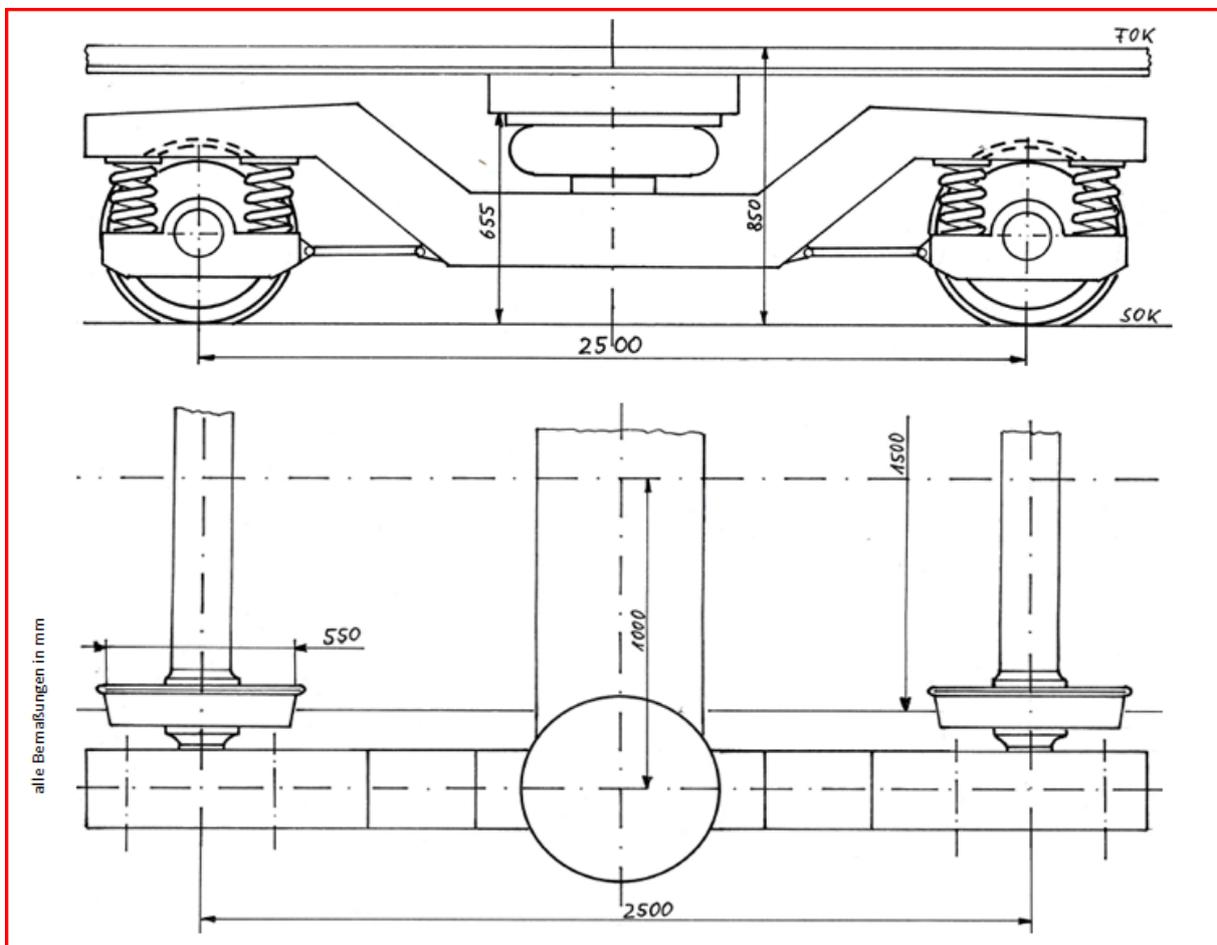


Abb. 8-18: Drehgestell-Grob-Entwurf, grundsätzliche Anordnung ohne Anbauteile (wie z.B. Bremsanlage, Antrieb, Dämpfer, etc.), Seitenansicht und Aufsicht

Abbildung 8-18 verdeutlicht die prinzipielle Machbarkeit eines Drehgestells mit kleinen Rädern (hier 550 mm Neudurchmesser) und Abbildung 8-19 verdeutlicht die untere Drehgestellbegrenzung, welche bei einem Drehgestell mit kleineren Rädern naturgemäß von besonderer Bedeutung ist.

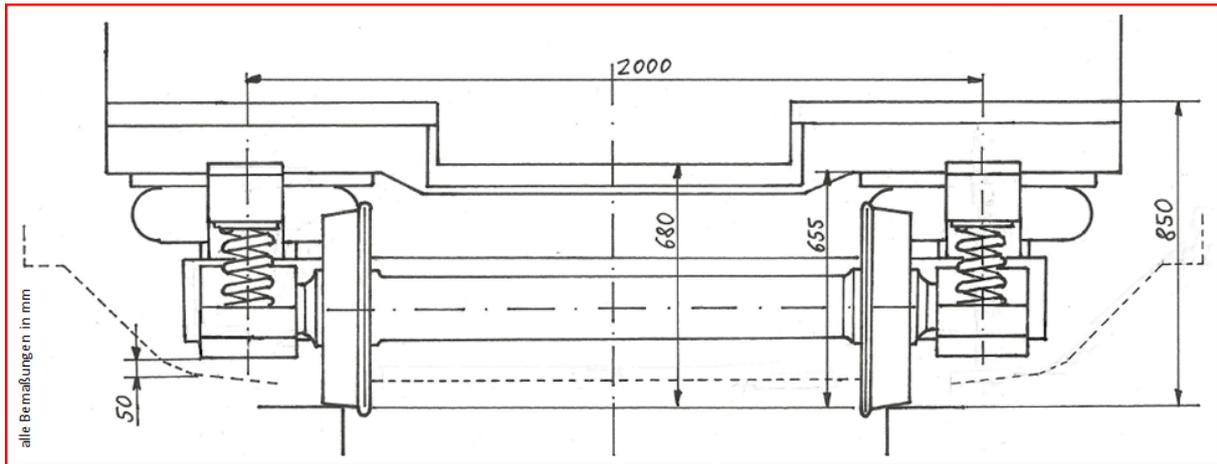


Abb. 8-19: Drehgestell-Grob-Entwurf aus Abb. 8-18 mit vereinfachter Begrenzungslinie entsprechend der unteren Bezugslinie aus der EBO (Anlage 8 zu § 22, Bild 3), Frontansicht

Ohne Zweifel machbar wäre die Ausführung als Laufdrehgestell, wobei der Einbau einer Bremsanlage, sei es mit Rad- oder Wellenbremsscheiben oder Klotzbremsen machbar erscheint. Hingegen ist der Einbau eines geeigneten Antriebes schon schwieriger. Dies betrifft sowohl die Auswahl eines geeigneten Fahrmotors mit geringem Durchmesser als auch die Integration eines Radsatzgetriebes, welches wegen der unteren Begrenzungslinie mehrstufig auszuführen wäre. Hier sind weiterführende Betrachtungen erforderlich. Aus diesem Grund sei auf Abb. 8-20 verwiesen, welche als Variante ein innengelagertes Drehgestell zeigt. Durch die Innenlagerung des Radsatzes im Drehgestellrahmen ergibt sich neben den Rädern der Bauraum für einen außenliegenden Antrieb. Hier wären Radnabenmotoren ebenso so denkbar, wie die Anordnung eines längs liegenden Fahrmotors auf jeder Seite des Drehgestells. Hier würde der Antrieb über Gelenkwellen und Winkelgetriebe, ähnlich der in früheren Zeiten verwendeten Zweiachs-längsantriebe, erfolgen (zu weiteren Untersuchungen siehe auch Kapitel 8.2.5).

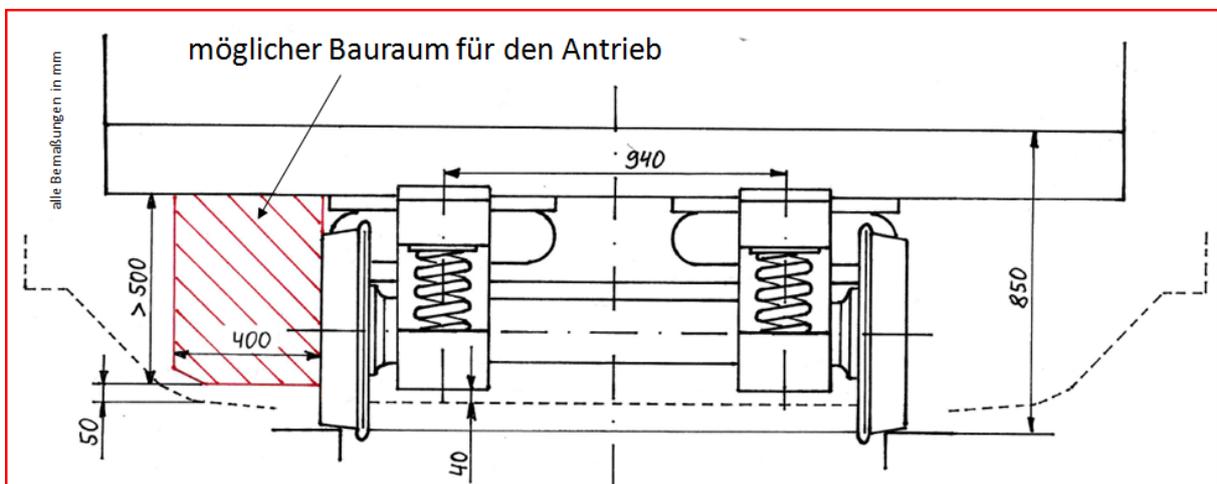


Abb. 8-20: Variante zum Drehgestell-Grob-Entwurf aus Abb. 8-18 mit innengelagerten Radsätzen, vereinfachte Begrenzungslinie entsprechend der unteren Bezugslinie aus der EBO (Anlage 8 zu § 22, Bild 3), Frontansicht

Es ist nicht Anspruch dieser Arbeit, ein komplettes Drehgestell zu konstruieren, daher die Beschränkung auf die oben dargestellten Grob-Entwürfe. Die wesentlichen Abmessungen sind von bereits ausgeführten Drehgestellen abgeleitet, die prinzipielle Machbarkeit lässt sich auf Basis von Analogien somit herleiten.

Die grundsätzlich dabei in einer weiteren Arbeit zu untersuchenden Fragestellung betrifft die Laufstabilität von Drehgestellen mit kleinen Rädern bei Geschwindigkeiten bis 160 km/h oder darüber.

Was bei den nun folgenden Betrachtungen angenommen wird, ist, dass die Radsatzlasten bei kleinen Rädern denen von größeren Rädern nicht nachstehen. Zwar begrenzt die UIC 510-2 heute die Radsatzlasten bei einem Raddurchmesser von 550 mm auf 12 bis 14 t, diese Werte finden sich jedoch weder in den technischen Spezifikationen zur Interoperabilität, noch in den einschlägigen Normen zur Dimensionierung von Rädern und Radsätzen, noch in der EN 15528 mit den Angaben zu den Streckenklassen. In der UIC 510-2 ist außerdem ein Hinweis enthalten, dass die Werte für höherfeste Schienen separat zu vereinbaren sind. Von Bahnen außerhalb Europas sind weiterhin Radsatzlasten bekannt, die deutlich über den hiesigen Werten liegen. Es wird somit für die weiteren Betrachtungen unterstellt, dass Radsatzlasten bei Verwendung von 550 mm großen Rädern bis 20 t technisch möglich sind (siehe dazu auch Kapitel 8.2.6).

Gemäß den Ergebnissen aus Abbildung 8-10 und 8-11 kann entweder ein mittiger Gang in Höhe von 680 mm über SOK mit einer Breite von 960 mm (Abb. 8-21, linke Darstellung) oder ein vollständig ebener Boden auf einer Höhe von 850 mm realisiert werden (Abb. 8-21, rechte Darstellung). Im ersten Fall ergibt sich eine Innenraumhöhe von 1.950 mm im Untergeschoß und von 1.830 mm im Obergeschoß für zwei nahezu konturgleiche Wagenübergänge, beides Maße, die nach TSI PRM für Doppelstockwagen prinzipiell zulässig sind, auch wenn die Höhe von 1.830 mm nicht besonders üppig ist. Wie schon oben beschrieben, ließe sich hier eine weitere Fußbodenabsenkung nur mit Losradsätzen erreichen. Verzichtet man hingegen auf nahezu konturgleiche Wagenübergänge und ordnet stattdessen zwei schmalere Übergänge versetzt zueinander an, erhält man in beiden Fällen eine Innenhöhe von 1.950 mm (siehe Abb. 8-21, rechte Darstellung).

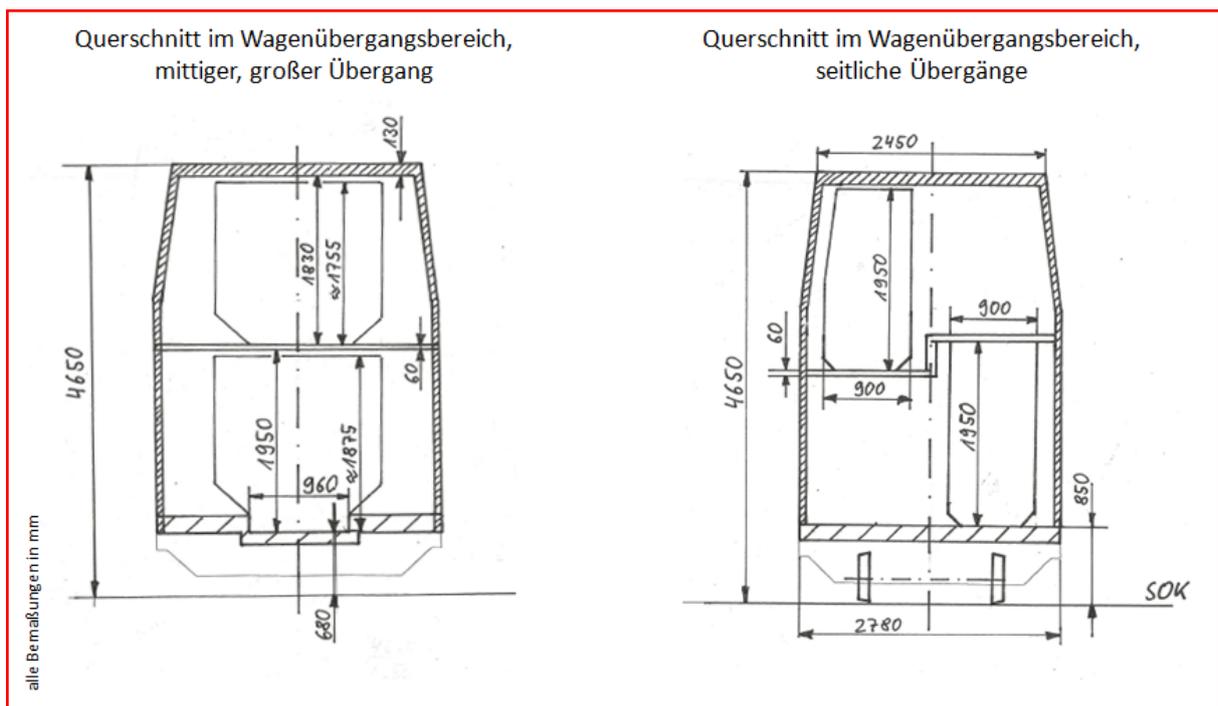


Abb. 8-21: Fahrzeugquerschnitte für Doppelstockwagens bei Ausnutzung der kinematischen Fahrzeugbegrenzungslinie GC nach EN 15273-1 im Bereich des Wagenübergangs

Die Anordnung von Sitzplätzen ist in dem podestartigen Bereich des Obergeschosses möglich und der Höhenunterschied der Gänge zueinander wird dann im Bereich hinter den Drehgestellen durch Stufen oder Rampen ausgeglichen. Ab dem Bereich, in dem im Untergeschoß der Fußboden auf 440 mm über SOK abgesenkt wird, sind dann gleiche Innenraumhöhen wie bei heutigen Doppelstockwagen erreichbar. Hinzu kommt eine verbesserte, räumliche Innenraumanmutung durch den Wegfall der seitlichen Höheneinschränkung über den Sitzen infolge der anderen Fahrzeugbegrenzungslinie. Die Art der Innenraumnutzung über den Drehgestellen ist der Visualisierung von Abb. 8-22 zu entnehmen.

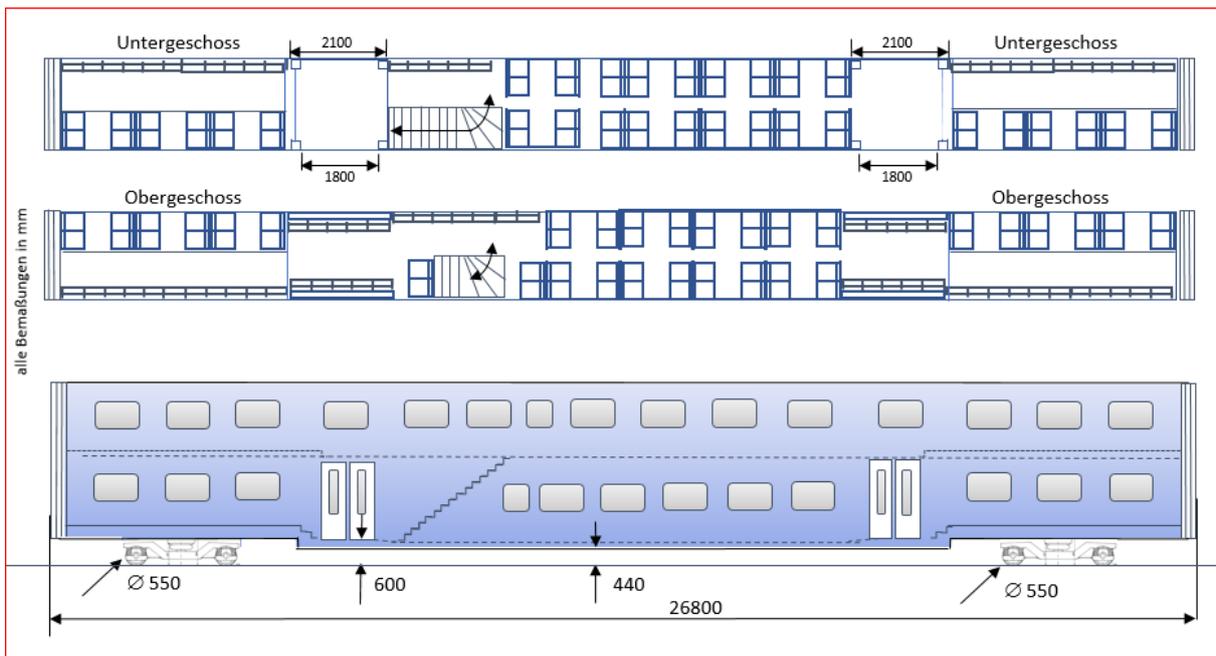


Abb. 8-24: Fahrzeuglayout eines Doppelstockwagens mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung (hier ohne PRM-Bereiche)

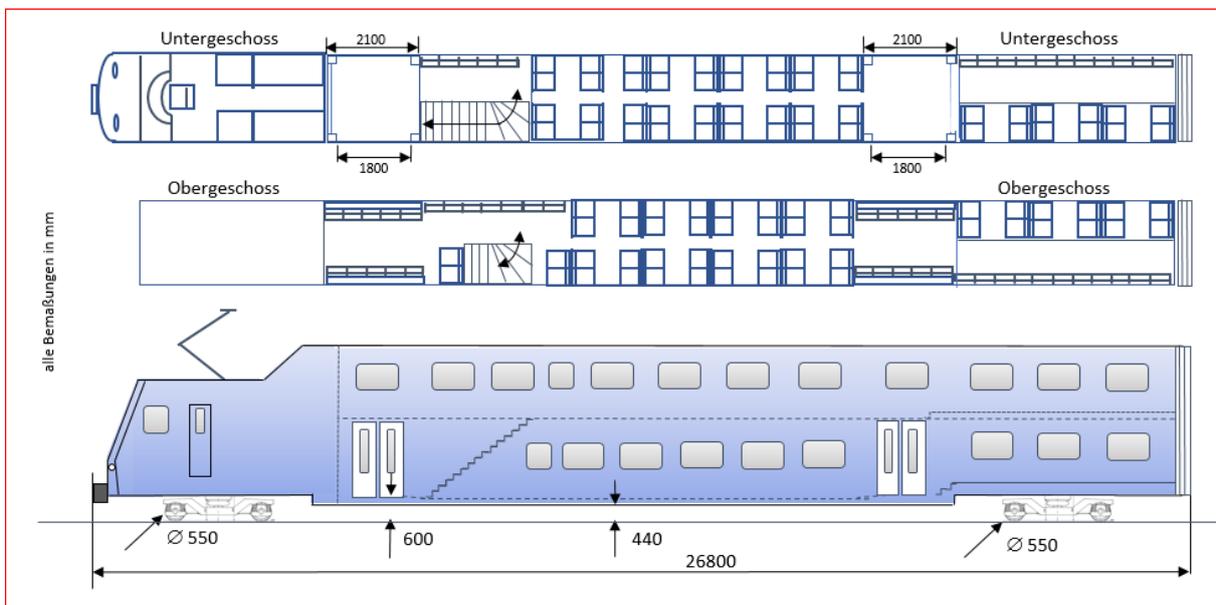


Abb. 8-25: Fahrzeuglayout eines Doppelstock-Endwagens mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung

Was ganz offensichtlich auffällt, ist die vollständige Nutzbarkeit des Innenraumes der Mittelwagen für den Personentransport. Der Bereich im Obergeschoss konventioneller Doppelstockwagen, in dem z.B. die Fahrgastraumklimageräte verbaut sind, kann hier auch nutzbringend verwendet werden. Dennoch ist die Unterbringung der notwendigen technischen Ausrüstung, wie z.B. Hilfsbetriebeumrichter, Batterien, Batterieladegerät oder Klimaanlage möglich, es entfallen dann jedoch wiederum Sitzplätze. Hier bieten sich z. B. die Podestbereiche im Obergeschoss für Technikräume an.

In den Darstellungen von Abb. 8-23 bis 8-25 ist ganz bewusst auf ein zweites Treppenhaus verzichtet worden, denn im Gegensatz zu herkömmlichen Doppelstockwagen gibt es hier durch die Wagenübergänge im Obergeschoß auch im Havariefall Fluchtwege. Aber selbstverständlich ist die konventionelle Anordnung eines zweiten Treppenhauses weiterhin möglich.

Alternativ zu Abb. 8-25 lässt sich solch ein Endwagen auch am Führerraum-Wagenende mit konventionell-großen Rädern ausstatten, um hier analog zu bekannten Bauformen ein Drehgestell mit herkömmlichem Querantrieb, ohne abgesenkten Bodenbereich zu realisieren, da hier ohnehin durch die Anordnung der Maschinenanlage kein Vorteil an zusätzlicher Innenraumfläche entsteht (siehe Abbildung 8-26).

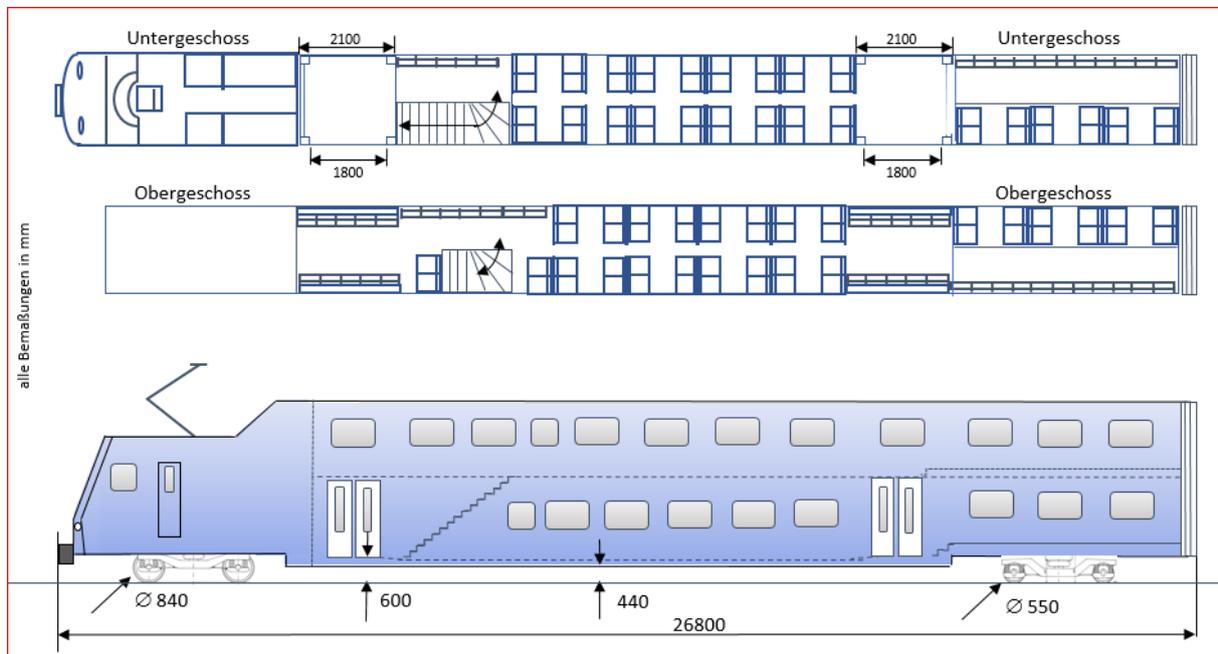


Abb. 8-26: Fahrzeuglayout eines Doppelstock-Endwagens mit großen Rädern unterhalb des Führerraumes und kleinen Rädern sowie außermittiger Übergangsanordnung am hinteren Wagenende

Abbildung 8-27 zeigt nun das Fahrzeuglayout eines vollständigen vierteiligen Doppelstock-Triebzuges unter Verwendung der Ergebnisse, wie sie in den Abbildungen 8-10 sowie 8-21 bis 8-25 für einzelne Details skizziert wurden. Natürlich lassen sich auch andere Konfigurationen ableiten, aber vierteilige Doppelstockzüge sind heute schon üblich und erleichtern somit einen entsprechenden Vergleich der Transportkapazitäten beim gegenwärtigen Stand der Technik. Um Raumvorteile im Bereich der Wagenübergänge für den Fahrgasttransport zu nutzen, wird vorgeschlagen, die Dachstromabnehmer oberhalb der Führerräume anzuordnen. Abbildung 8-28 zeigt möglich Bauräume für die Unterbringung der Antriebs- und Hilfsbetriebeausrüstung.

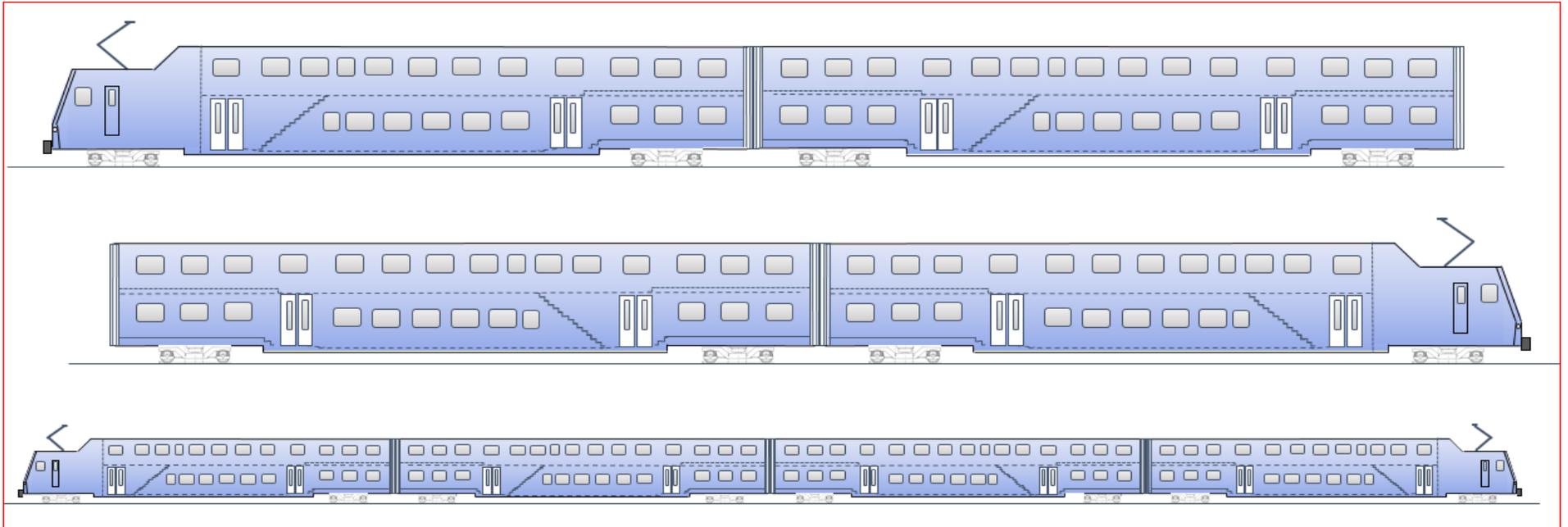


Abb. 8-27: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung

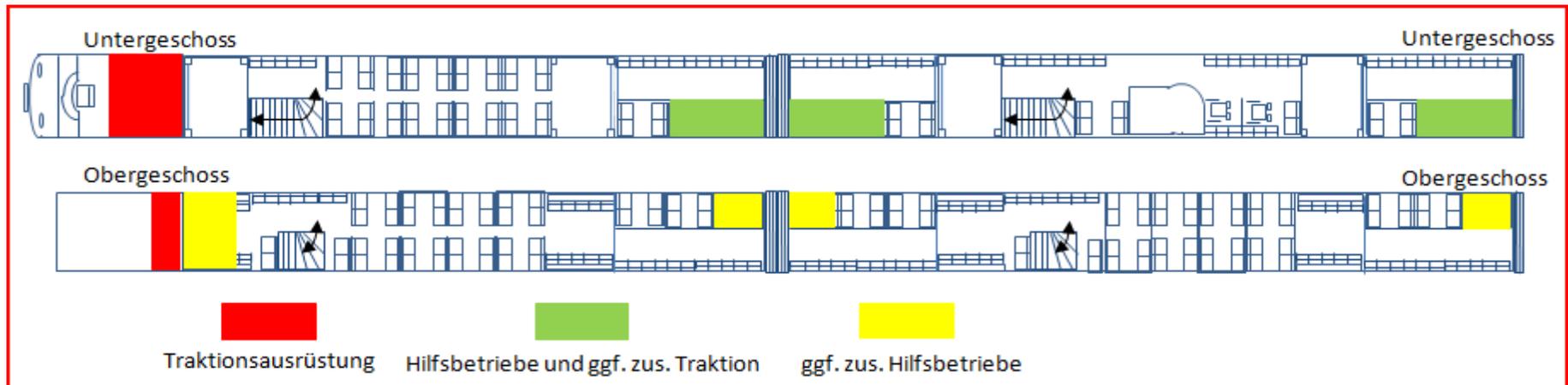


Abb. 8-28: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung

Aus den vorgenannten Abbildungen lassen sich für einen vierteiligen Doppelstocktriebzug folgende Hauptparameter ableiten:

Länge:	107,2 m
Breite:	2,78 m
Höhe:	4,65 m
Fahrzeugbegrenzungslinie:	GC
Türabmessungen:	1800 mm lichte Weite, 2000 mm lichte Höhe
Einstiegshöhe:	600 mm über SOK
Achsanordnung:	Bo`2` + 2`2` + 2`2` + 2`Bo`
max. Sitzplatzkapazität:	Endwagen: 92 feste und 54 Klappsitze
	PRM-Mittelwagen 90 feste und 94 Klappsitze sowie 2 Rollstühle
	Mittelwagen 120 feste und 76 Klappsitze
	Gesamtkapazität: 394 feste und 278 Klappsitze sowie 2 Rollstühle (672 Sitzplätze sowie 2 Rollstühle)

Zieht man bei den Sitzplätzen die in Abb. 8-28 farblich markierten Bereiche ab, so reduziert sich die Sitzplatzkapazität um 72 feste und 16 Klappsitze auf 322 feste und 262 Klappsitze (in Summe auf 584 Sitzplätze).

Unter Verwendung des Faktors von 2,1 t/m für Doppelstocktriebzüge (siehe Kapitel 6.4) ergibt sich eine Dienstmasse von rund 225 t. Hierin ist die Masseverringerung durch die reduzierte Radgröße nicht enthalten. Diese lässt sich mit ca. 780 kg für den gesamten vierteiligen Triebzug abschätzen, wenn man das 840 mm große Rad als Ausgangslage betrachtet.

Diese reinen Zahlen sagen zunächst wenig aus, ob dieses Fahrzeugkonzept mit kleinen Rädern gegenüber konventionellen Fahrzeugen Vorteile bietet. Daher erfolgt nun ein Vergleich mit einem real ausgeführten Fahrzeug, konkret mit dem Doppelstocktriebzug KISS in der Ausführung für die Bahngesellschaft ODEG. Dieses Fahrzeug besitzt nach [67] ein Innenraumlayout für 420 Sitzplätze.

Abb. 8-30 zeigt den vergleichbaren Doppelstocktriebzug mit kleinen Rädern, wobei die Ausstattung bzgl. WC-Anzahl, WC-Typen und Fahrradtransportmöglichkeiten zur besseren Vergleichbarkeit dem ODEG-Zug nach [67] entspricht. Die ODEG-Variante besitzt nur zwei angetriebene Drehgestelle und Türen mit 1300 mm lichter Durchgangsweite. Die Länge des Triebzuges liegt bei 105,2 m bei einer Dienstmasse von 205,8 t. Abb. 8-31 zeigt dazu eine weitere Variante mit anderer Bestuhlung.

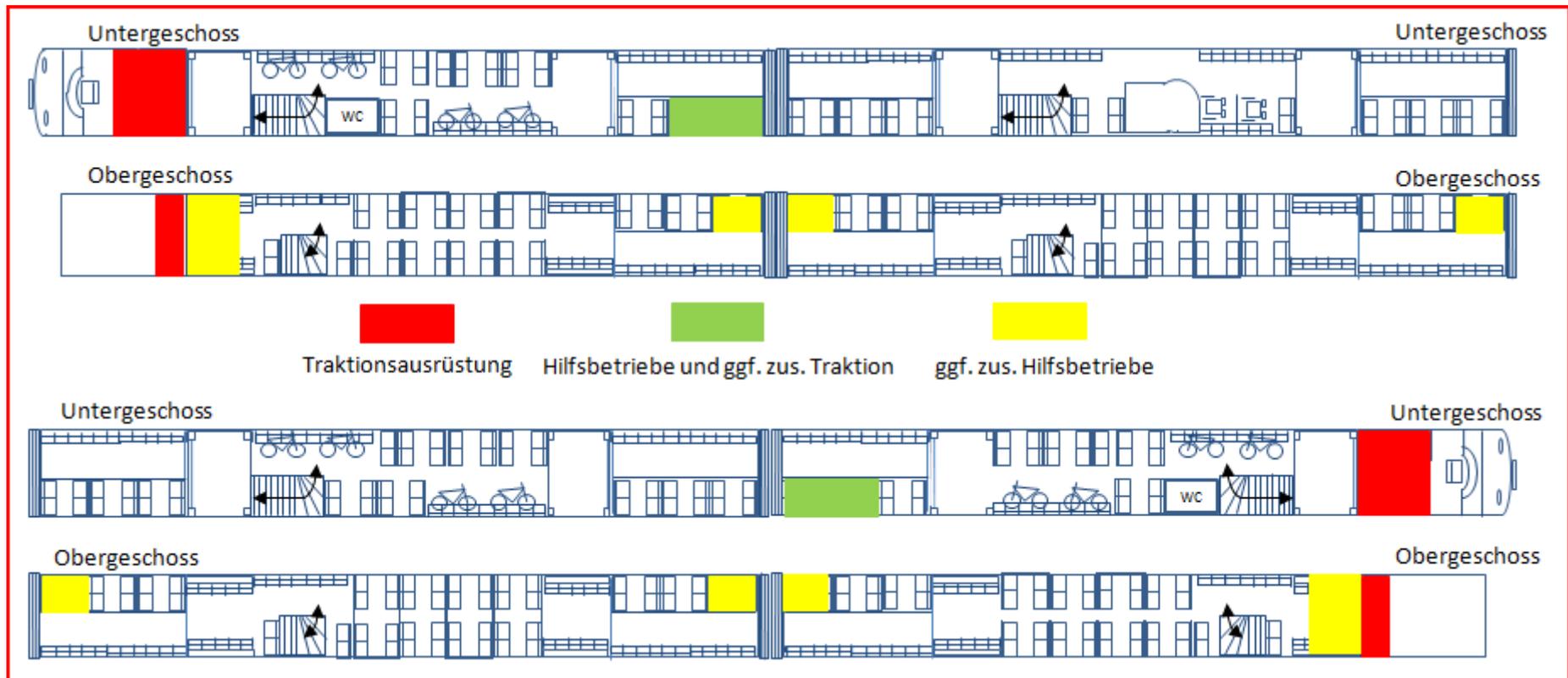


Abb. 8-30: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern, außermittiger Übergangsanordnung und Ausstattung analog KISS für die ODEG



Abb. 8-31: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern, außermittiger Übergangsanordnung und Ausstattung analog KISS für die ODEG, jedoch mit weniger Klappsitzen

Auf Basis der in den Abbildungen 8-30 und 8-31 dargestellten Fahrzeuglayouts ergeben sich folgende Sitzplatzkapazitäten (Tabelle 8-5 bis 8-7):

	EW 1	MW 1	MW 2	EW 2	Gesamt
Feste Sitze UG	24	52	32	24	132
Feste Sitze OG	36	56	56	52	200
Klappsitze UG	22	20	24	22	88
Klappsitze OG	0	0	0	0	0
Summe feste Sitze	60	108	88	76	332
Summe Klappsitze	22	20	24	22	88
Gesamtsumme Sitzplätze					420

Tab. 8-5: Sitzplatzkapazität für das KISS-Fahrzeug der ODEG nach [67]

	EW 1	MW 1	MW 2	EW 2	Gesamt
Feste Sitze UG	22	30	46	22	120
Feste Sitze OG	44	52	50	44	190
Klappsitze UG	29	44	40	29	142
Klappsitze OG	30	50	50	30	160
Summe feste Sitze	66	72	96	66	300
Summe Klappsitze	59	94	90	59	243
Gesamtsumme Sitzplätze					543

Tab. 8-6: Sitzplatzkapazität gem. Abb. 8-30

	EW 1	MW 1	MW 2	EW 2	Gesamt
Feste Sitze UG	26	42	54	26	148
Feste Sitze OG	59	76	76	59	270
Klappsitze UG	21	20	24	21	86
Klappsitze OG	10	13	13	10	46
Summe feste Sitze	85	118	130	85	418
Summe Klappsitze	31	33	37	31	132
Gesamtsumme Sitzplätze					550

Tab. 8-7: Sitzplatzkapazität gem. Abb. 8-31

Damit ergibt sich für das Fahrzeugkonzept mit kleinen Rädern, je nach Bestuhlungsvariante, bei nahezu identischer Gesamtlänge ein Kapazitätsvorteil bei den Gesamtplätzen von bis zu 23 % gegenüber dem Vergleichsfahrzeug KISS aus Abb. 8-29.

Bei Anwendung der Gleichung 3 ergibt sich eine Effizienz von $E = 4,77$ für das Fahrzeuglayout nach Abb. 8-30 und von $4,8$ für das Layout nach Abb. 8-31, wohingegen das KISS-Fahrzeug nach Abb. 8-29 aufgrund der geringeren Anzahl von Sitzplätzen eine Effizienz $E = 5,59$ aufweist.

8.2.5 Antrieb für einen Triebzug mit kleinen Rädern

Nach dem Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit eines Triebzuges mit kleinen Rädern und der Darstellung der damit verbundenen konzeptionellen Vorteile stellt sich nun die Frage, wie solch ein Fahrzeug angetrieben werden kann. Ohne Zweifel ist die Integration eines Antriebes durch den nun in der Höhe deutlich reduzierten Bauraum - neben den Fragen der Lauftechnik - besonders wichtig, um die vollständige Machbarkeit nachweisen zu können.

Für den Antrieb kommen dabei die folgenden Möglichkeiten in Betracht:

1. Ausschließliche Verwendung als Wagenzug, d.h. der Antrieb erfolgt über eine konventionelle Lokomotive
2. Antrieb ausschließlich über die Enddrehgestelle des Triebzuges, siehe Abb. 8-26, wobei diese Enddrehgestelle mit Rädern herkömmlicher Größe ausgestattet sind
3. Verwendung eines Antriebes, der zum Fahrzeugkonzept mit kleinen Rädern passt.

Die Machbarkeit der unter 1 und 2 genannten Möglichkeiten liegt auf der Hand und soll hier nicht weiter betrachtet werden. Untersucht wird somit nachfolgend die Variante 3.

Gemäß Abbildung 8-32 sind verschiedenste Antriebsformen denkbar, man erkennt aber sowohl die Unterschiede im Bauraumbedarf als auch in der Komplexität.

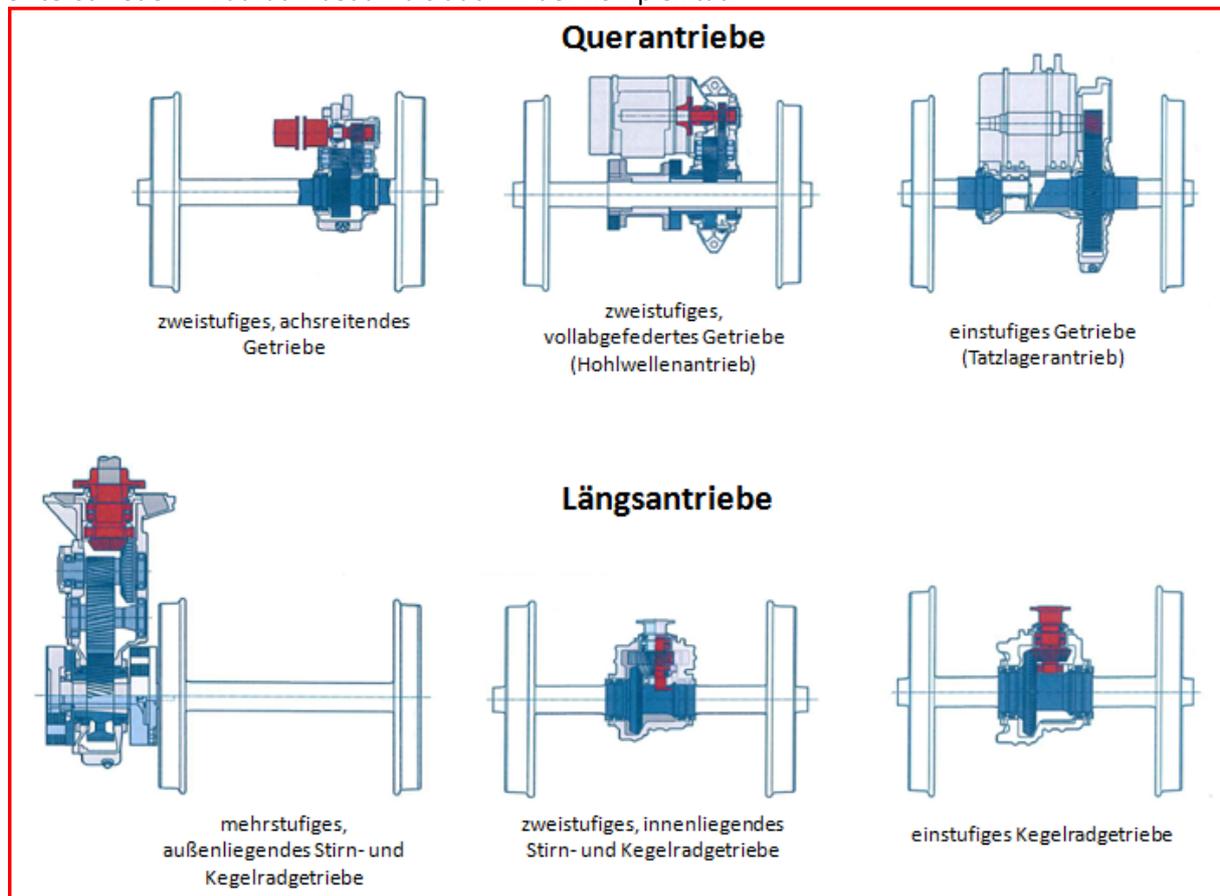


Abb. 8-32: Darstellung verschiedener Formen von Radsatzgetrieben (Quelle der Illustrationen: Fa. Voith GmbH, [91])

Bedingt durch den kleinen Raddurchmesser von 550 mm entfallen die Antriebe mit Quermotor, es verbleiben die Varianten mit Längsantrieb. Weiterverfolgt wird daher die einfachste Form des Längsantriebes, nämlich das einstufige Kegelradgetriebe. Dabei erfolgt die Kraftübertragung durch einen wagenkastenseitig aufgehängten Elektromotor, eine Gelenkwelle und das genannte Kegelradgetriebe. Solch eine Ausführung ist z.B. auch für den Triebzug VT 610 in [92] und [93] beschrieben.

Die weiteren Untersuchungen erfolgen, entsprechend der frühen Phase für solch eine Betrachtung, auf Basis von ausgeführten Fahrzeugen und stellen somit eine Analogiebetrachtung dar. Basis ist dabei eine Antriebsausrüstung für einen doppelstöckigen Triebwagen, wie sie unter [8] beschrieben ist. Ein Triebwagen hat dabei vier Drehstromfahrmotoren mit einer Gesamtleistung (Dauerleistung) von 2.300 kW und einer Zugkraft von 181 kN, für einen vierteiligen Triebzug mit zwei angetriebenen Wagen ergibt sich somit eine Zugkraft von 362 kN.

Aufgrund der kleinen Räder lassen sich herkömmliche Antriebe mit Quermotor und Stirnradgetriebe im Drehgestell räumlich nicht darstellen. Weiterhin ergeben die kleinen Räder, bei gleicher angestrebter Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 160 km/h, eine deutliche höhere Anzahl der Radumdrehungen für die gleiche Strecke, was ebenfalls bei der Getriebewahl zu berücksichtigen ist. Abb. 8-34 zeigt einen schematischen Entwurf für die Getriebeanordnung eines Fahrzeuges mit kleinen Rädern. Als Grundlage der Betrachtungen für die Kegelradstufe wurde das Achswendegetriebe Ecolife der ZF Friedrichshafen AG herangezogen.

Die Untersuchung zu Abb. 8-34 basiert auf der Tatsache, dass auch ein herkömmliches Kegelradgetriebe mit dem Großrad auf der Radsatzwelle einen zu großen Bauraumbedarf zum Gleiskörper besitzt. Um einen ausreichenden Platz zu schaffen, wird daher eine zweistufige Kombination aus drei schrägverzahnten Stirnrädern vorgesehen, um den Bauraum für ein Kegelradgetriebe zu ermöglichen. In der hier gewählten Ausführung besitzen aus Gründen der Vereinfachung alle drei Stirnräder den gleichen Durchmesser und damit auch die gleiche Zähnezahl. In der realen Anwendung würde man hier natürlich eine geringe Übersetzung mit unterschiedlichen Zähnezahlen wählen, um Verschleiß und Geräusche zu reduzieren.

Das Ecolife-Getriebe besitzt eine Übersetzung in der Kegelradstufe von $i = 3,093$. Bei Betrachtung des Zustandes von vollständig abgenutzten Rädern (Durchmesser 480 statt 550 mm im Neuzustand) ergibt sich ein Radumfang von 1.510 mm. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 160 km/h ergibt sich damit eine Raddrehzahl von 1765 min^{-1} . Mit der oben genannten Getriebeübersetzung hat der Fahrmotor dann eine Drehzahl von rund 5.400 min^{-1} , was im normalen Bereich liegt (die Maximaldrehzahl eines Fahrmotors liegt im Bereich von über 6.000 min^{-1}).

Damit ist die gemäß Abbildung 8-34 gewählte Anordnung grundsätzlich für den Antrieb in Fahrwerken mit kleinen Rädern geeignet, vorbehaltlich einer exakten, anwendungsbezogenen Auslegung.

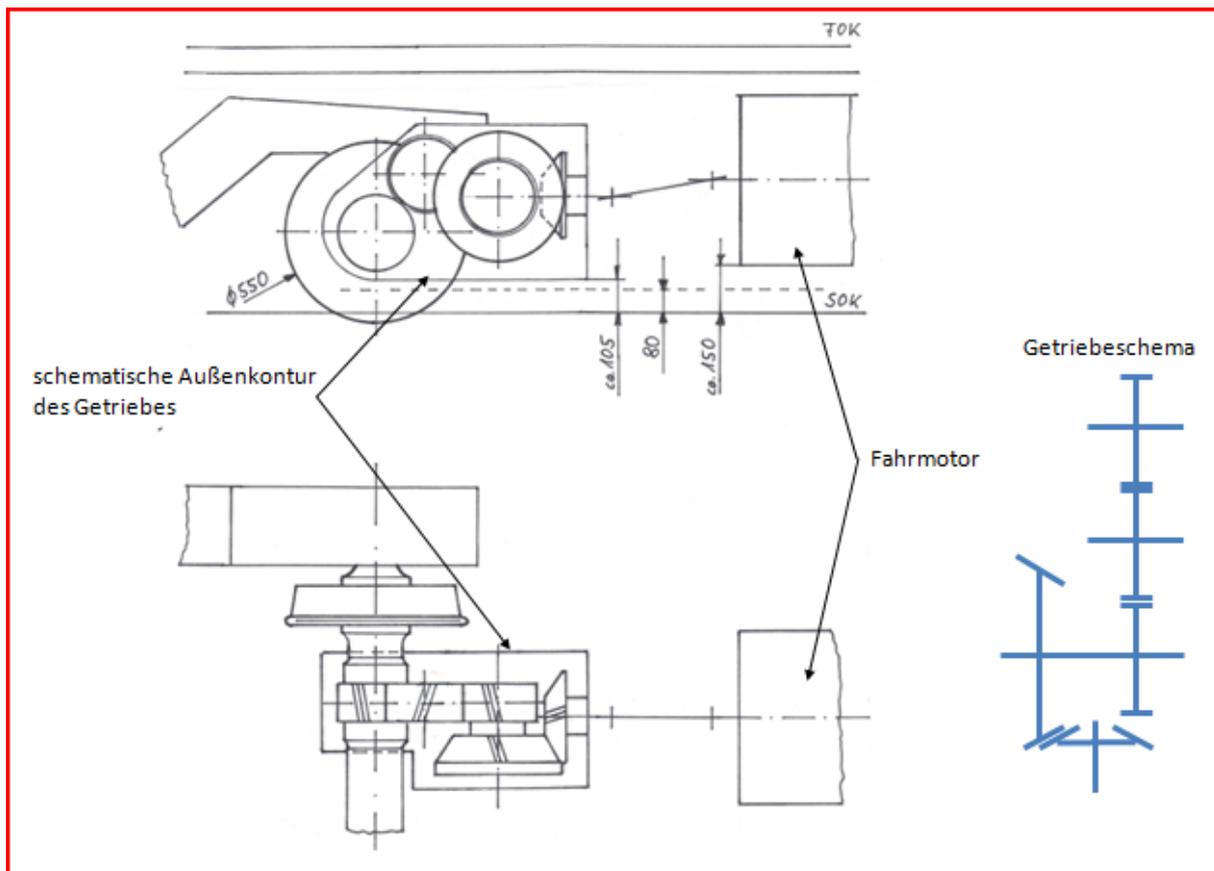


Abb. 8-34: schematische Darstellung eines Achsantriebes, basierend auf Abb. 8-18 für ein Drehgestell

Einschränkend ist jedoch zu erwähnen, dass das Getriebegehäuse im Bereich des Radsatzes den Radverschleiß begrenzt. Für das Rad wäre ein Verschleiß von 550 mm auf 480 mm im Durchmesser (also 35 mm im Radius) normativ zulässig. Entsprechend der Betrachtung zu Abb. 8-34 stehen aber von der Unterkante des Getriebegehäuses bis zur Oberkante der unteren Fahrzeugbegrenzung nur 25 mm zur Verfügung. Der volle Radverschleiß ist demnach also nur bei getriebelosen Laufdrehgestellen möglich, nicht aber in der Ausführung als Triebdrehgestell. Der am Wagenboden fest eingebaute Fahrmotor stellt hier hingegen keine Begrenzung dar.

8.2.6 Betrachtungen zu den Radaufstandskräften

Neben den oben dargestellten Einschränkungen, die beim Einsatz kleiner Räder bzgl. der Antriebstechnik hinzunehmen sind, stellt sich die Frage nach der Wechselwirkung zwischen Rad und Schiene als Folge des reduzierten Raddurchmessers.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Standzeit der Räder infolge von Verschleiß durch die höheren Raddrehzahlen und die damit verbundene höhere Anzahl der Überrollungen der Radlauffläche zunehmen werden. Ein weiterer Aspekt betrifft die Kontaktkräfte zwischen Rad und Schiene. Es ist bekannt, dass sich am Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene eine ellipsenförmige Fläche ausbildet. Die Fläche dieser Ellipse ist abhängig von den Radlasten und dem Radius des Rades. Basierend auf den Formelzusammenhängen nach [96] und [98] lässt sich dazu nachfolgende vergleichende Betrachtung anstellen.

Verglichen werden eine Lokomotive der Baureihe 187 nach [97], eine Lokomotive der Baureihe IORE für die schwedische Bahngesellschaft LKAB [102] und die Variante eines vierteiligen Doppelstocktriebzuges mit kleinen Rädern entsprechend Abb. 8-31 in den folgenden Tabellen 8-8 und 8-9:

Eingangsparameter	Lokomotive BR187	Lokomotive IORE	Do-Triebzug
Maximale Radsatzlast	21,75 t	30 t	20 t
Verwendete Radkraft Q	107 kN	147,1 kN	98,1 kN
Raddurchmesser (neu) d	1250 mm	1250 mm	550 mm
$R_{x1} = d/2$	625 mm	625 mm	275 mm
Krümmungsradius des Rades [96] $R = R_{y1}$	360 mm		
Krümmungsradius der Schiene [96] $R' = R_{y2}$	290 mm		
Elastizitätskonstante [96] E	$2,06 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$		
Querdehnungszahl ν	0,25		
Gleitmodul $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	$8,24 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$		

Tab. 8-8: Eingangsparameter zum Vergleich der maximalen Flächenpressung am Radaufstandspunkt

Ermittelte Werte	Lokomotive BR 187	Lokomotive IORE	Do-Triebzug
Verhältnis R_b / R_a	0,42		0,185
Exzentrizität e^2	0,65		0,90
Faktor α_a	0,815		0,921
a-Wert der Ellipse	11,8 mm	13,5 mm	13,3 mm
b-Wert der Ellipse	8,97 mm	10,2 mm	5,8 mm
Fläche der Ellipse A_E	$332,5 \text{ mm}^2$	$432,6 \text{ mm}^2$	$242,4 \text{ mm}^2$
Normalspannung σ_x	$-345,6 \text{ N/mm}^2$	$-400,3 \text{ N/mm}^2$	$-395,8 \text{ N/mm}^2$
Normalspannung σ_y	$-378,5 \text{ N/mm}^2$	$-364,6 \text{ N/mm}^2$	-515 N/mm^2
Normalspannung σ_z	$-482,7 \text{ N/mm}^2$	$-510,0 \text{ N/mm}^2$	$-607,2 \text{ N/mm}^2$
Tangentialspannung τ	$144,81 \text{ N/mm}^2$	153 N/mm^2	$182,2 \text{ N/mm}^2$
Van Mises Vergleichsspannung σ_V	$279,8 \text{ N/mm}^2$	$295,8 \text{ N/mm}^2$	365 N/mm^2

Tab. 8-9: Ermittelte Werte zum Vergleich der maximalen Spannungen

Die vollständige Herleitung des Berechnungsweges für die Ergebnisse in Tabelle 8-9 ist der Anlage 13.4 zu entnehmen.

Damit ergibt sich bei der Fahrzeugvariante mit kleinen Rädern von 550 mm Durchmesser eine um rund 23 % höhere Vergleichsspannung als bei einer Lokomotive BR 187 und eine rund 19 % höhere Vergleichsspannung als bei einer IORE-Lokomotive.

Nach EN 13262 liegen zulässige Spannungen im Bereich der Radaufstandsfläche bei konservativer Betrachtung und je nach Güte des verwendeten Radmaterials, zwischen 500 N/mm^2 und 580 N/mm^2 . Die ermittelten Spannungen liegen damit, obwohl sie höher als bei größeren Rädern bei gleichzeitig größeren Radaufstandskräften sind, im normativ zulässigen Bereich.

8.3 Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken

8.3.1 Einleitende Betrachtungen

Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken bieten durch konzeptionellen Leichtbau ein erhebliches Potential, werden in der Praxis aber kaum angewendet. Von verschiedenen Herstellern wurden verschiedene Prototypen (siehe [83] und [84]) gebaut, die letztlich alle auf die Studie [85] zurückgehen.

Wie schon unter Kapitel 8.1 ausgeführt, werden Einachsfahrwerke im Vollbahnbereich aber gegenwärtig nur bei der S-Bahn Kopenhagen, bei den Integral-Verbrennungstriebwagen und bei zweiachsigen Güterwagen verwendet. Der Vollständigkeit halber sind hier auch die Leichttriebwagen wie der Regio-Sprinter der Duewag oder verschiedene Schienenbusse der DWA zu erwähnen, hierbei handelt es sich aber nicht um Vollbahnfahrzeuge.

Ein deutlich breiteres Anwendungsspektrum findet sich im Straßenbahnbereich, wobei hier Einachsfahrwerke mit konventionellen Radsätzen ebenso Verwendung finden wie Losradpaare, jeweils als Laufradsätze oder angetriebene Radsätze ausgeführt, siehe dazu insbesondere [31] und [86]. Die folgende Tabelle 8-8 zeigt die wesentlichen Vor- und Nachteile von Einachsfahrwerken:

Vorteile	Nachteile
Deutlich leichtere Fahrwerke durch Entfall der Rahmenkonstruktion gegenüber mehrachsigen Fahrwerken	Verkürzung der Wagenkästen aufgrund von Auflasten und Einschränkung erforderlich; damit steigen grundsätzlich die Herstellungskosten
Durch die Verkürzung der Wagenkästen können diese breiter ausgeführt werden, so dass eine 2-plus-3-Bestuhlung ohne Komfortreduzierung ermöglicht wird.	Stöße aus dem Fahrweg können nicht innerhalb des Drehgestells abgemildert werden; gleicher Fahrkomfort muss technisch aufwändiger sichergestellt werden
Aufgrund der kürzeren Wagenlänge lassen sich spezifische gewünschte Fahrzeuglängen einfacher projektieren	Die Laufstabilität bei Losradpaaren ist regelungstechnisch sicherzustellen. Die Eigenzentrierung des Radsatzes im Gleis entfällt hier.
	Tendenziell höhere Spurführungskräfte bei höherem Radverschleiß durch den längeren Radsatzabstand

Tab. 8-8: Wesentliche Vor- und Nachteile von Einachsfahrwerken

Die wesentlichen Nachteile eines Fahrzeuges mit Einachsfahrwerken betreffen demnach den Lauf des Fahrzeuges im Gleis, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten. Dies ist gleichzeitig ein Grund für die Verbreitung von Einachsfahrwerken bei Straßenbahnen, da hier das Komfortproblem durch die deutlich geringeren Geschwindigkeiten weniger ausgeprägt ist.

Abbildung 8-35 zeigt beispielhaft einen End- und einen Mittelwagen aus [85], welche so jedoch nie gebaut wurden, Abb. 8-36 zeigt das LIREX-Experimentalfahrzeug, welches als Prototyp umgesetzt wurde und bezüglich der Fahrwerke auf der S-Bahn Kopenhagen basiert. Tabelle 8-9 vergleicht wesentliche Fahrzeugkennwerte dieser drei Fahrzeuge.

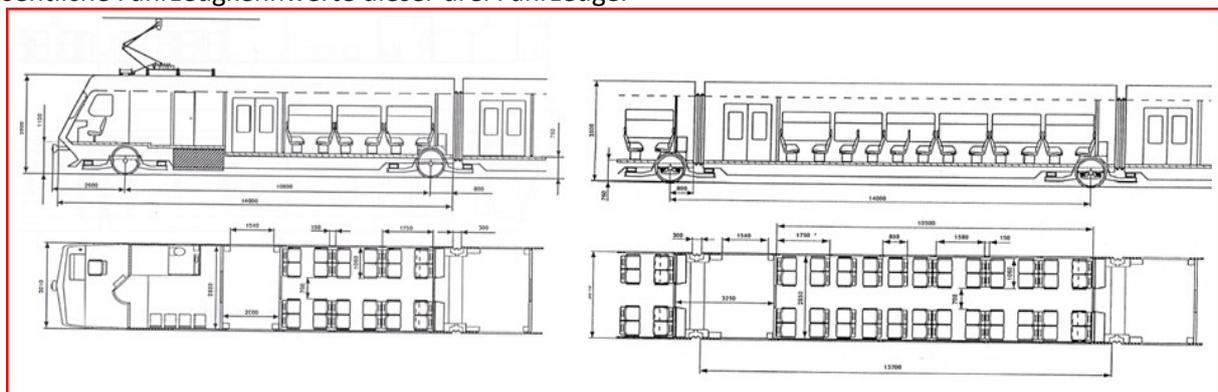


Abb. 8-35: Darstellung von zwei Fahrzeugvarianten der Regionalschnellbahn 2000 aus [85]

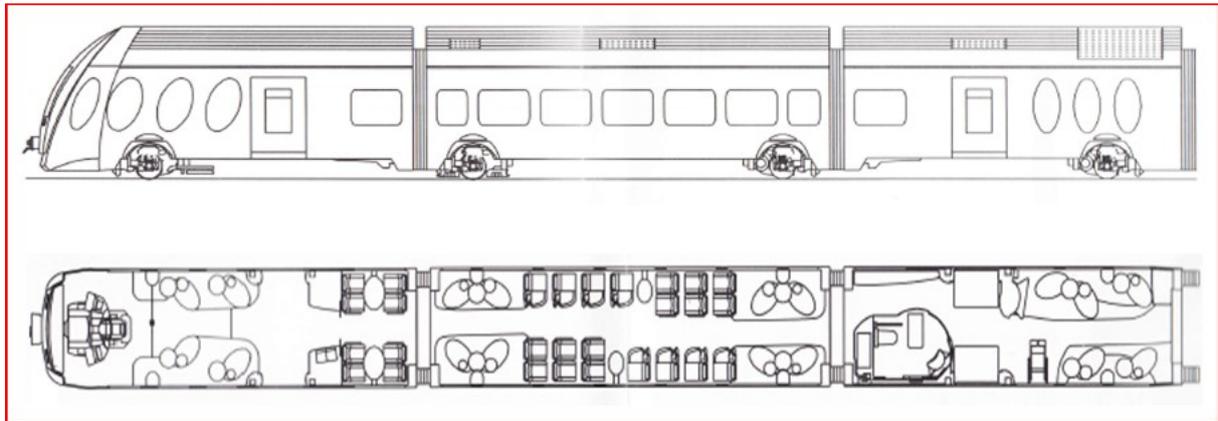


Abb. 8-36: Darstellung des LIREX- Halbzuges der Fa. Alstom, Quelle: Firmenprospekt Alstom [87]

	RSB 2000 nach [85]		LIREX Experimental nach [83], [87], [88]	S-Bahn Kopenhagen nach [14], [34]
	Typ 1	Typ 2		
Länge über Kuppung in mm	99.700	57.700	68.490	83.760
Radsatzfolge	A´A´A´A´A´A´A´	A´A´A´A´A´	A´1´A´A´ + A´A´1´A´	A´A´A´1´A´+A´1´A´A´A´
Dienstmasse in t	102,9	62,8	137	122
Breite in mm	3.010		3.042	3.600
Höhe in mm	3.500 zzgl. Dachausrüstung		4.500	4.320
Länge Endwagen in mm	14.150 / 15.650		11.495	12.165
Länge Mittelwagen in mm	14.000		12.200 10.550	9.850
Spannungsversorgung	AC 15 kV, 16,7 Hz		Dieselelektrisch	DC 1.650 V
Fußbodenhöhe in mm	760		790	1.100
Höhe im Einstieg in mm	760		550 - 760	1.100
Lichte Türweite in mm	1.540		1300	1.600
Türspuren	14	8	8	24
Höchstgeschwindigkeit in km/h	160		160 (200)	120
Sitzplätze	272	134	bis 230	336

Tab. 8-9: Vergleich wesentlicher Kenndaten für Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken

Basierend auf den Angaben nach Tabelle 8-9 ergeben sich die bezogenen Kennwerte gemäß Tabelle 8-10.

	RSB 2000		LIREX Experimental	S-Bahn Kopenhagen
	Typ 1	Typ 2		
Masse / Sitzplatz in t/Sitzplatz	0,38	0,47	0,60	0,36
Masse / Meter in t/m	1,03	1,09	2,0	1,46
Sitzplätze / Türspur	19,4	16,8	Aufgrund der experimentellen Sitzanordnung erfolgt hier keine Bewertung	14
Effizienz E	3,73	3,71		3,58

Tab. 8-10: Bezogene Kenndaten für die Fahrzeuge aus Tabelle 8-9

Entsprechend Tabelle 8-10 ergeben sich für die verschiedenen Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken relativ geringe (d.h. gute) Effizienzwerte. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die RSB 2000 nie gebaut wurde und insbesondere die Masseangaben im Vergleich zu den beiden ausgeführten Fahrzeugen recht optimistisch erscheinen. Weiterhin ist zu beachten, dass auch die beiden ausgeführten Fahrzeuge aufgrund der heutigen Normenlage tendenziell schwerer werden würden.

8.3.2 Variantenuntersuchungen

Basierend auf den guten Effizienzwerten wird nachfolgend mit den Innenraum-Bausteinen aus Kapitel 7 untersucht, welche Fahrzeugkonfigurationen mit Einachsfahrwerken darstellbar wären. Aufgrund der besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse werden dabei die wesentlichen Hauptabmessungen des LIREX-Experimentalfahrzeugs als Grundlage herangezogen.

Für die Breite gilt in erster Näherung ein Wert von 3.000 mm. Für die Abschätzung der Masse wird der Wert von 1,76 t/m aus Kapitel 7.4 verwendet, obwohl dieser Wert niedriger ist als der Wert von 2,0 t/m für das Experimentalfahrzeug. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass das Experimentalfahrzeug als Prototyp nicht für eine industrielle Fertigung optimiert wurde und gleichzeitig mit dem Schwungmassenspeicher eine ungewöhnliche Zusatzausstattung besaß.

Weiterhin wird unterstellt, dass analog der S-Bahn Kopenhagen die Einachsfahrwerke maximal 840 mm große Räder besitzen und jeweils über den Rädern Podeste oder Radkästen angeordnet sind. In Verbindung mit einem nur gering geneigten Fußboden sind damit niveaugleiche Einstiege nur am 760 mm hohen Bahnsteig möglich.

Damit werden folgende Fahrzeugvarianten (Tab. 8-11) untersucht:

Variante	Merkmale	Türspuren pro Wagenseite
1	Sechsteiliges Fahrzeug, zwei Endwagen und zwei Mittelwagen mit je einem Fahrwerk und zwei Mittelwagen mit jeweils zwei Fahrwerken	6 Türen à 2 Türspuren, insgesamt 12 Türspuren
2	Dreiteiliges Fahrzeug, zwei unterschiedlich lange Endwagen mit je einem Fahrwerk sowie ein Mittelwagen mit zwei Fahrwerken	3 Türen à 2 Türspuren, insgesamt 6 Türspuren

Tab. 8-11: Untersuchte Varianten für Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken

Tabelle 8-12 sind die Ergebnisse der Betrachtung zu entnehmen.

Nicht betrachtet wurde ein Fahrzeug bestehend aus mehreren Einzelwagen mit jeweils zwei Einachsfahrwerken, da dies, bezogen auf die Gesamtanzahl der Achsen, im Prinzip nur eine Untervariante eines Drehgestellfahrzeuges darstellt.

Baustein	Führer- raum	Einstieg 1 a	Einstieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Übergangs- hälfte kurz	Übergangs- hälfte lang	Wagen- übergang							
Visualisierung																
Lfd.-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	ohne*							
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	400							
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0							
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0							
Variante 1	Zwei lange Einzel-Wagen mit vier Drehgestellen, acht Radsätzen, vier großen Einstiegen									Ermittelte Werte		A	B	C	E	
Anzahl	2	6	0	16	4	1	0	4	2	Leermasse	122 t	1,23	1,76	1,66	4,64	
Bausteinlänge in mm	8000	10800	0	28800	3600	8500	0	8800	800	Länge	69,3 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	128	16	23	0	32	0	Sitzplätze	199					
Türspuren	0	12	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	14100	0	17600	2200	7890	0	4880	400	Gesamt- masse	169,2 t					
*) Sondervariante zu 8, ohne Sitzgruppe											Durchschn. Radsatzlast	21,1 t				
Variante 2	Zwei lange Einzel-Wagen mit vier Drehgestellen, acht Radsätzen, vier kleinen Einstiegen															
Anzahl	2	3	0	6	1	1**	0	2	0	Leermasse	63,7 t	1,50	1,76	1,42	4,68	
Bausteinlänge in mm	8000	5400	0	10800	900	6700	0	4400	0	Länge	36,2 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	48	4	17	0	16	0	Sitzplätze	85					
Türspuren	0	6	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	6					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	7050	0	6600	550	7390	0	2440	0	Gesamt- masse	87,9 t					
**) PRM-Bereich reduziert um eine Sitzgruppe											Durchschn. Radsatzlast	22 t				

Tab. 8-12: Vergleich verschiedener Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug mit Einachsfahrwerken

Die Abbildungen 8-37 und 8-38 zeigen die Visualisierung der Ergebnisse der Untersuchung gemäß Tabelle 8-12.

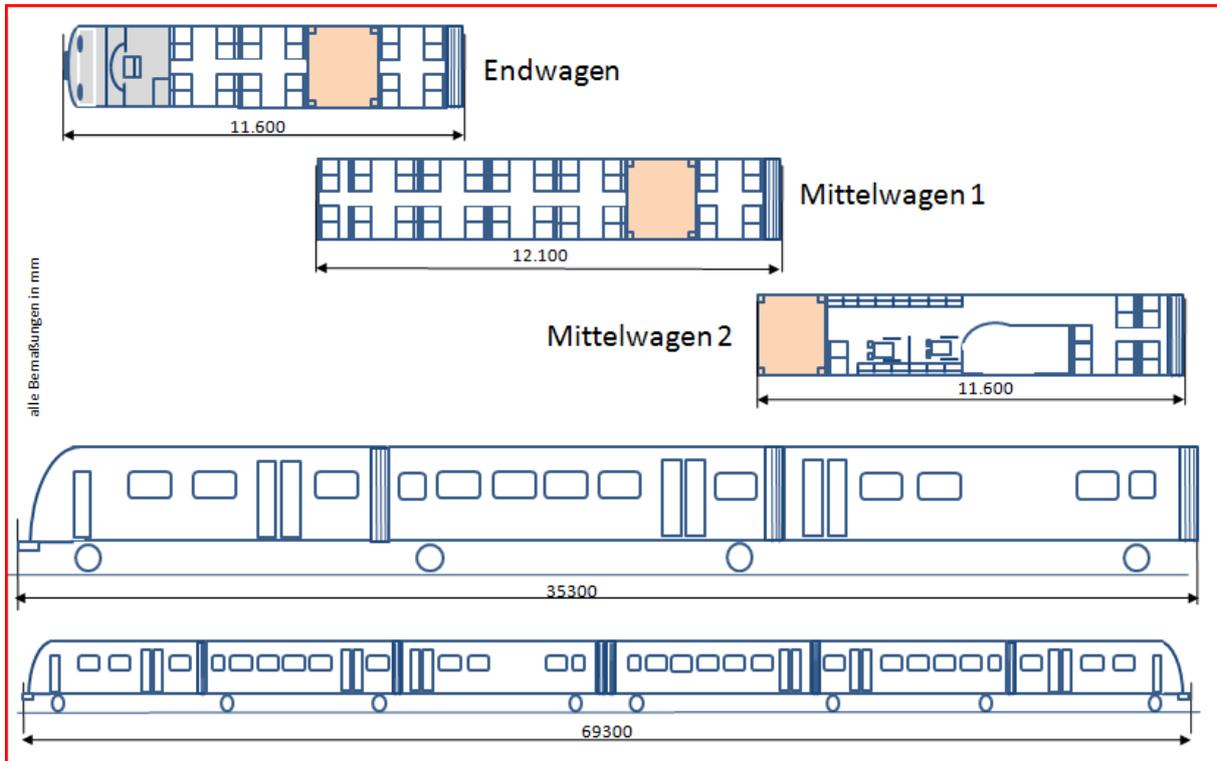


Abb. 8-37: Prinzipielle Darstellung der Variante 1 aus Tabelle 8-11

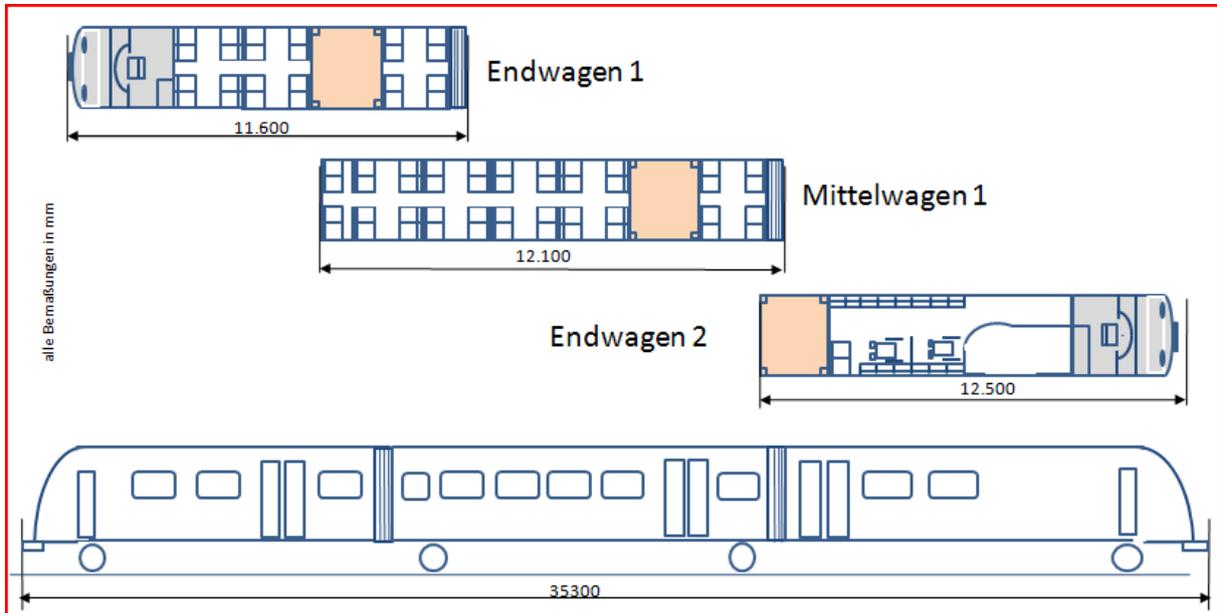


Abb. 8-38: Prinzipielle Darstellung der Variante 2 aus Tabelle 8-11

8.3.3 Bewertung

Die Betrachtung ergibt, dass die in der Studie [85] bzw. auf Basis der ausgeführten Fahrzeuge dargestellten Fahrzeugkonzepte heute nicht mehr ohne zusätzliche Nachteile umsetzbar sind. Beim Layout ist es schwierig, den nach TSI PRM geforderten Bereich in ein Fahrzeug mit kurzen Wagen zu integrieren und bzgl. der Masse muss davon ausgegangen werden, dass durchschnittliche Radsatzlasten über 20 t in solch einer Vorabuntersuchung zu hoch sind, um in einem Fahrzeugprojekt umgesetzt werden zu können. Dazu kommt das Problem der Fahrwerke, welche bei niederflurigen Fahrzeugen (unterhalb von 1.000 mm Fußbodenhöhe) teilweise unter Podesten oder in Sitzkisten verbaut werden müssen und die Variabilität der Innenraumgestaltung zusätzlich einschränken.

Gegenüber konventionellen Fahrzeugen mit Drehgestellen lassen sich keine Vorteile erkennen, die die oben genannten Nachteile aufwiegen würden. Eine zukünftige Anwendung im Vollbahnbereich ist daher unwahrscheinlich und wahrscheinlich auch der Grund dafür, dass seitens der Hersteller kein neues Fahrzeugprojekt mit Einachsfahrwerken vorangetrieben werden.

8.4 Ergänzende Innenraumlayouts

Aufgrund der gegenwärtigen Überbewertung der reinen Sitz- und Stehplatzkapazität eines Fahrzeuges durch die Aufgabenträger werden die Themenkomplexe

- Fahrgastwechselzeiten
- Gepäcktransport und
- Fahrradtransport

vernachlässigt. Da diese drei Themen aber trotzdem relevant sind, führt der daraus folgende Widerspruch zwischen Theorie und Praxis immer wieder zu Frustration bei den Fahrgästen und nachfolgend zu Verspätungen im Betriebsablauf. Diesen drei Themenfeldern ist dieses Kapitel gewidmet.

8.4.1 Optimierung des Fahrgastflusses und Gepäcktransport

Im Kapitel 7.1 wird bereits auf die Untersuchungen [52], [53] und [54] eingegangen. Darin wird ausgeführt, dass neben dem reinen Sitzplatzangebot auch der Zugang in die Fahrzeuge und die effektive Gestaltung der Türauffangräume einen maßgeblichen Einfluss auf die Beförderungsqualität, die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs, aber auch die Fahrgastwechselzeiten und damit die Haltezeiten in den Stationen haben. O.g. Untersuchungen beziehen sich überwiegend auf Erfahrungen für den Fernverkehr, lassen sich aber auf den Nah- und Regionalverkehr übertragen.

Die Schnelligkeit des Einsteigevorganges wird durch folgende Aspekte bestimmt:

- Kapazität der Fahrgastraumtüren (lichte Weite und Anzahl der Türspuren)
- Anzahl der Stufen vom Bahnsteig zum Fahrzeug
- Größe des Türauffangbereiches
- Möglichkeit für die Fahrgäste, schnell in den Gangbereich weiterrücken zu können
- Behinderung der Einsteigenden durch stehende, wartende Fahrgäste
- Fahrgäste mit größerem Gepäck/Fahrrädern

Ein Konflikt mit mobilitätseingeschränkten Personen (z. B. die Verwendung von Rollstuhlfahrrampen) ist hierbei bei Fahrzeugen mit ausreichender Anzahl von Türen von untergeordneter Bedeutung, da diese Einstiege separat gekennzeichnet sind und nicht-mobilitätseingeschränkte Personen zu anderen Türen ausweichen können.

Gemäß [52], [53] und [54] ist es dabei wichtig, dass der Türbereich möglichst großzügig gestaltet ist und die Fahrgäste quasi in die Sitzbereiche geleitet werden. Ideal ist es, wenn Fahrgäste mit Gepäck, dieses bereits in der Nähe der Tür verstauen können und nicht in den Gangbereich hineinragen und ggf. in Gepäckraufen verstauen müssen. Abbildung 8-39, linke Seite, zeigt schematisch den optimierten Personenfluss gegenüber der üblichen Sitzanordnung. In der rechten Ansicht kommt in der Praxis noch

erschwerend hinzu, dass auf der Rückseite der Doppelsitze, also an den Windschutzwänden, häufig noch Reisende stehen und den Zugang zusätzlich erschweren.

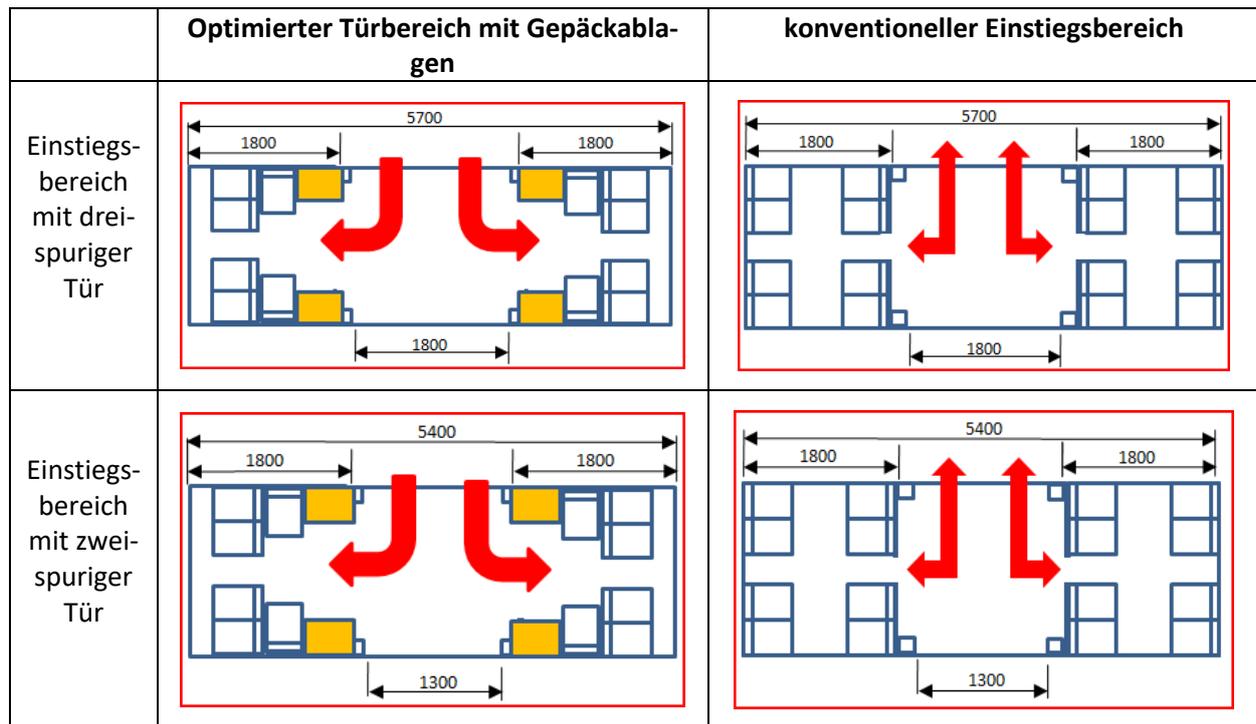


Abb. 8-39: Gegenüberstellung eines optimierten Türbereiches nach [52], [53] und [54] im Vergleich mit einem konventionellen Einstieg

Im direkten Vergleich erkennt man, dass der Verlust an Sitzplatzkapazität mit vier Sitzen pro Türaufgangsbereich relativ gering ist. Überträgt man dieses Layout auf das effizienteste, einstöckige Fahrzeug (Variante 8d) aus Kapitel 7.7, so ändern sich die relevanten Vergleichskennwerte folgendermaßen, siehe Tabelle 8-13:

Merkmale	Leermasse in t	Masse bei außergew. Zuladung in t	Durchschn. Radsatzlast in t	Sitzplätze	Länge in m	Effizienz
Dreiteiliges Fahrzeug mit überlangen Wagen, konventioneller Einstiegsbereich	147,1	210,18	17,52	215	83,56	3,92
Dreiteiliges Fahrzeug mit überlangen Wagen, optimierter Türbereich mit Gepäckablagen	147,1	226,74	18,9	179	83,56	4,07

Tab. 8-13: Veränderung der Effizienz E für die Fahrzeugvariante 8d aus Kap. 7.7

Ohne Zweifel sinkt die Transportkapazität durch den Entfall von 4 Sitzplätzen pro Einstieg und gleichzeitig erhöht sich die Auslegungsmasse, da pro Gepäckbereich 300 kg/m^2 anzusetzen sind, während pro Sitzplatz nur 70 kg (plus die Eigenmasse des Sitzes) entfallen. Gleichzeitig bleibt der Einfluss auf die Effizienz des Fahrzeugs aber vergleichsweise gering.

8.4.2 Fahrradtransport

Die Betrachtungen in den Kapiteln 7 und 8 dieser Arbeit hatten bisher den Fokus auf einem geeigneten Fahrzeuglayout für den Transport von Fahrgästen und deren Gepäck. Zunehmend gewinnt im Nah- und Regionalverkehr jedoch auch der Fahrradtransport an Bedeutung. Neben dem reinen Ausflugsverkehr auf ausgewählten Strecken (z.B. der Wochenendverkehr zwischen Berlin und den Ostsee-Bädern) beruhen aber auch mittlerweile viele zukünftige Mobilitätskonzepte auf der Verbindung von Bahn und Fahrrad. Optimal wäre hierbei natürlich die Verwendung von Mietfahrrädern an den Zielbahnhöfen, Realität ist aber, dass jeder Fahrgast gerne sein eigenes hochwertiges Fahrrad bei sich haben möchte. Damit ist offensichtlich, dass bei jedem modernen Fahrzeug eine praktikable Lösung für den Fahrradtransport geschaffen werden muss. Die ausgeführten Beispiele zeigen aber immer wieder nur halbherzige Lösungen. Sie bestehen häufig nur in Zuweisung von Stellflächen in Bereichen, wo keine befriedigenden Sitzplätze angeordnet werden können (siehe beispielhaft Abb. 8-40 und Abb. 8-41) oder erzeugen Konflikte mit Rollstuhlfahrern, Kinderwagen oder Reisenden auf dem Weg zu ihrem Sitzplatz.



Abb. 8-40: Fahrradstellplätze im Triebzug Rock für Trenitalia



Abb. 8-41: teilweise ungünstige Fahrradstellplätze im Regio 2N V200 [103]



Abb. 8-42: typische Zugangssituation vor dem Fahrzeug [103]



Abb. 8-43: Fahrradabstellung im Untergeschoß vom Regio 2N V200 [103]

Weiterhin ist die Zugänglichkeit mit Fahrrädern zu den Fahrradstellplätzen zu berücksichtigen. Hierbei führen schwierige Zugangssituationen insbesondere zu unerwünschten Verlängerungen der Haltezeiten in den Stationen mit den bekannten Effekten für die Pünktlichkeit der betroffenen Züge (siehe Abb. 8-42).

Abbildung 8-43 zeigt eine grundsätzlich bessere Transportsituation für Fahrräder, da dieser Bereich baulich und vom Transportzweck her die oben genannten Konflikte zu vermeiden hilft. Nachteilig ist hier die auf dem Bild erkennbare Treppe, die den Fahrradtransport zum Transportraum unnötig erschwert.

Erkennbar ist aber auch, dass die Platzbemessung für Fahrräder auf Basis der reinen Fahrradgröße nicht ausreichend ist. Abbildung 8-44 zeigt die Bandbreite der Fahrradgrößen. Hinzu muss jedoch immer der Platz für Fahrradtaschen, Gepäck und Kindersitze gezählt werden.

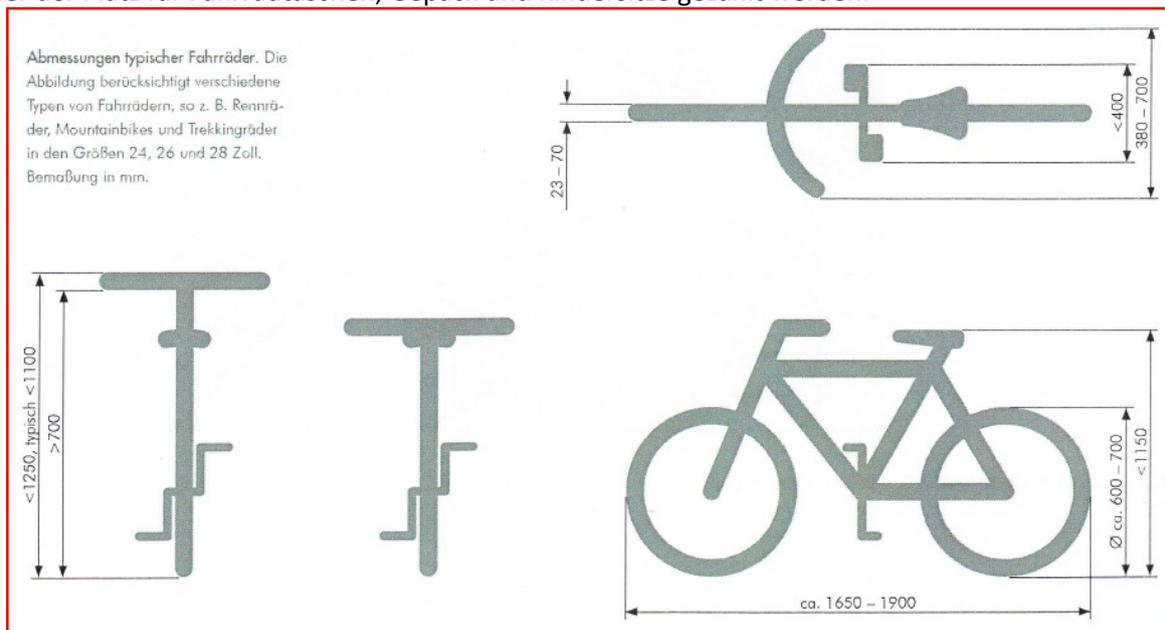


Abb. 8-44: Bandbreite von Fahrradabmessungen [104]

Abb. 8-45 zeigt sehr deutlich, wie eine vermeidlich große Anzahl von Stellplätzen nicht nutzbar ist, weil der tatsächliche Platzbedarf des Fahrrades in Realität größer ist und die dargestellten Fahrräder immer noch einzeln entnehmbar sein müssen.

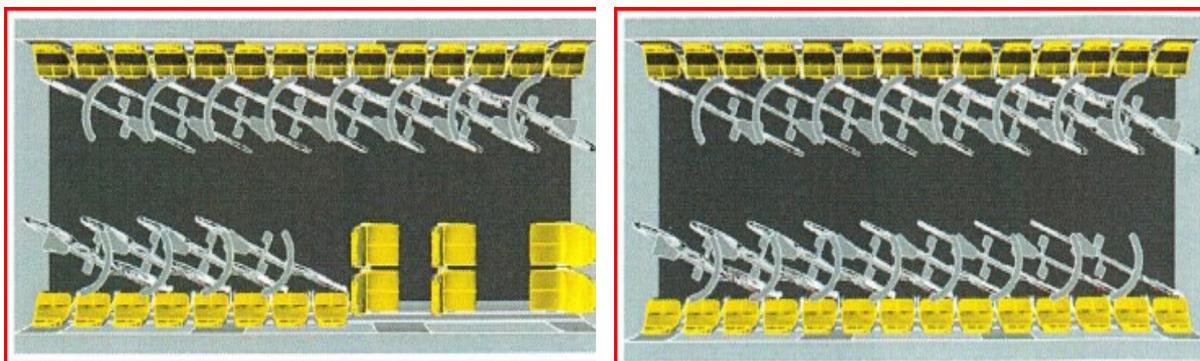


Abb. 8-45: theoretisch mögliche Fahrradabstellung in einem Fahrzeugbereich [104]

Ausgehend aus den genannten Vorbetrachtungen lassen sich folgende Randbedingungen für einen praxisnahen Fahrradtransport ableiten:

1. Zu den in Abb. 8-44 genannten Abmessungen müssen am Fahrrad befestigte Taschen, Kindersitze oder Gepäckstücke berücksichtigt werden.
2. Der Zugang für Fahrräder muss durch ausreichend große Türen unterstützt werden, um die Ein- und Aussteigezeiten in den Stationen möglichst gering zu halten.
3. Eine Trennung von Fahrgästen mit und ohne Fahrräder hilft Konflikte beim Ein- und Aussteigen zu reduzieren.
4. Be- und Entladen sollte durch verschiedene Türen erfolgen, um einen Transportfluss zu erreichen.

Zur Umsetzung der Randbedingung 1 werden für die weiteren Betrachtungen die Abmessungen eines Fahrrades inklusive der Anbauteile für den Transport gemäß Abb. 8-46 verwendet.

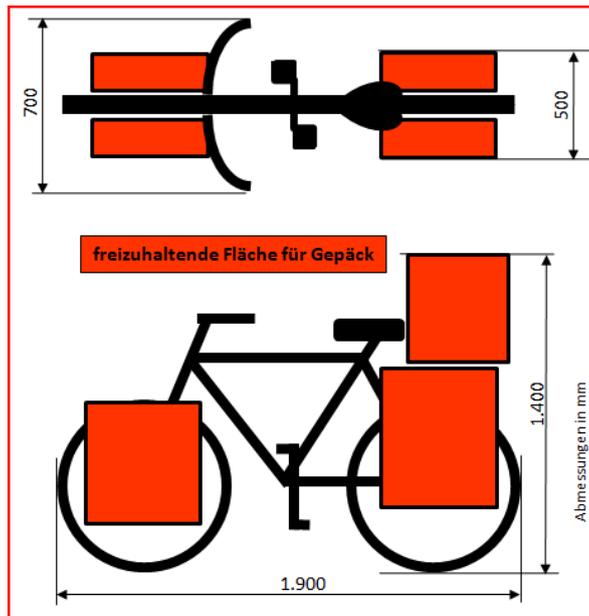


Abb. 8-46: verwendete Fahrradabmessungen

Setzt man die genannten Randbedingungen und die Abmessungen aus Abb. 8-46 in einen Fahrzeugentwurf um und verwendet dabei wieder die Bausteine aus Kapitel 7.3, so erhält man folgende Fahrzeuggrundrisse gemäß Abb. 8-47 bis 8-49:

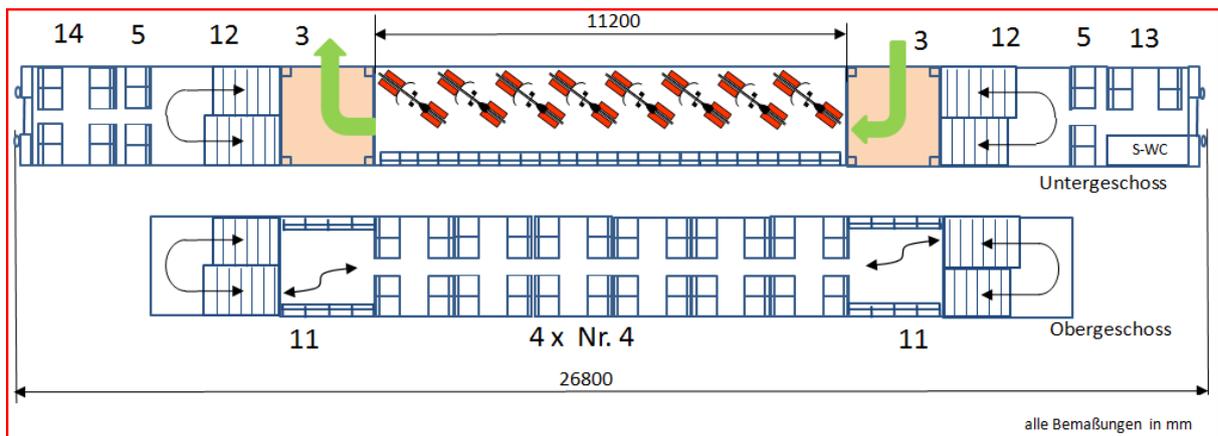


Abb. 8-47: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 1)

Variante 1 in Abb. 8-47 berücksichtigt dabei die Abmessungen eines Fahrrades mit Gepäck, enthält aber noch die heute typische Doppelnutzung mit einer großen Anzahl von Klappsitzen. Der Konflikt zwischen Fahrgästen mit und ohne Fahrrad bleibt bestehen.

Variante 2 in Abb. 8-48 setzt die Trennung zwischen Fahrgästen mit und ohne Fahrrad konsequent um. Pro Fahrrad findet sich nur ein Klappsitz. Die Kapazität liegt, wie bei Variante 1, bei acht Fahrrädern pro Wagen.

In Variante 3 gemäß Abb. 8-49 bleibt ein vollständiger Seitengang für Ein- und Aussteigevorgänge, während die Radfahrer bei ihren Rädern verbleiben können. In dieser Anordnung können neun Fahrräder transportiert werden, während bei Variante 4 mit Mittelgang gemäß Abb. 8-50 zehn Fahrräder und ebenso viele Fahrgäste transportiert werden können.

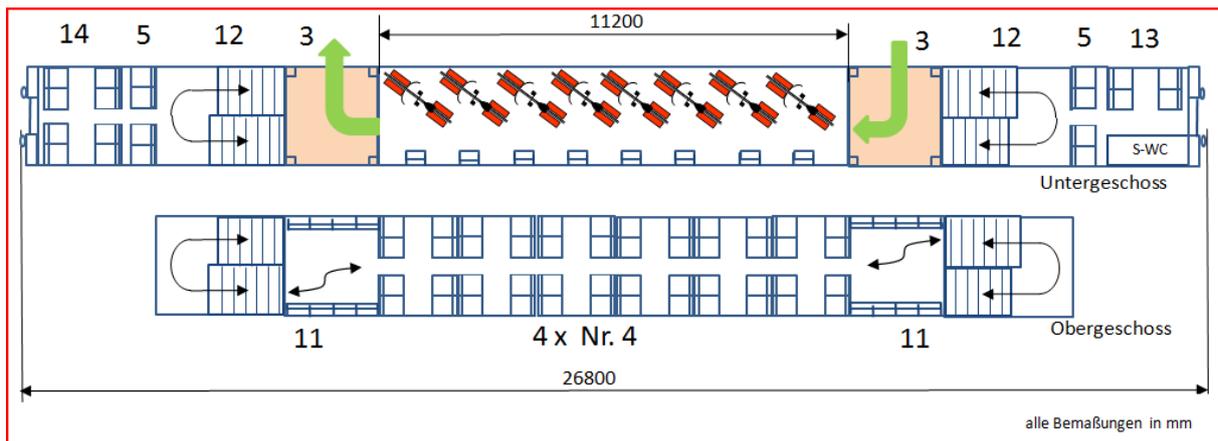


Abb. 8-48: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 2)

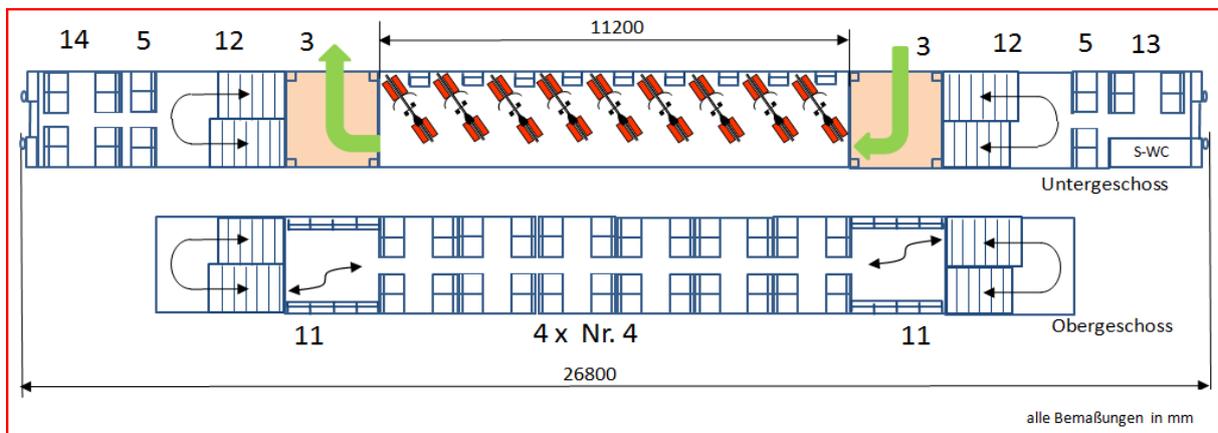


Abb. 8-49: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 3)

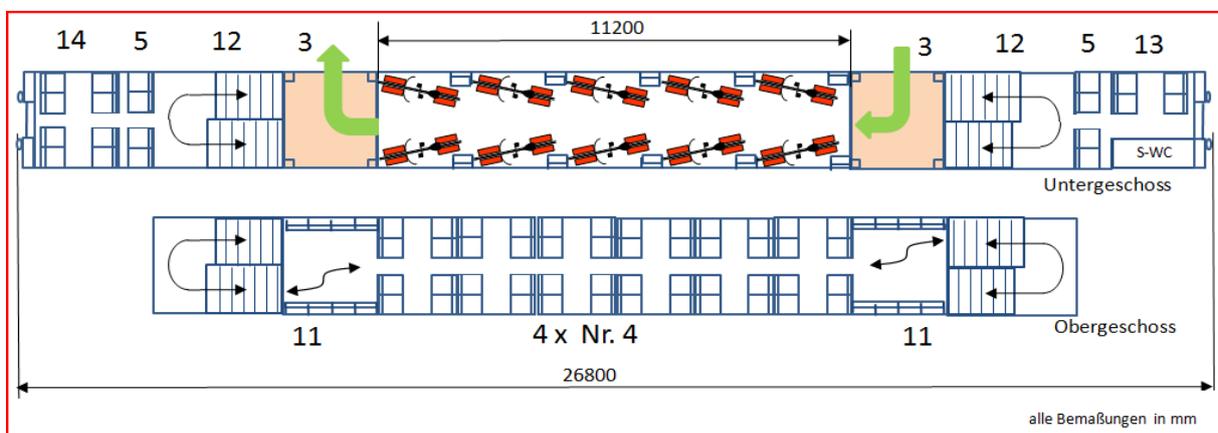


Abb. 8-50: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 4)

Die Personenflussrichtung kann außen am Wagen über Piktogramme oder Displays angezeigt werden. In allen Varianten bietet sich die Möglichkeit, neben Fahrrad und Klappsitz noch eine Ladestation für Pedelecs zu installieren, um dem Radfahrer einen weiteren Mehrwert offerieren zu können. Bei der heute üblichen Form des Fahrradtransports gibt es diese Möglichkeit nicht.

In allen Varianten ist die Fläche zwischen den Türen nach EN 15663 als Gepäckabteil zu werten und mit 300 kg/m^2 in der Massebilanz zu betrachten. Für Fahrzeuge nach Abb. 8-47 bis 8-50 ermittelt sich damit eine außergewöhnliche Zuladung von $33,49 \text{ t}$, was in Verbindung mit dem Faktor $1,8 \text{ t/m}$ für Doppelstockwagen eine Gesamtmasse von $81,7 \text{ t}$ und eine durchschnittliche Radsatzlast von $20,4 \text{ t}$ ergibt.

8.5 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Bereich unkonventioneller Fahrzeugkonzepte die Verwendung von Fahrwerken mit kleinen Rädern für die Gestaltung der Fahrzeuge und die Schaffung von zusätzlichen Kapazitäten erhebliches Potential bietet. Folgende Möglichkeiten lassen sich dabei erkennen:

1. die reine Kapazitätssteigerung für den Fahrgastraum, relevant insbesondere für hochbelastete Pendlerstrecken
2. die Vergrößerung des Komforts im Innenraum, ohne Kapazitätsverluste hinnehmen zu müssen
3. durch die Kombination aus ein- und doppelstöckigen Fahrzeugen lassen sich Fahrzeuge darstellen, die für 500 mm und für 760 mm hohe Bahnsteige gleichzeitig optimiert werden können und bei denen Rollstuhlfahrer durch Nutzung eines nahezu ebenerdigen Wagenübergangs ohne fremde Hilfe in den Nachbarwagen wechseln können, so dass ein Verlassen des Fahrzeugs an unterschiedlich hohen Bahnsteigen ohne externe Rampen oder Hublifte möglich ist. Dies wiederum hilft auch dem Betreiber, denn die Verwendung von Rampen oder Hubliften sorgt in der Regel für Verspätungen der Zugfahrt.

Für die Verwendung von Fahrwerken ist die grundsätzliche Machbarkeit gegeben, auch wenn natürlich noch viele Details im Rahmen einer vertiefenden Konstruktion zu bearbeiten sind.

Die Machbarkeit von Fahrzeugkonzepten unter Verwendung von Einachsfahrwerken ist technisch hinreichend durch ausgeführte Beispiele bewiesen, allerdings lässt sich kein signifikanter Vorteil gegenüber Drehgestellfahrzeugen erkennen. Fahrzeuge mit Einachsfahrwerken sind gegenüber Fahrzeugen mit Drehgestellen bezogen auf eine gleiche Länge nahezu gleich schwer, die theoretischen Vorteile kürzerer und damit leichter Wagenkästen lassen sich in der Praxis nicht nachweisen. Nur wenn es im geplanten Einsatzgebiet möglich sein sollte, durch die kürzeren Wagenkästen einen Breitenzuwachs und damit einen Platzgewinn zu erreichen, eröffnet sich ein nutzbares Potential.

9. Weitere Entwicklungen

9.1 Absehbare Trends

In den vorherigen Kapiteln wurden Untersuchungen zur grundsätzlichen konzeptionellen Gestaltung von Fahrzeugen durchgeführt. Neben diesen grundsätzlichen Fragen zur Innenraumgestaltung oder zur Auswahl der Antriebstechnik gibt es aber auch übergeordnete Einflüsse, die die Konzeption der Fahrzeuge beeinflussen und die hier am Rande erwähnt werden sollen.

Ohne Zweifel wird es Entwicklungen geben, die heute noch gar nicht absehbar sind. Genauso gibt es aber Entwicklungen, die heute schon erkennbar sind und bei denen es nur noch eine Frage der Zeit ist, wann sie in die Umsetzung kommen. Diese erkennbaren Trends mit Einfluss auf die Mobilität und das Nutzerverhalten sind

- die Digitalisierung der Gesellschaft und
- der fahrerlose Betrieb

Die Digitalisierung der Gesellschaft führt zu einer nachhaltigen Veränderung der Arbeitsbedingungen. Der eingeleitete Trend zur Heimarbeit (in den Branchen, wo es möglich ist), führt letztlich zu einer Reduzierung des Verkehrs bei den Pendlern, wobei der Umfang der Reduzierung kaum seriös abschätzbar ist. Gleichzeitig wird der Freizeitverkehr davon aber kaum betroffen sein, möglicherweise sogar steigen, so dass mit generellen Veränderungen im Nutzerverhalten zu rechnen ist.

Aufgrund der Tatsache, dass die Betreiber einerseits die Betriebskosten möglichst gering halten wollen, es andererseits aber auch heute schon Schwierigkeiten gibt, qualifiziertes Fahrpersonal in ausreichender Anzahl zu bekommen, kommt dem Aspekt des fahrerlosen Betriebes eine besondere Bedeutung zu. Gegenwärtig gibt es nur wenige U-Bahnen oder Kleinbahnen auf Flughäfen, die fahrerlos im Einsatz sind. Da die grundsätzlichen Möglichkeiten für fahrerlosen Betrieb mittels ETCS gegeben sind, ist hier zu erwarten, dass diese Technik sich in absehbarer Zeit im Einsatz befinden wird. Für die Fahrzeuggestaltung bedeutet dies zusätzlichen Innenraum, der für den Personentransport genutzt werden kann und die Kapazität der Fahrzeuge steigert.

Die Kombination aus Kapazitätssteigerung und automatischem Betrieb kann damit zu einer Attraktivitätssteigerung des Verkehrs führen, auf Hauptstrecken ebenso wie auch auf Nebenstrecken.

Wenn Fahrzeuge fahrerlos verkehren, kommt auch dem betrieblichen Aspekt der Flügelzugbildung eine neue Bedeutung zu. Beim Flügelzugkonzept werden mehrere gleiche oder ähnliche Fahrzeuge betrieblich gekuppelt und können dann in ausgewählten Punkten des Einsatzgebietes entkuppelt werden, um in verschiedene Richtungen weiter zu fahren. Umgekehrt werden einzeln verkehrende Fahrzeuge im Zulauf auf Oberzentren gekuppelt. Diese Betriebsweise benötigt einerseits relativ viele Triebfahrzeugführer und andererseits ist es erforderlich, dass diese zum richtigen Zeitpunkt ihren Zug planmäßig übernehmen können. Flügelzugbildung ist logistisch nicht einfach. Im fahrerlosen Betrieb entfallen hingegen diese betrieblichen Zwangspunkte.

Zusätzlich stellt sich die Frage, ob diese betrieblichen Einheiten nach der Flügelzugbildung nicht auch einen Durchgang durch den ganzen Zug bieten sollten. Neben der subjektiven Verbesserung des Sicherheitsbedürfnisses der Fahrgäste sprechen auch betriebliche Belange dafür. Fahrerlose Fahrzeuge sind schließlich nicht notwendigerweise ohne Personal im Einsatz. So besteht weiterhin Bedarf für Schaffner, aber auch für Zugtechniker, die in der Lage sind, kleinere Ausfälle im Betrieb zu reparieren, so dass das Fahrzeug nicht auf der Strecke havariert. Fahrzeuge der dänischen IC3-Baureihe oder verschiedene Baureihen in Großbritannien besitzen entsprechende Fahrzeugenden, die nach dem Kuppeln einen Durchgang ermöglichen, siehe beispielhaft Abb. 9-1 und 9-2. Allerdings wird bisher nur in Dänemark dieser Durchgang auch wirklich den Fahrgästen zur Verfügung gestellt, während in Großbritannien dieser Durchgang ausschließlich betrieblichen Zwecken dient.



Abb. 9-1: Dieseltriebzug IC3 der DSB (Bildquelle: Prospekt Fa. Alusuisse)



Abb. 9-2: englischer Triebzug Electrostar, Baureihe 375/377 (Bildquelle: Prospekt Fa. Bombardier)

Für den Fahrgast sind weiterhin folgende Themen von Interesse:

- stabile WLAN-Verbindung mit guter Signalstärke
- Stromanschlüsse für alle Arten von elektronischen Geräten (Mobiltelefon, Laptop, Tablet) an allen Sitzplätzen
- zugängliche Stromanschlüsse für Pedelecs im Bereich Fahrradstellplätze
- dynamische Echtzeit-Fahrgastinformation durch Monitore im Fahrzeug aber ggf. auch direkt auf das Mobiltelefon des Fahrgasts
- E-Ticketing, also der Verkauf von Fahrkarten über Mobiltelefon-Anwendungen
- Zusatzinformationen für ortsfremde Reisende, ggf. in englischer Sprache über Displays, OLED-Folien an Fenstern oder Trennwänden etc.

9.2 Weiterer Ausblick

Im Kapitel 3.1 wurde mit Gleichung 3 eine Möglichkeit zur einfachen vorurteilsfreien Bewertung von Fahrzeugkonzepten eingeführt. Diese Gleichung hat dabei die Fahrzeugeigenschaften Kapazität, Leichtbau und Zugänglichkeit, indirekt damit auch einen Teil des Fahrgastkomforts, in die Bewertung einbezogen. Damit sind wesentliche Teile der Anforderungen der Aufgabenträger entsprechend Kapitel 1.5.2 (Tab. 1-2) in die Bewertung einbezogen worden.

Bei einer zukünftigen Detaillierung von Anforderungen seitens der Besteller besteht die Möglichkeit, die Gleichung 3 um zusätzliche Kriterien zu erweitern. Denkbar wäre z.B. die Einbeziehung der Wartungskosten pro Kilometer zurückgelegter Laufleistung.

10. Zusammenfassung (Langversion)

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse, welche Fahrzeugkonzepte im Nah- und Regionalverkehr der Zukunft in Deutschland zur Anwendung kommen werden. Grundlagen für diese Prognose sind sowohl die Analyse der verschiedenen, teilweise gegensätzlichen Anforderungen der einzelnen Interessengruppen, die direkt und indirekt Einfluss auf neue Fahrzeuge nehmen, als auch die Analyse der Entwicklungstrends im Schienenfahrzeugbau.

Zu diesem Zwecke erfolgt im ersten Teil der Arbeit eine Bestandsaufnahme der verschiedenen Fahrzeugkonzepte, die sich heute im deutschen Nah- und Regionalverkehr in der Anwendung befinden. Weiterhin werden weitere Fahrzeugkonzepte aus dem Ausland in die Bewertung einbezogen, obwohl diese teilweise infrastrukturbedingt eine andere Antriebsausrüstung verwenden, sodass 69 Fahrzeuge aus Deutschland und 24 Fahrzeuge aus dem Ausland, in Summe also 93 Fahrzeuge, in die Gesamtbeurteilung einfließen. Diese 93 Fahrzeuge können zehn unterschiedlichen Fahrzeugkonzepten zugeordnet werden.

Anhand von verschiedenen Kennziffern wird untersucht, welche der betrachteten Fahrzeugkonzepte signifikante, konzeptionelle Vorteile gegenüber anderen Typen aufweisen. Aufgrund der ermittelten Kennziffern wird die These aufgestellt, dass es bei Schienenfahrzeugen kein hervorgehobenes Leichtbaukonzept gibt, welches zu einem besonderen Vorteil gegenüber anderen Konzepten führt. Diese These kann im Weiteren bestätigt werden, d.h. es wird nachgewiesen, dass das Fahrzeuggewicht in direkter Abhängigkeit von der Transportkapazität und spezifischen Ausstattungswünschen der Besteller ist und keines der untersuchten Fahrzeugkonzepte ein Beispiel für signifikanten, konzeptionellen Leichtbau darstellt. Um die These untermauern zu können, wurde ein Effizienzfaktor für Fahrzeugkonzepte eingeführt, welcher sich aus der längenbezogenen Masse, der Transportkapazität und der Zugänglichkeit zusammensetzt und eine übergreifende Bewertung verschiedener Fahrzeugkonzepte zulässt. Für den in dieser Arbeit verwendeten Effizienzfaktor werden individuelle Gewichtungsfaktoren festgelegt. Diese lassen sich, zum Beispiel bei einer Anwendung in öffentlichen Ausschreibungen, je nach Wunsch des Aufgabenträgers anpassen, um eine eindeutige, ganzheitliche Bewertung eines angebotenen Fahrzeugs zu erzielen.

Auf Grundlage des Effizienzfaktors wird dann die zielgerichtete Ableitung eines zukunftsgerichteten Fahrzeugkonzepts für den Nah- und Regionalverkehr beschrieben.

Nach der Bestandsaufnahme für die Fahrzeugkonzepte erfolgt eine Untersuchung zur Infrastruktur, die sich in absehbarer Zeit nur langsam, aber mit einer deutlich erkennbaren Ausprägung verändert. Diese sich wandelnde Infrastruktur bietet das Umfeld für neue Fahrzeuge und ist maßgeblich bestimmt durch die gesellschaftlich und ökonomisch notwendige Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit mittels weiter zunehmender Elektrifizierung, flächendeckender Einführung von ETCS und einer gleichzeitigen Erweiterung der Fahrzeugbegrenzungslinie. Damit kann dem Umstand Rechnung getragen werden, dass neue Strecken nur in geringem Umfang gebaut werden können und die vorhandene Infrastruktur insgesamt mehr Transportvolumen zu bewältigen hat, als es heute der Fall ist. Aufgrund wachsender ökologischer Anforderungen zur Reduzierung der Emissionen, insbesondere beim Schadstoffausstoß und dem Bedarf, zusätzliche Nachfrage nach schienengebundenem Verkehr durch umsteigefreie Einbindung des regionalen Verkehrs aus der Region in Mittel- und Oberzentren zu schaffen, kann so zum motorisierten Individualverkehr eine Alternative geboten werden. Einen Betrieb von langsamen, zweiteiligen Dieseltriebwagen auf Hauptstrecken im Einzugsgebiet von Oberzentren wird es daher nicht mehr geben können.

Damit einhergehend ist die Frage nach dem zukünftigen Antriebskonzept zu beantworten. Neben den klassischen Antrieben, gespeist aus einer Fahrleitung und Dieselantrieben, werden auch neue

Fahrzeugkonzepte mit Batterie- und/oder Brennstoffzellenantrieb in die Untersuchung einbezogen und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Antriebskonzepte verglichen.

Es kann dabei gezeigt werden, dass ausschließlich die elektrische Traktion in Zukunft noch zur Anwendung kommen wird, während die Traktion mit Verbrennungsmotoren auslaufen wird. Kern sind dabei entweder rein-elektrische Triebfahrzeuge oder Hybridfahrzeuge, welche zusätzlich eine zweite Ausrüstung für nicht-elektrifizierte Strecken mitführen. Diese zweite Ausrüstung kann dann entweder aus fahrzeugseitigen Batteriespeichern oder Brennstoffzellen bestehen. Allerdings ist aufgrund der mit Batteriespeichern verbundenen Einschränkungen für den Betrieb (insbesondere bei der Reichweite) davon auszugehen, dass diese Systeme nur für singuläre Anwendungen oder als Brückentechnologie Anwendung finden. Diese Einschränkungen liegen im erheblichen Mehrgewicht der Hybridfahrzeuge, den damit verbundenen höheren Beschaffungs-, Betriebs- und Instandhaltungskosten. Insbesondere die auch für andere Verkehrssektoren steigende Nachfrage nach Hochenergiebatterien, die aus besonderen, seltenen Materialien bestehen, lassen eine nennenswerte Verbreitung im Schienenfahrzeugbau nicht erwarten. Hier spielt die Wasserstofftechnologie eine besondere Rolle, da sie die Nachteile eines Batterieantriebes nicht aufweist und hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und insbesondere der Reichweite dem Dieselantrieb ebenbürtig ist.

Die Verwendung reiner Einsystemfahrzeuge für den Betrieb auf den Hauptstrecken bleibt daher weiterhin notwendig und stellt somit das zukünftige Rückgrat des Regional- und Nahverkehrs dar und hierbei, wegen der nicht schnell erweiterbaren Netzkapazitäten, vorwiegend als Doppelstockfahrzeug. Einsystemfahrzeuge für den Nebenbahnbetrieb können auf einzelnen Strecken sinnvoll bleiben, dies aber ausschließlich mit Wasserstoff-Antrieb. Die weitere Verwendung des Dieselmotors als Bahnantrieb ist nicht zu erwarten. Zweisystemfahrzeuge für den Betrieb auf Haupt- und Nebenstrecken, insbesondere für Zubringerstrecken im Umfeld von Ballungszentren, sind für eine Übergangszeit zu erwarten.

Anschließend werden die Merkmale für ein zukünftiges Regionalbahnfahrzeug herausgearbeitet. Zu diesen Merkmalen gehört es, dass der Nah- und Regionalverkehr zweifellos benutzerfreundlicher wird. Die Benutzerfreundlichkeit drückt sich durch einen einfachen, ungehinderten Zugang zum Fahrzeug, angemessene ergonomische Sitzverhältnisse, leichte Verteilung der Reisenden im Fahrzeug, verbesserte Mitnahmemöglichkeiten für Fahrräder und Gepäck und somit einen insgesamt attraktiveren Verkehr aus.

Unter diesen Randbedingungen lassen sich weitere, unkonventionelle Fahrzeugtypen ableiten, die gegenüber heutigen Fahrzeugen die o. g. Vorteile für die Benutzer aufweisen. Insbesondere kann aufgezeigt werden, dass die Verwendung von Fahrwerken mit kleinen Rädern Fahrzeugkonzepte ermöglichen, die nicht nur die Kapazität erhöhen, sondern auch den Verkehr für den Benutzer attraktiver machen.

Auf Basis von standardisierten Fahrzeugmodulen und der eingeführten Effizienzbetrachtung für Fahrzeuge können vier besonders effiziente Fahrzeugvarianten ermittelt werden. In der jeweils kleinsten, betriebsfähigen Kombination sind dies in der Reihenfolge ihrer Effizienz:

1. Drei gekuppelte einstöckige Triebwagen mit überlangen Wagenkästen und konventioneller Drehgestellanordnung mit 215 Sitzplätzen
2. Triebzug aus jeweils zwei ein- und zwei doppelstöckigen Einzelwagen mit jeweils zwei Drehgestellen mit 355 Sitzplätzen
3. Drei durch Jakobsdrehgestelle verbundene Doppelstockwagen ohne eigenen Antrieb, also zur Verwendung mit Lokomotiven mit 253 Sitzplätzen
4. Zwei kurzgekuppelte doppelstöckige Triebwagen mit 159 Sitzplätzen

Absolut gesehen weist das unter 2. genannte Konzept die höchste Sitzplatzkapazität auf.

Es ist zukünftig von einem Bedarf an drei Fahrzeugtypen auszugehen, dem doppelstöckigen Fahrzeug für die hochbelasteten, elektrifizierten Strecken, dem einstöckigen Fahrzeug für elektrifizierte

Strecken, welches durch Flügelzugbildung die Regionen erschließt und dem fahrdrahtunabhängigen Fahrzeug für die Strecken, die heute noch mit Dieseltriebwagen bedient werden. Somit ist, neben dem reinen, sich quasi konzeptionell nicht zu ändernden S-Bahn-Verkehr, mit dem Einsatz folgender Fahrzeuge für den Nah- und Regionalverkehr in Deutschland zu rechnen:

1. Doppelstöckige Fahrzeuge für Geschwindigkeiten bis 160 km/h für 15 kV Wechselspannung als selbstfahrender Triebzug oder mit Lokomotivbespannung für hohe Fahrgastkapazitäten
2. Einstöckige Triebwagen mit überlangen Wagenkästen für Geschwindigkeiten bis 160 km/h in der Ausführung für 15 kV Wechselspannung, teilweise als Hybrid-Fahrzeug mit Batteriepuffer zum kombinierten Betrieb auf elektrifizierten und nichtelektrifizierten Strecken
3. Einstöckige, wasserstoffbetriebene Triebwagen bis 140 km/h als Ersatz für den klassischen Dieselantrieb, idealerweise betrieblich kuppelbar mit den rein elektrisch angetriebenen Triebwagen unter 2. zur Fahrt im gekuppelten Zustand auf hoch belasteten Strecken

Die aufgezeigte Möglichkeit, Fahrzeuge auf Basis von Fahrwerken mit kleinen Rädern zu gestalten, schafft darüber hinaus zusätzliche Sitzplatzkapazität und darüber hinaus für alle mobilitätseingeschränkten Personen einen verbesserten Zugang zu den Fahrzeugen bzw. ermöglicht den Wechsel zwischen den Wagen eines Zuges, was heute nicht möglich ist.

Alle diese Fahrzeuge werden dabei folgende weitere Eigenschaften aufweisen:

- hohe Traktionsleistung, um mit angemessenem Beschleunigungs- und Bremsvermögen die Streckenkapazität nicht unnötig herabzusetzen
- maximale Radsatzlasten bis 22 t
- einfache, schnelle Kuppelfähigkeit, um durch entsprechende Zugbildung im Einzugsbereich einer Hauptstrecke eine zusätzliche Belastung der Hauptstrecken gering zu halten
- teilweise Mehrsystemfähigkeit, um sowohl auf elektrifizierten Hauptstrecken als auch auf nicht-elektrifizierten Nebenstrecken sowie grenzüberschreitend verkehren zu können
- ETCS als Zugsicherungssystem, teilweise auch in der Ausführung für fahrerlosen Betrieb

Der schienengebundene Nah- und Regionalverkehr der Zukunft ist im Bereich von Strecken mit hoher Nachfrage überwiegend doppelstöckig, elektrisch angetrieben und von verbesserter Nutzerfreundlichkeit gekennzeichnet.

11. Summary (full version)

The main objective is to analyse, which kind of vehicle concepts will be applied in Germany for commuter and regional trains of the future. Basis for this prognosis is the analysis of different, partly contradicting requirements of the individual groups of interest that are influencing directly and indirectly new vehicles as well as the analysis of general design trends in the railway business.

In the first part of this document the current status of the different vehicle concepts that are in daily use in the German commuter and regional traffic is described. Vehicle concepts that are used abroad have been evaluated as well, although they are partly equipped with different traction systems because of infrastructure reasons. 69 German and 24 foreign vehicles, in total 93 vehicles, have been used for comparisons. These 93 vehicles are categorized in 10 different vehicle concepts.

Based on different evaluation criteria, it was evaluated, which vehicle concepts show significant, conceptual advantages compared to others. Due to these evaluation criteria, a thesis was elaborated, that there is no evidence of a particular lightweight concept for rail vehicles that generates a special advantage in comparison to others. This thesis is proven, which means that the vehicle weight depends directly on transport capacity and specific optional equipment chosen by the vehicle buyer rather than on a vehicle concept with significant, conceptual lightweight design. To support that thesis, an efficiency factor was defined, which considers the mass per length, the transport capacity and the accessibility to achieve an overall evaluation. Individual weighing factors are defined as well. These factors can be defined for example in public quotes as per buyer's opinion to obtain an overall, independent view of the offered vehicles. The efficiency factor is used for the evaluation of future vehicle concepts for commuter and regional traffic.

After investigating the different vehicle concepts, an evaluation of the infrastructure - which is changing much slower but nevertheless clearly visible - was performed. This changing infrastructure become the future environment for new vehicles and is mainly defined by the ecological necessary need to increase the line-capacity with additional electrification, implementation of ETCS and in parallel an extension of the kinematic gauge. This ensures, as new lines only can be built in rare cases, that the existing infrastructure is able to provide more capacity than today. Because of the ecological need to reduce emissions, especially pollution of air and the need to create additional demands for traffic on railways without changing trains when running from small to large villages, this is a part to provide an alternative to the individual motorised traffic. Operation of slow two-car Diesel multiple units on lines with overhead catenary will disappear in the future.

In parallel, the question for the future drives concept has to be answered. Beside the classic drives fed by catenary or Diesel-engines, also new concepts with batteries or fuel cells are compared to examine advantages and disadvantages. It can be shown, that only drives based on electric traction will be part of future applications, while traction with combustion engines will disappear. Main elements are pure electric driven railcars or hybrid-vehicles with additional equipment for non-electrified lines. This additional equipment consists either of vehicle-based batteries or fuel cells. But because of the disadvantages of batteries for public operations (especially considering the limited range), it can be assumed, that these systems will only be used for limited applications or for a certain transition period. Other disadvantages are the significant increase of weight for hybrid vehicles and therefore related higher purchase-, operation- and maintenance costs. As there are also demands by other industries for high-tech batteries, which are built under usage of rare elements, their wide distribution in the rail-business cannot be expected. But it can be expected, that hydrogen technology will play an important role in the future, as it avoids the disadvantages of batteries but is comparable to Diesel-drive as far as it concerns its power and range.

The application of single system variants on main lines will remain to be the backbone of future regional and commuter services, but due to the slow extension of the network, to a large degree as double-deck-vehicles. There might be the need for single system trains for local railways but in this

case based on hydrogen-drives. The future use of Diesel engines cannot be expected anymore. Dual voltage trains for operation on main lines and local lines can be expected for a transition period.

After that, main elements of a future regional vehicle have been elaborated. These elements imply that the regional and commuter traffic becomes much more user-friendly. User-friendly vehicles are distinguished from others by an easy, barrier-free access to the vehicles, ergonomic seating, easy distribution of passengers inside the cars, optimised bicycle and baggage-transport, so all in all by an increased attractive public transport.

Based on these conditions, further unconventional vehicle types can be derived, which show advantages for the passengers as described above. Especially the use of bogies with small wheels provides vehicle concepts with expanded capacity as well as makes public transport more attractive for the passengers. Using standardised vehicle modules as well as the proposed efficiency definition with their individual weighing factors, four variants of vehicle concepts have been defined. In the sequence of efficiency, the following variants that can be used in regular operation are most effective:

1. Three permanently coupled single deck power cars with extra-long carbodies and conventional bogies, having 215 seats
2. Four permanently coupled power cars, consisting of two single and two double decks cars with two conventional bogies each, having 355 seats
3. Three double deck coaches without traction equipment, combined via Jakobs-bogies to be hauled by a locomotive, having 253 seats
4. Two permanently coupled and powered double deck power cars, having 159 seats

In total, variant 2 provides the maximum seating capacity.

It can be assumed that there is a future need for three vehicle variants. It is the double deck train for high capacity demand on electrified lines, the single deck train for electrified lines into the regions that can be adjusted regarding capacity by coupling trainsets together and the catenary-independent train for lines that are operated today by Diesel-trains. In addition, there is the conventional mass-transit commuter for S-Bahn-lines whose concept will not change. So overall the following three vehicle types are needed for regional services:

1. Double deck trainsets for speeds up to 160 km/h and 15 kV supply voltage, either as electrical multiple unit or hauled by locomotive for high capacities
2. Single deck multiple units with extra-long carbodies for speeds up to 160 km/h and 15 kV supply voltage, partly as hybrid-vehicle with batteries for operation on electrified and non-electrified lines
3. Single deck multiple units for speeds up to 140 km/h with hydrogen drive as replacement for traditional Diesel-railcars, optionally to be coupled with electrical multiple units as mentioned under 2. for coupled operation on overloaded lines

The demonstrated possibility to design vehicles equipped with bogies on small wheels gives further potential for additional increase of capacities and better access for people with restricted mobility as well as the possibility to change between cars which is impossible today.

All these car types will provide the following characteristics:

- High traction power for appropriate acceleration and deceleration performance to avoid unnecessary line occupation
- Maximum wheel loads up to 22 t
- Easy and quick coupling to reduce line operation on main lines
- Partly multi-system operability for operation on electrified and non-electrified lines as well as the ability to cross borders
- ETCS, partly also to enable driverless operation

The regional and commuter traffic on rails of the future will be mainly double deck, electrical driven and of higher user-friendliness for better acceptance.

12. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Abb.	Abbildung
AC	Alternating Current, siehe auch WS
Fa. Alstom	Hier die Kurzform für die Alstom SA und ihre Tochtergesellschaften
Fa. Bombardier	Hier Kurzform für die Bombardier Inc. und ihre Tochtergesellschaften wie die Bombardier Transportation GmbH oder andere Landesgesellschaften
BR	Baureihe
BS	Bauserie, Unterteilung innerhalb einer Baureihe
DB	Deutsche Bahn AG oder ihre Vorgängergesellschaft Deutsche Bundesbahn
DC	Direct Current, siehe auch GS
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DR	Deutsche Reichsbahn
DSB	Dänische Staatsbahn
EBO	Eisenbahnbau- und Betriebsordnung
ES	Einsystemfahrzeug (verwendet im Unterschied zu Mehrsystemfahrzeugen, siehe unter MS)
ETCS	European Train Control System
FOK	Fußbodenoberkante, in der Regel der Abstand zur Schienenoberkante
GKB	Graz-Köflacher Eisenbahn
Gl.	Gleichung
GS	Gleichstrom
GTO	Gate-Turn-Off-Thyristor
GTW	Gelenktriebwagen; Produktbezeichnung der Fa. Stadler
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ITINO	Produktbezeichnung der Fa. Bombardier für einen Dieseltriebwagen
Kap.	Kapitel
KBS	Kursbuchstrecke
KISS	Komfortabler, innovativer, spurtstarker S-Bahn-Zug; Produktbezeichnung der Fa. Stadler
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LED	Light emitting diode, licht-emittierende Diode
LINT	Leichter, innovativer Nahverkehrstriebwagen; Produktbezeichnung der Fa. Alstom
LKAB	Luossavaara – Kiirunavaara AB, nordschwedische Eisenerzminen- und Bahngesellschaft
iLINT	Produktbezeichnung der Fa. Alstom für die mit einer Brennstoffzelle ausgestattete Variante eines LINT
IORE	Bezeichnung für die Doppellokomotiven der Bahngesellschaft LKAB
LIREX	Leichter, innovativer Regionalexpress, Produktbezeichnung der Fa. Alstom
Mireo	Produktbezeichnung der Fa. Siemens für eine Familie von Regionalbahnfahrzeugen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MS	Mehrsystemfahrzeug, Fahrzeug, welches durch mindestens zwei verschiedene Energieversorgungssysteme (z.B. Gleich- und Wechselstrom oder 15 und 25 kV Wechselspannung) mit Energie versorgt wird
NCM/C	Fahrzeuggatterie auf Basis von Lithium-Nickel-Kobalt-Manganoxid
NCM/LTO	Fahrzeuggatterie auf Basis von Lithium-Titanoxid-Nickel-Kobalt-Manganoxid

Abkürzung	Bedeutung
NGT	Next Generation Train, Projektname der DLR
NRW	Bundesland Nordrhein-Westfalen
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ODEG	Ostdeutsche Eisenbahn GmbH
OG	Obergeschoß, obere Etage bei Doppelstockwagen
OLED	Organic light emitting diode; LEDs auf Basis organischer Folien
Pedelec	Fahrrad mit elektrischem Zusatzantrieb
Fa. Pesa	Hier die Kurzform für PESA Bydgoszcz SA
PRM	People with restricted mobility, mobilitätseingeschränkte Personen
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RAM	Reliability, Availability, Maintainability (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit)
RMV	Rhein-Main Verkehrsverbund
Fa. Siemens	Hier die Kurzform für die Siemens AG und ihre Tochtergesellschaften
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer Français, Französische Staatsbahn
SNTF	Société Nationale des Transports Ferroviaires Algériens, Algerische Staatsbahn
SOK	Schienenoberkante
SPNV	Schienengebundener Personen-Nahverkehr
Fa. Stadler	Hier Kurzform für die Stadler Rail Group und ihre Tochtergesellschaften wie z.B. die Stadler Pankow GmbH oder die Stadler Altenrhein AG
S-WC	Standard-Toilette, nicht-PRM-gerechte WC-Ausführung
Tab.	Tabelle
Talent	Talbots leichter Nahverkehrstriebzug; Produktbezeichnung der Fa. Bombardier
TRAXX	Produktbezeichnung der Fa. Bombardier für eine Lokomotive
TSI	Technische Spezifikation Interoperabilität; technische Anforderungen an Schienenfahrzeuge entsprechend EU-Gesetzgebung für Fahrzeuge, die grenzüberschreitend eingesetzt werden können
UBB	Usedomer Bäderbahn GmbH
UG	Untergeschoß, untere Etage bei Doppelstockwagen
U-WC	Universal-Toilette, behinderten-gerechte WC-Ausführung, nicht notwendigerweise entsprechend den aktuellen Anforderungen an ein TSI PRM gerechtes WC
V_{max}	Zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit
Fa. Voith	Hier Kurzform für die Voith Turbo GmbH & Co. KG
WLAN	Wireless local administration network; drahtloses lokales Netzwerk zur Datenkommunikation
WINK	Wandelbarer, innovativer Nahverkehrskurzzug; Produktbezeichnung der Fa. Stadler
WS	Wechselstrom

Tabelle 12-1: Abkürzungsverzeichnis

13. Literaturquellenverzeichnis

- [1] Riechers, D.: S-Bahn-Triebzüge, Neue Fahrzeuge für Deutschlands Stadtschnellverkehr, S.19, Transpress-Verlag Stuttgart, 2000
- [2] Baur, K.G.: Die elektrischen Nahverkehrstriebzüge der Deutschen Bahn, S. 19, EK-Verlag, 2010
- [3] Felsing, A.: Neuer S-Bahn-Wendezug für den Ballungsraum Rhein-Ruhr, ETR (28), 1979, S.167 - 174
- [4] Güthlein, H.: Die elektrische Lokomotive Baureihe 111 der Deutschen Bundesbahn, EB 47 (1976), H.8, S. 187 - 190
- [5] Hondius, H.: RRX trains are ready to roll, Railway Gazette International, 10/2017, S. 31 - 34
- [6] Hondius, H.: Regional EMU is poised to enter service, Railway Gazette International, 09/2008, S. 613 - 616
- [7] Hörstel, J.: Graphitgrau und Verkehrspurpur, Lok-Magazin 12/ 2014, S. 46 - 53
- [8] Maiwald, S.: Twindexx Vario - Doppelstock-Triebwagenzüge auf Basis von Einzelwagen, Eisenbahntechnische Rundschau 09/2013, S. 32 - 40
- [9] Lochner, G.: Die neuen Baureihen 622 und 620, Eisenbahnkurier 06/2014, S. 36 – 41
- [10] Kottenhahn, V.: Der Dieseltriebzug Baureihe 614, Eisenbahntechnische Rundschau 05/1975, S. 173 - 180
- [11] Kottenhahn, V.: Der neue Dieseltriebzug VT 628.4/VS 928.4 der DB, Eisenbahntechnische Rundschau 06/1994, S. 361 - 368
- [12] Arbeitsmarkaktuell Nr.2/Februar 2016, Publikation des DGB Bundesvorstands auf www.dgb.de
- [13] Seeger, H., Beika, U., Kurzeck, B., Hecht, M.: Potentiale radialeinstellbarer Radsätze am Beispiel des Gliederzuges Integral, Eisenbahntechnische Rundschau 06/2005, S.378 - 388
- [14] Dompke, T., Brunnecker, U.: S-Bahn-Triebzug Kopenhagen – innovatives Konzept für die Zukunft, ZEV+DET Glasers Annalen 04/1998, S. 125 - 136
- [15] Weidmann, U.: Der Fahrgastwechsel im öffentlichen Personenverkehr, Dissertation ETH Nr. 10630, Schriftenreihe des IVT Nr. 99, Mai 1994
- [16] Sommerer, R.: INTEGRAL – ein Gliederzugsystem für den Vollbahnbetrieb, ZEV+DET Glasers Annalen 02/1999, S. 73 - 84
- [17] Riechers, D.: Neue Maßstäbe im Regionalverkehr: INTEGRAL-Triebzug S5D95, Verkehr und Technik 1998, Heft 12, S. 489 – 500
- [18] Hondius, H.: Die S-Bahn Triebzüge der Baureihe 430 der Deutschen Bahn, Stadtverkehr 06/2013, S. 13 – 17
- [19] Der ET 420 der DB, Sonderausgabe 12, die Lokomotivtechnik, herausgegeben von der Gewerkschaft Deutscher Lokomotivführer und Anwärtler, 1. Auflage, 1977
- [20] Obst, S., Löbe, M.: Der Regio Shuttle RS1: Das bewährte, flexibel und wirtschaftlich einsetzbare Schienenfahrzeug für den Regionalverkehr, ZEV Rail, 8/2012, S. 288 – 295
- [21] Falk, P.: Triebzugfamilie Baureihen 423 bis 426 für DB Regio, Elektrische Bahnen 5-6/2000, S. 163 – 173
- [22] Brüggemann, A., Hoffmann, M., Pönisch, T.: Die neuen Treibzüge der BR 422, ZEV Rail 3/2009, S. 84 – 99
- [23] v. Madeyski, T., Möller, K.: Drehgestell LD 761 für S-Bahnwagen, ZEV Glas. Annalen, 04/1979, S. 169 – 175
- [24] Wagner, Wagner, Deppmeyer: Reisezugwagen deutscher Eisenbahnen, Ausgabe 1987, Alba-Verlag
- [25] Feldmann, T.: Baureihe 141, die Knallfrösche, Lok Magazin, 08/2012, S. 32 - 47
- [26] Cohen, P.-Y., Marsone, M., Ciry, B.: Les rames Regio 2N, Revue Générale des Chemins de Fer, 05/2012, S. 38 - 51
- [27] Stolz, T.: Bombardier stellt den Regio 2N für die SNCF vor, Schweizer Eisenbahn Revue, 11/2013, S. 572 - 575
- [28] Ciry, B.: Le STIF, la SNCF et Bombardier révèlent le Francilien, Revue Générale des Chemins de Fer, 02/2010, S. 34 - 45

- [29] Gerber, M., Müller, R.: Die neuen Fahrzeuge für die Züricher S-Bahn, Schweizer Eisenbahn-Revue, 05-06/1989, S. 75 – 103
- [30] Schneider, B.: Fahrzeuge, Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 29, 07/1991
- [31] Fredrich, F. Der Zweiachser, Plädoyer für ein vernachlässigtes Prinzip, ZEV+DET Glas. Ann. 120, 06/1996, S. 223 – 231
- [32] ohne Autor: Stadler lanciert GTW-Nachfolger – Arriva als Erstkunde, Artikel in der Schweizer Eisenbahn Revue, 01/2018, S.2
- [33] Bedienungshandbuch für die Fahrzeuge VT 646.0, Ausgabe 01, ohne Datum, ohne Dokumentennummer
- [34] Prospekt des Konsortiums S-Tog für DSB der Firmen LHB und Siemens, ohne Datum, ohne Dokumentennummer
- [35] Richer, D.: Regionaltriebswagen, Neue Fahrzeuge für Deutschlands Nahverkehr, Transpress Verlag, ISBN 3-613-71089-7, 1.Auflage 1998
- [36] Fischer, H., Reiß, G.: Der neue Dieseltriebzug VT 628.4/VS 928.4 der Deutschen Bundesbahn – Meilenstein einer konsequenten Entwicklungslinie, ZEV + DET Glas. Ann. 117; 2/3 1993, Seite 60 – 68
- [37] S-Bahn Berlin, der neue Triebzug ET 480, Hestra-Verlag, ISBN 3-7771-0226-1, Ausgabe 1990
- [38] Ernst, G., Schulz, W.: Elektrische Ausrüstung der Triebzüge Baureihe 481/482 für die S-Bahn Berlin; Elektrische Bahnen 95, 5/1997, S. 111 – 122
- [39] Rappenglück, W., Wegener, P., Eikermann, J.: Der Gleichstrom-Triebzug ET 472/473 der Hamburger S-Bahn, BBC-Druckschrift D VK 60224 D; Sonderdruck aus Elektrische Bahnen, Heft 3/1975, 1/1976, 12/1976
- [40] Aust, J., Heidrich, P.: ET 47.3 – Zweisystem-Triebzüge für die S-Bahn Hamburg, Elektrische Bahnen 107, 12/2007, S. 640 – 646
- [41] Kirchner, H.-J., de Oliveira Ballejo, J., Künzel, T., Paeßens, C.: Ein-und Zweisystem-Triebzüge BR 490 für die Hamburger S-Bahn, Elektrische Bahnen 114, 1-2/2016, S. 64 – 82
- [42] Kopp, M.: Desiro ML – Die modulare Fahrzeugplattform für den Regionalverkehr, ZEV Rail 134, 2010, Tagungsband SFT, S. 26 – 31
- [43] Bender, B., Derdulla, T., Genersch, J.: Talent 2 – fit für die Zukunft, ZEV Rail 131, 9/2007, S. 340 – 351
- [44] Kache, M., Günther, S.: Brennstoffzellen in Schienenfahrzeugantrieben, EI-Spezial Fahrzeuge, 09/2017, S. 26 – 31
- [45] Bäzold, D., Fiebig, G.: Deutsches Lok-Archiv, Elektrische Lokomotiven, Transpress-Verlag, ISBN 3-344-70717-5, Ausgabe 1992
- [46] Thun, M., Hofman, A.: Betriebsaufnahme der Triebwagen Baureihe 620/622 im Dieselnetz Köln, ZEV Rail 139, 5/2015, S. 178 – 182
- [47] Riechers, D.: Neue Maßstäbe im Regionalverkehr: INTEGRAL-Triebzug S5D95, Verkehr und Technik, 12/1998, S. 489 – 500
- [48] Datenblatt der Fa. MTU/Tognum: PowerPacks with 6H1800 for Rail Applications, MIM 23107(522E) von 01/2006
- [49] DB Regio präsentiert Link-Dieseltriebzüge von Pesa; Artikel in der Eisenbahn-Revue International, 8/9 2018, S. 437, kein benannter Autor
- [50] Ballo, L.: Wann ist ein lokomotivbespannter Reisezug wirtschaftlicher als ein Triebzug?, Schweizer Eisenbahn-Revue 4/2017, S. 172 – 176
- [51] Hanstein, R.: Die Eisenbahn in der „säkularen Stagnation“, Schweizer Eisenbahn-Revue 8/9 2018, S. 408 – 410
- [52] Rüger, B., Matzenberger, P., Benz, V.: KundInnen gerechte Reisegepäckbeförderung, Eisenbahntechnische Rundschau 7/8 2015, S. 75 – 79
- [53] Rüger, B., Tuna, D.: Fahrzeugseitige Optimierungspotentiale zur Verkürzung der Haltezeit, Eisenbahntechnische Rundschau 9/2008, S. 526 – 532
- [54] Rüger, B., Ostermann, N.: Der Innenraum von Reisezugwagen – Gratwanderung zwischen Sinn und Effizienz, Eisenbahntechnische Rundschau 3/2015, S. 38 – 44

- [55] Infrastrukturdaten der DB Netz AG unter <http://data.deutschebahn.com/dataset/data-bahnsteig>
- [56] bleibt frei
- [57] bleibt frei
- [58] ohne Autor: Alternativkonzept für Bahnsteighöhen in Baden-Württemberg, Eisenbahn-Revue International 06/2018, S. 326
- [59] ohne Autor: Vollelektrifizierung für Baden-Württemberg, Elektrische Bahnen 116, Heft 4-5/2018, S. 119 - 122
- [60] Koschinski, K.: 75 Jahre Berliner S-Bahn, Bahnprofil 13, S.6 – 20
- [61] ohne Autor: Unternehmensdarstellung der S-Bahn Hamburg GmbH, Präsentation aus 2011
- [62] Hondius, H.: Cityjet takes a bow, Railway Gazette International, 12/2015, S. 44 – 46
- [63] Wiegleb, M.: Stadler landet in Afrika, 64 Flirt-Triebzüge für die SNTF, Schweizer Eisenbahn-Revue, 5/2009, S. 232 – 238
- [64] Dostal, M.: Triebwagen und Triebzüge, GeraMond Verlag, 2018, ISBN 978-3-95613-062-5
- [65] DB Netze, Infrastrukturregister: GeoViewer DB Netze Fahrweg, Stand 2018
- [66] Kurzeck, B., Kaiser, I.: Running dynamics concept with mechatronic guidance, RTR Special – NGT, 2011, S. 30 – 36
- [67] ohne Autor: ODEG, Willkommen im Netz Stadtbahn, Präsentation auf der VBB Regionalkonferenz Potsdam, 15.02.2010
- [68] ohne Autor: Desiro ML – Cityjet eco, Elektrische Bahnen 116/2018, Heft 10, S. 382 – 383
- [69] Klebsch, W., Heininger, P., Geder, J., Hauser, A.: VDE-Studie - Batteriesysteme für Schienentriebzüge, August 2018
- [70] ohne Autor: Akkumulatortriebwagen der Deutschen Bundesbahn, Baureihe ETA 150 mit Steuerwagen, Baureihe ESA 150, BZA München
- [71] Wittig, P.: Der wagenbauliche Teil vom Akkumulator-Triebwagen ETA 150 und vom Steuerwagen ESA 150, Glasers Annalen, Jan. 1961, S. 11 - 20
- [72] Pleger, J.: Wirtschaftliche elektrische Triebwagen – Potential und Realisierung, Eisenbahntechnische Rundschau H. 7/8 1993, S. 475 485
- [73] ohne Autor: ÖBB-Desiro mit zusätzlichem Batterieantrieb vorgestellt, Schweizer Eisenbahn-Revue, 11/2018, S. 576
- [74] ohne Autor: Bombardier stellt Talent 3 mit Batterie-Zusatzantrieb vor, Schweizer Eisenbahn-Revue, 11/2018, S. 578
- [75] ohne Autor: SteamTrac prototype starts test running, Railway Gazette International 07/2011, S. 55 – 57
- [76] Jackson, C.: Charge of the battery brigade, Railway Gazette International, 11/2018, S. 53 – 56
- [77] Bunzel, A., Richter, S., Morawietz, L., Bäker, B.: Was Busbatterien schneller altern lässt, Der Nahverkehr, 04/2018, S. 12 – 15
- [78] v. Mach, S., Buschbeck, J., Flerlage, H., Zimmermann, U., Boev, P.: Die Entwicklung und Markteinführung des Talent 3 Batterietriebzuges
- [79] Riepe, S.: Keine Energiewende ohne Wasserstoff, Verkehr und Technik 07.18, S. 265 – 266
- [80] ohne Autor: iLint: im Betrieb „deutlich“ wirtschaftlicher, Eisenbahn-Ingenieur 11/2018, S.50
- [81] Lochner, G: Die neuen Baureihen 622 und 620, Coradia LINT 54&81, Eisenbahn-Kurier 06/2014
- [82] ohne Autor: Das Fachwort im Verkehr, Alba Fachverlag, Ausgabe 2006, ISBN 3-87094-665-2
- [83] Richers, D.: LIREX, mehr als eine Studie?, Verkehr und Technik 2002, Heft 1, S. 3 - 14
- [84] Marek, H., Dürschmied, F., Jäke, R.: ET 2000 TT – ein Technologieträger für den elektrisch betriebenen Regionalschnellbahnverkehr aus der DWA, Eisenbahntechnische Rundschau H. 7/8 1997, S. 413 - 418
- [85] Pleger, J., Karch, S., Trobitzsch, C.: Regionalschnellbahn 2000, Schlussbericht des IFB-Instituts für Bahntechnik im Auftrag der Deutschen Bundesbahn, April 1992
- [86] Brinkmann, A. Kasprzyk, T.: Innovative „Rad-Sätze“ für moderne Niederflur-Schienenfahrzeuge, ZEV Rail Glasers Annalen 131, Tagungsband SFT Graz 2007, S. 211 - 223

- [87] Firmenprospekt Fa. Alstom: Lirex, die Innovation des Personenverkehrs für Morgen, ohne Dokumentennummer und ohne Datum
- [88] Lenhard, D., Engel, B., Langwost, J., Söffker, C.: Elektrische Ausrüstung des Triebzuges LIREX Baureihe 618/619 für DB Regio, Elektrische Bahnen 98, Heft 8/2000, S. 279 – 289
- [89] bleibt frei
- [90] Bundesarbeitsgemeinschaft der Aufgabenträger des SPNV e.V.: Empfehlungen für Anforderungen an Fahrzeuge in Vergabeverfahren für Mitglieder der BAG -SPNV, 3. Ausgabe, März 2016
- [91] Wirkt in einem Zug, Radsatzgetriebe für Schienenfahrzeuge, Firmenprospekt der Fa. Voith GmbH & Co. KGaA, ohne Dokumentennummer, 2018
- [92] Häfner, F., Maier, M., Mittmann, U., Schäfer, L.: Elektrische Ausrüstung der Dieseltriebzüge Baureihe 610 der Deutschen Bundesbahn, Elektrische Bahnen 91, 7/1993, S. 228 - 236
- [93] Häfner, F., Maier, M., Mittmann, U., Schäfer, L.: Elektrische Ausrüstung der Dieseltriebzüge Baureihe 610 der Deutschen Bundesbahn, Elektrische Bahnen 91, 8/1993, S. 265 – 271
- [94] Mobilitätsdaten, veröffentlicht unter www.allianz-pro-schiene.de
- [95] Schulte, K.: Verkehrsentwicklung im SPNV NRW bis 2030, Vortrag am 06.02.2015 in Düsseldorf
- [96] Knothe, K.: Skript „Lateraldynamik von Schienenfahrzeugen“ vom November 1981 zur Vorlesung „Dynamik von Schienenfahrzeugen“ an der TU Berlin, S. 50 -53
- [97] Schätzer, C., Hetzelt, P., Still, L.: Last Mile – die neue Funktion der TRAXX AC3-Lokomotiven, Elektrische Bahnen 110, 8-9/2012, S. 432 - 442
- [98] Lurje, A.: Räumliche Probleme der Elastizitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin, 1963, ergänzte Ausgabe, Bestellnummer 5497
- [99] Gieck, K.: Technische Formelsammlung, 29. Auflage 1989, ISBN 3 920379 17 9
- [100] Statistisches Bundesamt (Destatis), Fachserie 8, Reihe 1.1, Verkehr aktuell 01/2019
- [101] Lichtenberger, B.: Handbuch Gleis, Eurailpress-Verlag, 3. Auflage, ISBN 978-3-7771-0400-3
- [102] Zámbo, G., Olovssen, J., Buchholz, K.-H.: Zweite Doppellokomotiv-Serie für die nordskandinavische Erzbahn – Teil 1: Bau und Technik, Elektrische Bahnen 108, 5/2010, S. 214 – 222
- [103] Ciry, B.: Les Regio 2N V200 de la région Pays de la Loire s`adaptent au tourisme à vélo, Revue Générale des Chemins de Fer, 12/2018, S. 76 - 80
- [104] Bröcker, M.: Moving Space, Flexibles Raumangebot im regionalen Schienenverkehr, Diplomarbeit an der Kunsthochschule in der Universität Kassel, 2009
- [105] Plomer, J.: Entwicklung eines Doppelstocktriebzugs mit speziellem Fahrwerk, ZEVrail 141 (2017), Tagungsband SFT Graz 2017, S. 36 - 42

14. Herangezogene Normen und Richtlinien

Kurzbezeichnung	Titel	Ausgabe
DIN 25008	Schienenfahrzeuge, Grundsätze für die Bestimmung der Fahrzeugmassen – Begriffe, Formelzeichen, Werte	Oktober 2005
DIN EN 12663-1	Bahnanwendungen – Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen – Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge	März 2015
DIN EN 13262	Bahnanwendungen – Radsätze und Drehgestelle – Räder - Produkthanforderungen	Juni 2011
DIN EN 15227	Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugkästen	Januar 2011
DIN EN 15273-1	Bahnanwendungen – Begrenzungslinien – Teil 1: Allgemeines – Gemeinsame Vorschriften für Infrastruktur und Fahrzeuge	Oktober 2017
DIN EN 15437-1	Bahnanwendungen – Zustandsüberwachung von Radsatzlagern – Schnittstellen und Gestaltungsanforderungen Teil 1: Heißläuferortungsanlagen und Radsatzlagergehäusegestaltung	Juni 2010
DIN EN 15528	Bahnanwendungen – Streckenklassen zur Behandlung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur	Januar 2016
DIN EN 15663	Bahnanwendungen – Fahrzeugreferenzmassen	September 2017
EBO	Eisenbahnbau- und Betriebsordnung	26.07.2017
EU 1300/2012	Verordnung der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich der Zugänglichkeit des Eisenbahnsystems der Union für Menschen mit Behinderungen und Menschen mit eingeschränkter Mobilität (TSI PRM)	18.11.2014
Richtlinie 821.2001 der DB	Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleismessfahrzeugen	01.10.2010
UIC 510-2	Wagen. Bedingungen für die Verwendung von Rädern verschiedener Durchmesser in Laufwerken unterschiedlicher Bauart	4. Ausgabe, Oktober 2002

Tabelle 14-1: Übersicht der herangezogenen oder zitierten Normen

15. Abbildungsverzeichnis

- Abb.1-1: Anteile der Verkehrsträger am Personenverkehr in Prozent; Quelle: Internet-Veröffentlichung von „Allianz pro Schiene“ [94]
- Abb. 1-2: Entwicklung der Fahrgastzahlen und der Verkehrsleistung des SPNV in Deutschland [100]
- Abb. 1-3: Nachfrage- und Angebotsentwicklung in NRW für den SPNV, Darstellung in Anlehnung an [95]
- Abb. 1-4: Interessenanteile an einem Fahrzeug
- Abb. 2-1: Übersicht der Fahrzeuggattungen des schienengebundenen Nah- und Regionalverkehrs in Deutschland
- Abb. 2-2: Gegenüberstellung der betrachteten Fahrzeugkonzepte
- Abb. 2-3: Kapazitätsvergleich S-Bahn-Fahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 2-1 und 2-2
- Abb. 2-4: längenbezogener Kapazitätsvergleich S-Bahn-Fahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 1 und 2
- Abb. 2-5: Kapazitätsvergleich für elektrisch angetriebene Regionalbahnfahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 2-3 und 2-4
- Abb. 2-6: längenbezogener Kapazitätsvergleich für elektrisch angetriebene Regionalbahnfahrzeuge gemäß den Werten aus Tabelle 2-3 und 2-4
- Abb. 2-7: Kapazitätsvergleich für Regionalbahnfahrzeuge mit Brennkraftantrieb gemäß den Werten aus Tabelle 2-5
- Abb. 2-8: längenbezogener Kapazitätsvergleich für Brennkrafttriebwagen gemäß den Werten aus Tabelle 2-5
- Abb. 2-9: längenbezogener Kapazitätsvergleich der Fahrzeuge nach Einsatzgebiet
- Abb. 2-10: längenbezogener Kapazitätsvergleich der Fahrzeuge nach Einsatzgebiet, hier nur einstöckige Fahrzeuge
- Abb. 2-11: längenbezogener Kapazitätsvergleich aller betrachteten Fahrzeuge
- Abb. 2-12: Vergleich der Anzahl Sitzplätze bzw. der Gesamtplätze pro Türspur für alle betrachteten Fahrzeugarten nach Tabelle 2-1 bis 2-5
- Abb. 2-13: Vergleich der Anzahl Sitzplätze bzw. der Gesamtplätze pro Türspur, aufgeteilt nach Fahrzeugtyp gem. Abb. 2-2
- Abb. 2-14: Vergleich der Anzahl Sitzplätze und der Gesamtplätze pro Türspur nach Einsatzgebiet der Fahrzeuge
- Abb. 2-15: Kapazitätsvergleich zweier Mittelwagen der BR 442/1442
- Abb. 2-16: Vergleich der Sitzplatzanordnung für das Fahrzeug vom Typ Regio Shuttle RS1, Darstellung in Anlehnung an [35]
- Abb. 2-17: Vergleich Leermasse in t pro Sitzplatz für S-Bahn-Fahrzeuge
- Abb. 2-18: Vergleich Leermasse in t pro Anzahl der Gesamtplätze für S-Bahn-Fahrzeuge
- Abb. 2-19: Vergleich Leermasse in t pro Sitzplatz für elektrisch angetriebene Regionalbahn-Fahrzeuge
- Abb. 2-20: Vergleich Leermasse in t pro Anzahl der Gesamtplätze für elektrisch angetriebene Regionalbahn-Fahrzeuge
- Abb. 2-21: Vergleich Leermasse in t pro Sitzplatz für Brennkrafttriebwagen
- Abb. 2-22: Vergleich Leermasse in t pro Anzahl der Gesamtplätze für Brennkrafttriebwagen
- Abb. 2-23: Gegenüberstellung der bezogenen Massen
- Abb. 2-24: Gegenüberstellung der bezogenen Masse in t/m für alle betrachteten Fahrzeuge nach Tabelle 2-1 bis 2-5
- Abb. 2-25: Gegenüberstellung der bezogenen Massen für alle betrachteten Fahrzeuge nach Tabelle 2-1 bis 2-5 nach Fahrzeugtyp
- Abb. 2-26: Darstellung der Sitzplätze über Leermasse nach Einsatzgebiet der betrachteten Fahrzeuge
- Abb. 2-27: Darstellung der Gesamtplätze über Leermasse nach Einsatzgebiet der betrachteten Fahrzeuge
- Abb. 2-28: Gegenüberstellung der ergänzenden drei Fahrzeugkonzepte

- Abb. 2-29: Längenbezogener Kapazitätsvergleich der Fahrzeuge aus Tabelle 2-7.1 und 2-7.2
- Abb. 2-30: Vergleich der Sitzplätze und Gesamtplätze pro Türspur der Fahrzeugtypen von Tabelle 2-7.1 und 2-7.2
- Abb. 2-31: Querschnitt S-Bahn Kopenhagen, Ausschnitt aus [34]
- Abb. 2-32: Vergleich der bezogenen Massen der Fahrzeugtypen von Tabelle 2-7.1 und 2-7.2
-
- Abb. 3-1: Effizienz der betrachteten Fahrzeuge nach Anwendung der Gleichung 3 für alle Fahrzeugkonzepte
- Abb. 3-2: Effizienz der betrachteten Fahrzeuge nach Anwendung der Gleichung 3, sortiert nach Effizienz mit Darstellung der drei Anteile A, B und C
- Abb. 3-3: Effizienz der betrachteten Gleichstrom-S-Bahnen
- Abb. 3-4: Effizienz der betrachteten Wechselstrom-S-Bahnen
- Abb. 3-5: Effizienz der betrachteten elektrisch angetriebenen Regionalbahnfahrzeuge
- Abb. 3-6: Effizienz der betrachteten Brennkrafttriebwagen
- Abb. 3-7: Effizienz der Fahrzeuge bestehend aus Lokomotive und einstöckigen oder doppelstöckigen Wagen sowie der Triebfahrzeuge mit Doppelstockanteil
- Abb. 3-8: Gesamtdarstellung der Effizienz der betrachteten Fahrzeuge nach Traktionsart
- Abb. 3-9: Effizienz der aktuell zulassungsfähigen Regionalbahnfahrzeuge
-
- Abb. 4-1: Vergleich der kinematischen Begrenzungslinien nach EN 15273-1
- Abb. 4-2: Überlagerung der kinematischen Begrenzungslinien nach EN 15273-1 aus Abb.4-1
- Abb. 4-3: Strecken in Deutschland mit erweiterter kinematischer Begrenzungslinie DE2 nach [65]
- Abb. 4-4: Strecken in Deutschland mit erweiterter kinematischer Begrenzungslinie GC nach [65]
- Abb. 4-5: Schnellfahrstrecken in Deutschland nach [65]
- Abb. 4-6: Streckenklassen in Deutschland nach [65]
- Abb. 4-7: Strecken in Deutschland mit elektrischer Energieversorgung nach [65]
- Abb. 4-8: Zugsicherungssysteme in Deutschland nach [65]
-
- Abb. 5-1: Spezifische Leistung in kW pro Sitzplatz für alle betrachteten Fahrzeuge
- Abb. 5-2: Spezifische Leistung bezogen auf die Fahrzeugleermasse, Angaben in kW/t
-
- Abb. 7-1: Darstellung der Ergebnisse aus Tabelle 5-4
- Abb. 7-2: Beispielhafte Visualisierung der Variante 1a aus Tabelle 7-8.1
- Abb. 7-3: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-7 für einstöckige Triebwagen
- Abb. 7-4: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-7 für einstöckige Triebwagen
- Abb. 7-5: Beispielhafte Visualisierung der Variante 1a aus Tabelle 7-10.1
- Abb. 7-6: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-9 für Doppelstockwagen
- Abb. 7-7: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-9 für Doppelstockwagen und Berücksichtigung einer Lokomotive
- Abb. 7-8: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-9 für Doppelstockwagen und Berücksichtigung einer Lokomotive (links: Wagenanzahl gem. Tabelle 7-9, rechts doppelte Wagenanzahl)
- Abb. 7-9: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-12 für Doppelstocktriebwagen
- Abb. 7-10: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Tabelle 7-14 für kombinierte ein- und zweistöckige Triebwagen
- Abb. 7-11: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Kapitel 7
- Abb. 7-12: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Kapitel 7, jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Wertes C für die Türspuren
- Abb. 7-13: Visualisierung der Ergebnisse für alle Varianten aus Kapitel 7, hier jedoch ausschließlich Wert A für die Masse pro Sitzplatz
-
- Abb. 8-1: Variante 1, Einzelwagen, jeweils im Spießgang

- Abb. 8-2: Variante 2a: Wagen mit Jakobsdrehgestellen (mittleres Drehgestell in der Außensehnenstellung)
- Abb. 8-3: Variante 2b: Wagen mit Jakobsdrehgestellen (mittleres Drehgestell im Spießgang)
- Abb. 8-4: Variante 3a: Wagen mit einem Jakobs- und einem Enddrehgestell (mittiges Drehgestell in der Außensehnenstellung)
- Abb. 8-5: Variante 3b: Wagen mit einem Jakobs- und einem Enddrehgestell (mittiges Drehgestell im Spießgang)
- Abb. 8-6: Drehgestellversatz im 120 m Bogen für Variante 1 und Auswirkung auf den Durchgang zwischen zwei Wagen
- Abb. 8-7: Drehgestellversatz im 120 m Bogen für Variante 2 und 3 und Auswirkung auf den Durchgang zwischen zwei Wagen
- Abb. 8-8: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells bei 840 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-9: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells bei 760 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-10: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells bei 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-11: Freiraum zwischen den Rädern des Drehgestells ohne Bremsanlage bei 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-12: Wagenübergangsbereich bei Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-13: Innenhöhen bei Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-14: mögliches Fahrzeuglayout unter Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-15: Variante Fahrzeuglayout unter Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-16: Variante Fahrzeuglayout unter Verwendung eines Jakobsdrehgestells mit 550 mm Raddurchmesser
- Abb. 8-17: mögliche Varianten eines Fahrzeuglayouts unter Verwendung von Jakobsdrehgestellen mit 550 mm Raddurchmesser im Vergleich
- Abb. 8-18: Drehgestell-Grob-Entwurf, grundsätzliche Anordnung ohne Anbauteile (wie z.B. Bremsanlage, Antrieb, Dämpfer, etc.), Seitenansicht und Aufsicht
- Abb. 8-19: Drehgestell-Grob-Entwurf aus Abb. 8-18 mit vereinfachter Begrenzungslinie entsprechend der unteren Bezugslinie aus der EBO (Anlage 8 zu § 22, Bild 3), Frontansicht
- Abb. 8-20: Variante zum Drehgestell-Grob-Entwurf aus Abb. 8-18 mit innengelagerten Radsätzen, vereinfachte Begrenzungslinie entsprechend der unteren Bezugslinie aus der EBO (Anlage 8 zu § 22, Bild 3), Frontansicht
- Abb. 8-21: Fahrzeugquerschnitte für Doppelstockwagens bei Ausnutzung der kinematischen Fahrzeugbegrenzungslinie GC nach EN 15273-1 im Bereich des Wagenübergangs
- Abb. 8-22: Nutzbare Innenraumhöhen bei Doppelstockwagen mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung
- Abb. 8-23: Fahrzeuglayout eines Doppelstockwagens mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung
- Abb. 8-24: Fahrzeuglayout eines Doppelstockwagens mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung (hier ohne PRM-Bereiche) Abb. 8-26: Fahrzeuglayout eines Doppelstock-Endwagens mit großen Rädern unterhalb des Führerraumes und kleinen Rädern sowie außermittiger Übergangsanordnung am hinteren Wagenende
- Abb. 8-25: Fahrzeuglayout eines Doppelstock-Endwagens mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung
- Abb. 8-26: Fahrzeuglayout eines Doppelstock-Endwagens mit großen Rädern unterhalb des Führerraumes und kleinen Rädern sowie außermittiger Übergangsanordnung am hinteren Wagenende
- Abb. 8-27: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung
- Abb. 8-28: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern und außermittiger Übergangsanordnung

- Abb. 8-29: bleibt frei
- Abb. 8-30: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern, außermittiger Übergangsanordnung und Ausstattung analog KISS für die ODEG
- Abb. 8-31: Fahrzeuglayout eines vollständigen Doppelstock-Triebzuges mit kleinen Rädern, außermittiger Übergangsanordnung und Ausstattung analog KISS für die ODEG, jedoch mit weniger Klappsitzen
- Abb. 8-32: Darstellung verschiedener Formen von Radsatzgetrieben (Quelle der Illustrationen: Fa. Voith GmbH, [91])
- Abb. 8-33: bleibt frei
- Abb. 8-34: schematische Darstellung eines Achsantriebes, basierend auf Abb. 8-18 für ein Drehgestell
- Abb. 8-35: Darstellung von zwei Fahrzeugvarianten der Regionalschnellbahn 2000 aus [85]
- Abb. 8-36: Darstellung des LIREX- Halbzuges der Fa. Alstom, Quelle: Firmenprospekt Alstom [87]
- Abb. 8-37: Prinzipielle Darstellung der Variante 1 aus Tabelle 8-11
- Abb. 8-38: Prinzipielle Darstellung der Variante 2 aus Tabelle 8-11
- Abb. 8-39: Gegenüberstellung eines optimierten Türbereiches nach [52], [53] und [54] im Vergleich mit einem konventionellen Einstieg
- Abb. 8-40: Fahrradstellplätze im Triebzug Rock für Trenitalia
- Abb. 8-41: teilweise ungünstige Fahrradstellplätze im Regio 2N V200 [103]
- Abb. 8-42: typische Zugangssituation vor dem Fahrzeug [103]
- Abb. 8-43: Fahrradabstellung im Untergeschoß vom Regio 2N V200 [103]
- Abb. 8-44: Bandbreite von Fahrradabmessungen [104]
- Abb. 8-45: theoretisch mögliche Fahrradabstellung in einem Fahrzeugbereich [104]
- Abb. 8-46: verwendete Fahrradabmessungen
- Abb. 8-47: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 1)
- Abb. 8-48: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 2)
- Abb. 8-49: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 3)
- Abb. 8-50: Layout für einen Doppelstockwagen für Fahrradtransport (Variante 4)
- Abb. 9-1: Dieseltriebzug IC3 der DSB (Bildquelle: Prospekt Fa. Alusuisse)
- Abb. 9-2: englischer Triebzug Electrostar, Baureihe 375/377 (Bildquelle: Prospekt Fa. Bombardier)

16. Anlagen

16.1 Übersicht zu den bezogenen Werten im Kapitel 2 und 3

Bauart/ Baureihe	Typ	Sitzplätze / m	Gesamtplätze / m	Sitzplätze / Türspur	Gesamtplätze / Türspur	Masse / Sitzplatz in t	Masse / m in t/m	Masse in t / Gesamtplätze	A Masse pro Sitzplatz in t	B Masse pro Meter in t/m	C Sitzplätze / Türspur	Effizienz E
480	2	2,61	7,93	8,00	24,33	0,63	1,63	0,21	1,25	1,63	0,80	3,68
481/482	2	2,55	7,99	7,83	24,50	0,63	1,60	0,20	1,26	1,60	0,78	3,64
483 (2-teilig)	2	2,17	7,28	6,67	22,33	0,78	1,68	0,23	1,55	1,68	0,67	3,90
484 (4-teilig)	2	2,50	7,99	7,67	24,50	0,66	1,64	0,21	1,32	1,64	0,77	3,73
485/885	2	2,76	8,40	6,25	19,00	0,60	1,66	0,20	1,20	1,66	0,63	3,48
472/473	2	2,98	7,60	8,91	22,73	0,58	1,74	0,23	1,17	1,74	0,89	3,80
474/874	2	3,15	7,74	11,56	28,39	0,48	1,52	0,20	0,96	1,52	1,16	3,63
474/874	2	3,15	7,74	11,56	28,39	0,51	1,61	0,21	1,02	1,61	1,16	3,78
490/1490	2	2,88	7,11	10,56	26,06	0,67	1,93	0,27	1,34	1,93	1,06	4,32
490/1490	2	2,88	7,11	10,56	26,06	0,70	2,03	0,29	1,41	2,03	1,06	4,49
420	2	2,88	6,80	8,08	19,08	0,79	2,28	0,34	1,59	2,28	0,81	4,68
422	3	2,77	7,66	8,00	22,17	0,58	1,61	0,21	1,17	1,61	0,80	3,58
423	3	2,85	8,07	8,00	22,67	0,55	1,56	0,19	1,09	1,56	0,80	3,45
424	3	3,05	6,70	12,88	28,25	0,55	1,68	0,25	1,10	1,68	1,29	4,07
430	3	2,69	7,23	7,67	20,58	0,65	1,74	0,24	1,29	1,74	0,77	3,80
442	3	3,06	6,47	18,42	39,00	0,61	1,87	0,29	1,22	1,87	1,84	4,93
1442 (3-teilig)	3	2,67	6,07	18,75	42,63	0,71	1,90	0,31	1,43	1,90	1,88	5,21
1442 (4-teilig)	3	2,77	6,13	16,67	36,92	0,68	1,87	0,30	1,35	1,87	1,67	4,88
1442 (5-teilig)	3	3,25	6,36	28,70	56,20	0,57	1,85	0,29	1,14	1,85	2,87	5,86
Lok plus 3 Do-Wagen	7	3,28	7,14	20,44	44,50	0,70	2,30	0,32	1,40	2,30	2,04	5,74
Lok plus 5 Do-Wagen	7	3,67	7,78	23,46	49,71	0,57	2,11	0,27	1,15	2,11	2,35	5,60
Lok plus 3 x-Wagen	6	2,44	5,94	12,33	30,06	0,76	1,86	0,31	1,53	1,86	1,23	4,63

Bauart/ Baureihe	Typ	Sitzplätze / m	Gesamtplätze / m	Sitzplätze / Türspur	Gesamtplätze / Türspur	Masse / Sitzplatz in t	Masse / m in t/m	Masse in t / Gesamtplätze	A Masse pro Sitzplatz in t	B Masse pro Meter in t/m	C Sitzplätze / Türspur	Effizienz E
Lok plus 3 x-Wagen	6	2,73	6,54	12,73	30,50	0,59	1,61	0,25	1,18	1,61	1,27	4,07
ET 425	3	3,05	6,43	12,88	27,13	0,55	1,68	0,26	1,10	1,68	1,29	4,07
ET 426	3	2,74	5,81	12,50	26,50	0,63	1,73	0,30	1,27	1,73	1,25	4,25
Desiro ML	2	3,55	6,94	21,00	41,00	0,53	1,88	0,27	1,06	1,88	2,10	5,03
427 (Flirt)	3	2,67	5,44	24,10	49,20	0,60	1,60	0,29	1,20	1,60	2,41	5,22
Flirt (DB Regio)	3	2,97	6,06	33,75	68,75	0,58	1,72	0,28	1,16	1,72	3,38	6,25
Flirt 3 (Veolia)	3	2,70	6,55	19,75	48,00	0,72	1,95	0,30	1,44	1,95	1,98	5,36
Flirt 6 (Veolia)	3	3,12	6,53	27,75	58,17	0,54	1,67	0,26	1,08	1,67	2,78	5,52
Flirt 4 (DB Regio)	3	3,01	5,96	28,13	55,63	0,59	1,78	0,30	1,18	1,78	2,81	5,77
Coradia Continental (3-teilig)	3	3,46	6,57	33,33	63,33	0,57	1,96	0,30	1,13	1,96	3,33	6,42
Coradia Continental (4-teilig)	3	3,56	6,68	33,00	62,00	0,52	1,86	0,28	1,05	1,86	3,30	6,21
Coradia Continental (5-teilig)	3	3,62	6,75	32,80	61,20	0,50	1,81	0,27	1,00	1,81	3,28	6,09
Coradia BR 1440 (4-teilig)	3	2,62	6,13	24,00	56,13	0,75	1,96	0,32	1,50	1,96	2,40	5,86
iLINT	2	3,32	7,08	22,50	48,00	0,51	1,70	0,24	1,02	1,70	2,25	4,97
BR 442 (2-teilig)	3	2,97	5,69	29,75	57,00	0,65	1,92	0,34	1,29	1,92	2,98	6,19
BR 442 (3-teilig)	3	2,85	6,25	26,67	58,50	0,67	1,90	0,30	1,34	1,90	2,67	5,91
BR 442 (4-teilig)	3	3,46	6,50	31,25	58,75	0,55	1,89	0,29	1,10	1,89	3,13	6,12
BR 442 (5-teilig)	3	3,39	6,58	30,00	58,20	0,55	1,85	0,28	1,09	1,85	3,00	5,94
BR 141 plus 3 n-Wagen	6	2,76	-	23,82	-	0,61	1,70	-	1,23	1,70	2,38	5,31
BR 141 plus 5 n-Wagen	6	3,10	-	24,11	-	0,49	1,51	-	0,97	1,51	2,41	4,89
RRX (Desiro HC)	9	3,80	8,19	20,00	43,10	0,50	1,88	0,23	0,99	1,88	2,00	4,87
KISS (Odeg, 4-teilig)	8	4,07	-	26,75	-	0,48	1,96	-	0,96	1,96	2,68	5,59
445 (4-teilig)	8	3,32	-	21,88	-	0,65	2,16	-	1,30	2,16	2,19	5,65
445 (4-teilig)	8	3,98	-	26,25	-	0,54	2,16	-	1,09	2,16	2,63	5,87
446 (5-teilig)	8	3,81	-	25,20	-	0,55	2,09	-	1,10	2,09	2,52	5,70

Bauart/ Baureihe	Typ	Sitzplätze / m	Gesamtplätze / m	Sitzplätze / Türspur	Gesamtplätze / Türspur	Masse / Sitzplatz in t	Masse / m in t/m	Masse in t / Gesamtplätze	A Masse pro Sitzplatz in t	B Masse pro Meter in t/m	C Sitzplätze / Türspur	Effizienz E
Regio Shuttle RS 1	1	2,92	6,07	18,50	38,50	0,57	1,66	0,27	1,14	1,66	1,85	4,64
Regio Shuttle RS1	1	3,16	6,56	19,75	41,00	0,53	1,68	0,26	1,06	1,68	1,98	4,72
BR 640, Lint (1-teilig)	1	2,68	5,21	18,25	35,50	0,56	1,50	0,29	1,12	1,50	1,83	4,45
BR 614 (3-teilig)	2	2,87	-	22,80	-	0,54	1,56	-	1,09	1,56	2,28	4,93
BR 628.4	2	3,15	-	36,50	-	0,48	1,52	-	0,96	1,52	3,65	6,13
BR 642 Desiro Classic	3	2,95	5,11	30,75	53,25	0,55	1,64	0,32	1,11	1,64	3,08	5,82
BR 648.0, Lint (2-teilig)	3	3,09	5,55	32,25	58,00	0,50	1,55	0,28	1,01	1,55	3,23	5,79
BR 648.1, Lint (2-teilig)	3	3,11	5,67	32,50	59,25	0,51	1,59	0,28	1,02	1,59	3,25	5,86
BR 648.2, Lint (2-teilig)	3	3,06	5,62	32,00	58,75	0,51	1,55	0,28	1,02	1,55	3,20	5,77
BR 648.3, Lint (2-teilig)	3	3,28	6,36	34,25	66,50	0,49	1,60	0,25	0,98	1,60	3,43	6,01
BR 620 (3-teilig)	2	3,71	7,49	25,00	50,50	0,46	1,71	0,23	0,92	1,71	2,50	5,13
BR 622 (2-teilig)	2	3,32	7,08	22,50	48,00	0,54	1,81	0,26	1,09	1,81	2,25	5,14
BR 646.0 GTW 2/6 (DB Regio)	4	2,79	5,48	27,00	53,00	0,50	1,40	0,25	1,00	1,40	2,70	5,10
BR 646.1 GTW 2/6 (UBB)	4	3,26	5,61	31,50	54,25	0,43	1,40	0,25	0,86	1,40	3,15	5,40
BR 646.0 GTW 2/6 (Odeg)	4	2,45	6,31	25,00	64,50	0,70	1,71	0,27	1,40	1,71	2,50	5,61
BR 643	3	2,80	5,87	22,83	47,83	0,53	1,49	0,25	1,07	1,49	2,28	4,84
BR 644	3	3,09	5,96	13,42	25,92	0,52	1,62	0,27	1,05	1,62	1,34	4,01
Itino RMV	3	3,01	5,88	29,75	58,00	0,66	2,00	0,34	1,33	2,00	2,98	6,30
Integral	5	3,37	6,92	22,50	46,25	0,47	1,57	0,23	0,93	1,57	2,25	4,76
Pesa Link	3	3,20	5,72	35,00	62,50	0,62	1,98	0,35	1,24	1,98	3,50	6,71
BR 632	3	3,20	5,72	35,00	62,50	0,62	1,98	0,35	1,24	1,98	3,50	6,71
BR 633	3	3,68	6,65	35,00	63,33	0,57	2,11	0,32	1,15	2,11	3,50	6,75
IC 3, Contessa	2	3,00	-	29,63	-	0,66	1,98	-	1,32	1,98	2,96	6,26
S-Bahn Kopenhagen	5	4,01	8,31	14,00	29,00	0,36	1,46	0,18	0,73	1,46	1,40	3,58

Bauart/ Baureihe	Typ	Sitzplätze / m	Gesamtplätze / m	Sitzplätze / Türspur	Gesamtplätze / Türspur	Masse / Sitzplatz in t	Masse / m in t/m	Masse in t / Gesamtplätze	A Masse pro Sitzplatz in t	B Masse pro Meter in t/m	C Sitzplätze / Türspur	Effizienz E
Omneo kurz 1	10	4,32	8,15	29,17	55,00	0,56	2,43	0,30	1,13	2,43	2,92	6,48
Omneo kurz 2	10	4,43	8,32	30,50	57,33	0,55	2,43	0,29	1,10	2,43	3,05	6,58
Omneo mittel	10	4,63	8,48	24,44	44,72	0,53	2,43	0,29	1,05	2,43	2,44	5,93
Omneo lang	10	4,73	8,73	21,67	40,00	0,51	2,43	0,28	1,03	2,43	2,17	5,62
AGC, 3-teilig	3	3,62	7,11	34,67	68,00	0,64	2,32	0,33	1,28	2,32	3,47	7,07
AGC, 4-teilig	3	3,74	7,18	34,00	65,38	0,59	2,21	0,31	1,19	2,21	3,40	6,80
AGC, 3-teilig	3	3,62	7,11	34,67	68,00	0,60	2,18	0,31	1,20	2,18	3,47	6,84
AGC, 4-teilig	3	3,74	7,18	34,00	65,38	0,56	2,10	0,29	1,12	2,10	3,40	6,62
Spacium 7-teilig	3	3,66	8,62	16,43	38,71	0,61	2,23	0,26	1,22	2,23	1,64	5,09
Spacium 8-teilig	3	3,78	8,68	17,71	40,71	0,55	2,09	0,24	1,11	2,09	1,77	4,97
S-Bahn Zürich Re 4/4, 450	6	3,92	8,99	21,50	49,33	0,54	2,13	0,24	1,09	2,13	2,15	5,37
S-Bahn Zürich RABe 511 (Kiss)	8	3,51	9,15	21,92	57,17	0,56	1,97	0,22	1,13	1,97	2,19	5,29
GTW 2/8 für GKB	4	2,95	-	27,50	-	0,56	1,66	-	1,13	1,66	2,75	5,54
WINK	4	2,72	-	25,17	-	0,64	1,73	-	1,27	1,73	2,52	5,52
ÖBB Cityjet (S-Bahn Version)	2	3,25	-	20,33	-	0,60	1,93	-	1,19	1,93	2,03	5,16
ÖBB Cityjet (Regional-Bahn Version)	2	3,45	-	32,38	-	0,56	1,93	-	1,12	1,93	3,24	6,30
ÖBB Cityjet ECO	2	3,25	-	20,33	-	0,61	2,00	-	1,23	2,00	2,03	5,26
Talent ÖBB Rh 4023	3	2,90	5,98	18,88	38,88	0,63	1,82	0,30	1,25	1,82	1,89	4,95
Trenitalia Rock (4-teilig)	8	4,38	-	29,88	-	0,46	2,00	-	0,91	2,00	2,99	5,90
Trenitalia Rock (5-teilig)	8	4,49	-	30,70	-	0,43	1,94	-	0,86	1,94	3,07	5,87
KISS für Mälartag	8	3,41	-	22,31	-	0,84	2,86	-	1,68	2,86	2,23	6,77
KISS für Westbahn	8	3,51	-	21,92	-	0,56	1,97	-	1,13	1,97	2,19	

Tab. 16-1: Bezogene Kennwerte zu den Kapiteln 2 und 3

16.2 Vollständige Tabellen zu den Untersuchungen in den Kapiteln 7.6.1 bis 7.6.4

16.2.1 Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.1

Baustein	Führer- raum	Einstieg 1 a	Einstieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Übergangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Treppe						
Visualisierung															
Lfd.-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9						
Bausteinlänge	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560						
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0						
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0						
Variante 1a	Zwei lange Einzel-Wagen mit vier Drehgestellen, 8 Radsätzen, 4 großen Einstiegen									Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	4	11	1	1	0	2	4	Leermasse	91,94 t	1,40	1,76	1,09	4,26
Bausteinlänge	8000	0	8400	19800	900	8500	0	4400	2240	Länge	52,24 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	88	4	23	0	16	0	Sitzplätze	131				
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	11060	12100	550	7890	0	2440	2200	Gesamt- masse	128,34 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 26,4 = 52,8$ m										Durchschn. Radsatzlast	16,04 t				
Variante 1b	Zwei lange Einzel-Wagen mit vier Drehgestellen, 8 Radsätzen, 4 kleinen Einstiegen														
Anzahl	2	4	0	12	0	1	0	2	4	Leermasse	91,41 t	1,35	1,76	1,69	4,80
Bausteinlänge	8000	7200	0	21600	0	8500	0	4400	2240	Länge	51,94 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	96	0	23	0	16	0	Sitzplätze	135				
Türspuren	0	8	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	8				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	9400	0	13200	0	7890	0	2440	2200	Gesamt- masse	126,70 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 26,4 = 52,8$ m										Durchschn. Radsatzlast	15,84 t				

Tab. 7-8.1: Vergleich verschiedener Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug, hier: lange Einzelwagen

Variante 2a	Dreiteiler mit Jakobsdrehgestellen, 8 Radsätzen, 3 großen Einstiege									Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	3	13	0	1	4	0	6	Leermasse	102,01 t	1,28	1,76	1,77	4,81
Bausteinlänge	8000	0	6300	23400	0	8500	8400	0	3360	Länge	57,96 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	104	0	23	32	0	0	Sitzplätze	159				
Türspuren	0	0	9	0	0	0	0	0	0	Türspuren	9				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	8295	14300	0	7890	4760	0	3300	Gesamt-masse	140,71 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 16,1 = 58,6$ m											Durchschn. Radsatzlast				
Variante 2b	Dreiteiler mit Jakobsdrehgestellen, 8 Radsätzen, 3 kleine Einstiege														
Anzahl	2	3	0	13	1	1	4	0	6	Leermasse	102,01t	1,25	1,76	2,72	5,73
Bausteinlänge	8000	5400	0	23400	900	8500	8400	0	3360	Länge	57,96 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	104	4	23	32	0	0	Sitzplätze	163				
Türspuren	0	6	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	6				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	7050	0	14300	550	7890	4760	0	3300	Gesamt-masse	140,02 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 16,1 = 58,6$ m											Durchschn. Radsatzlast				
Variante 2c	Dreiteiler mit Jakobsdrehgestellen, 8 Radsätzen, 4 kleine Einstiege														
Anzahl	2	4	0	12	1	1	4	0	6	Leermasse	102,01t	1,32	1,76	1,94	5,01
Bausteinlänge	8000	7200	0	21600	900	8500	8400	0	3360	Länge	57,96 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	96	4	23	32	0	0	Sitzplätze	155				
Türspuren	0	8	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	8				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	9400	0	13200	550	7890	4760	0	3300	Gesamt-masse	141,27 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 16,1 = 58,6$ m											Durchschn. Radsatzlast				
Variante 2d	Dreiteiler mit Jakobsdrehgestellen, 8 Radsätzen, 4 große Einstiege														
Anzahl	2	0	4	12	0	1	4	0	6	Leermasse	102,54 t	1,36	1,76	1,26	4,38
Bausteinlänge	8000	0	8400	21600	0	8500	8400	0	3360	Länge	58,26 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	96	0	23	32	0	0	Sitzplätze	151				
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	11060	13200	0	7890	4760	0	3300	Gesamt-masse	142,91 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 16,1 = 58,6$ m											Durchschn. Radsatzlast				

Tab. 7-8.2: Vergleich verschiedener Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug, hier: Dreiteiliges Fahrzeug mit mittigen Jakobsdrehgestellen

Variante 3a	Zwei verkürzte Einzelwagen, 4 konv. Drehgestelle, 8 Radsätzen, 4 große Einstiege										Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	4	7	0	1	0	2	4	Leermasse	77,69 t	1,64	1,76	0,79	4,19	
Bausteinlänge	8000	0	8400	12600	0	8500	0	4400	2240	Länge	44,14 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	56	0	23	0	16	0	Sitzplätze	95					
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	11060	7700	0	7890	0	2440	2200	Gesamt-masse	109,14 t					
Ca. Länge: 2 x 22 m = 44 m											Durchschn. Radsatzlast					13,38 t
Variante 3b	Zwei verkürzte Einzelwagen, 4 konv. Drehgestelle, 8 Radsätzen, 2 große Einstiege															
Anzahl	2	0	2	9	1	1	0	2	4	Leermasse	78,21 t	1,36	1,76	1,92	5,04	
Bausteinlänge	8000	0	4200	16200	900	8500	0	4400	2240	Länge	44,44 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	72	4	23	0	16	0	Sitzplätze	115					
Türspuren	0	0	6	0	0	0	0	0	0	Türspuren	6					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	5530	9900	550	7890	0	2440	2200	Gesamt-masse	106,88 t					
Ca. Länge: 2 x 22 m = 44 m											Durchschn. Radsatzlast					13,4 t
Variante 3c	Zwei verkürzte Einzelwagen, 4 konv. Drehgestelle, 8 Radsätzen, 4 kleine Einstiege															
Anzahl	2	4	0	7	1	1	0	2	4	Leermasse	77,16 t	1,56	1,76	1,24	4,56	
Bausteinlänge	8000	7200	0	12600	900	8500	0	4400	2240	Länge	43,84 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	56	4	23	0	16	0	Sitzplätze	99					
Türspuren	0	8	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	8					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	9400	0	7700	550	7890	0	2440	2200	Gesamt-masse	107,5 t					
Ca. Länge: 2 x 22 m = 44 m											Durchschn. Radsatzlast					13,44 t
Variante 3d	Drei verkürzte Einzelwagen, 6 konv. Drehgestelle, 12 Radsätzen, 4 große Einstiege															
Anzahl	2	0	6	13	1	1	0	4	6	Leermasse	115,4 t	1,42	1,76	0,91	4,08	
Bausteinlänge	8000	0	12600	23400	900	8500	0	8800	3360	Länge	65,56 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	104	4	23	0	32	0	Sitzplätze	163					
Türspuren	0	0	18	0	0	0	0	0	0	Türspuren	18					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	16590	14300	550	7890	0	4880	3300	Gesamt-masse	165,19 t					
Ca. Länge: 3 x 22 m = 66 m											Durchschn. Radsatzlast					13,6 t

Tab. 7-8.3: Vergleich verschiedener Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug, hier verkürzte Fahrzeuge mit konv. Drehgestellen

Variante 4a	Vierteiler mit Jakobsdrehgestellen, 10 Radsätzen, 4 großen Einstiege										Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	4	18	0	1	6	0	8	Leermasse	130,9 t	1,22	1,76	1,79	4,77	
Bausteinlänge	8000	0	8400	32400	0	8500	12600	0	4480	Länge	74,38 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	144	0	23	48	0	0	Sitzplätze	215					
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	11060	19800	0	7890	7140	0	4400	Gesamt-masse	181,36 t					
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 2 \times 16,1 = 74,7$ m											Durchschn. Radsatzlast					18,14 t
Variante 4b	Vierteiler mit Jakobsdrehgestellen, 10 Radsätzen, 6 großen Einstiege															
Anzahl	2	0	6	15	1	1	6	0	8	Leermasse	130,38 t	1,34	1,76	1,08	4,18	
Bausteinlänge	8000	0	12600	27000	900	8500	12600	0	4480	Länge	74,08 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	120	4	23	48	0	0	Sitzplätze	195					
Türspuren	0	0	18	0	0	0	0	0	0	Türspuren	18					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	16590	16500	550	7890	7140	0	4400	Gesamt-masse	183,61 t					
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 2 \times 16,1 = 74,7$ m											Durchschn. Radsatzlast					18,4 t
Variante 5	Fünfteiler mit Jakobsdrehgestellen, 12 Radsätzen, 8 großen Einstiege															
Anzahl	2	0	8	19	0	1	8	0	10	Leermasse	158,2 t	1,32	1,76	1,00	4,08	
Bausteinlänge	8000	0	16800	34200	0	8500	16800	0	5600	Länge	89,9 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	152	0	23	64	0	0	Sitzplätze	239					
Türspuren	0	0	24	0	0	0	0	0	0	Türspuren	24					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	22120	20900	0	7890	9520	0	5500	Gesamt-masse	224,31 t					
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 3 \times 16,1 = 90,8$ m											Durchschn. Radsatzlast					18,7 t
Variante 1c	Drei lange Einzel-Wagen mit sechs Drehgestellen, 12 Radsätzen, 6 große Einstiege															
Anzahl	2	0	6	21	0	1	0	4	6	Leermasse	139,2 t	1,25	1,76	1,24	4,25	
Bausteinlänge	8000	0	12600	37800	0	8500	0	8800	3360	Länge	79,06 m					
Gesamtsitzplätze	0	0	0	168	0	23	0	32	0	Sitzplätze	223					
Türspuren	0	0	18	0	0	0	0	0	0	Türspuren	18					
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	16590	23100	0	7890	0	4880	3300	Gesamt-masse	195,1 t					
Maximal mögliche Länge: $3 \times 26,4 = 79,2$ m											Durchschn. Radsatzlast					16,26 t

Tab. 7-8.4: Vergleich verschiedener Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug, hier verlängerte Fahrzeugvarianten zu Nr. 1 und 3

Variante 6		Sechsteiler mit Jakobsdrehgestellen, 14 Radsätzen, 10 großen Einstiege								Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	10	26	0	1	8	0	10	Leermasse	187,8 t	1,27	1,76	0,98	4,02
Bausteinlänge	8000	0	21000	46800	0	8500	16800	0	5600	Länge	106,7 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	208	0	23	64	0	0	Sitzplätze	295				
Türspuren	0	0	30	0	0	0	0	0	0	Türspuren	30				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	27650	28600	0	7890	9520	0	5500	Gesamt-masse	267,1 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 4 \times 16,1 = 106,9$ m										Durchschn. Radsatzlast	19,1 t				
Variante 7		Vierteiler mit Jakobsdrehgestellen, 14 Radsätzen, 11 großen Einstiege								Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	11	24	1	1	8	0	10	Leermasse	186,7 t	1,32	1,76	0,86	3,94
Bausteinlänge	8000	0	23100	43200	900	8500	16800	0	5600	Länge	106,1 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	192	4	23	64	0	0	Sitzplätze	283				
Türspuren	0	0	33	0	0	0	0	0	0	Türspuren	33				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	30415	26400	550	7890	9520	0	5500	Gesamt-masse	267,1 t				
Maximal mögliche Länge: $2 \times 21,25 + 4 \times 16,1 = 106,9$ m										Durchschn. Radsatzlast	19,1 t				

Tab. 7-8.5: Fortführung der Variante 5 mit Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug

Variante 8a	Zwei überlange Einzelwagen, 4 konv. Drehgestelle, 8 Radsätzen, 4 große Einstiege									Ermittelte Werte		A	B	C	E
Anzahl	2	0	4	13	0	1	0	2	4	Leermasse	96,7 t	1,35	1,76	1,19	4,30
Bausteinlänge	8000	0	8400	23400	0	8500	0	4400	2240	Länge	54,94 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	104	0	23	0	16	0	Sitzplätze	143				
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	11060	14300	0	7890	0	2440	2200	Gesamt-masse	134,7 t				
Maximal mögliche Länge: 2 x 27,9 m = 55,8 m											Durchschn. Radsatzlast				
Variante 8b	Zwei überlange Einzelwagen, 4 konv. Drehgestelle, 8 Radsätzen, 6 kleine Einstiege														
Anzahl	2	6	0	12	0	1	0	2	4	Leermasse	97,8 t	1,45	1,76	1,13	4,33
Bausteinlänge	8000	10800	0	21600	0	8500	0	4400	2240	Länge	55,54 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	96	0	23	0	16	0	Sitzplätze	135				
Türspuren	0	12	0	0	0	0	0	0	0	Türspuren	12				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	14100	0	13200	0	7890	0	2440	2200	Gesamt-masse	137,74 t				
Maximal mögliche Länge: 2 x 27,9 m = 55,8 m											Durchschn. Radsatzlast				
Variante 8c	Zwei überlange Einzelwagen, 4 konv. Drehgestelle, 8 Radsätzen, 6 große Einstiege														
Anzahl	2	0	6	11	0	1	0	2	4	Leermasse	97,8 t	1,54	1,76	0,71	4,00
Bausteinlänge	8000	0	12600	19800	0	8500	0	4400	2240	Länge	55,54 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	88	0	23	0	16	0	Sitzplätze	127				
Türspuren	0	0	18	0	0	0	0	0	0	Türspuren	18				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	16590	12100	0	7890	0	2440	2200	Gesamt-masse	139,1 t				
Maximal mögliche Länge: 2 x 27,9 m = 55,8 m											Durchschn. Radsatzlast				
Variante 8d	Drei überlange Einzel-Wagen mit sechs Drehgestellen, 12 Radsätzen, 12 große Einstiege														
Anzahl	2	0	9	20	0	1	0	4	6	Leermasse	147,1 t	1,37	1,76	0,80	3,92
Bausteinlänge	8000	0	18900	36000	0	8500	0	8800	3360	Länge	83,56 m				
Gesamtsitzplätze	0	0	0	160	0	23	0	32	0	Sitzplätze	215				
Türspuren	0	0	27	0	0	0	0	0	0	Türspuren	27				
Personenlast bei a.gew. Zuladung	160	0	24885	22000	0	7890	0	4880	3300	Gesamt-masse	210,2 t				
Maximal mögliche Länge: 3 x 27,9 m = 83,7 m											Durchschn. Radsatzlast				

Tab. 7-8.6: Fortführung der Variante 5 mit Modulkombinationen für ein Gesamtfahrzeug

16.2.2 Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.2

Baustein	Führer- raum	Ein- stieg 1 a	Ein- stieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Treppen- bereich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wa- gen- ende Do mit WC	Wagen- ende Do ohne WC					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300					
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8					
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	80	2350	2765	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. un- ter 11	4815	5455	820	1100					
Variante 1a	Doppelstock-Einzel-Wagen mit zwei Drehgestellen, 4 Radsätzen und 2 kleinen Einstiegen													Ermittelte Werte		A	B	C	
Untergeschoss														Leermasse in t	48,06	0,76	1,80	3,18	
Anzahl	0	2	0	2	2	1	0	0	0	2	0	0	0	2	Länge in m				26,7
Bausteinlänge in mm	0	3600	0	3600	1800	8500	0	0	0	4600	0	0	0	4600	Türspuren				4
Sitzplätze	0	0	0	16	8	23	0	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze unten				63
Türspuren	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben				64
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	4700	0	2200	1100	7890	0	0	0	0	0	0	0	2200	Gesamtsitz- plätze				127
Obergeschoss														Zuladung in t	32,67				
Anzahl	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	Gesamt- masse in t				72
Bausteinlänge in mm	0	0	0	7200	900	0	0	0	0	0	11800	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,2			
Sitzplätze	0	0	0	32	4	0	0	0	0	0	28	0	0	0	Effizienz E	5,73			
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	0	0	4400	550	0	0	0	0	0	9630	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 26,8 m																			

Tab. 7-10.1: Modulkombination 1a für einen Doppelstockeinzelwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C
Variante 1b	Doppelstock-Einzel-Wagen mit zwei Drehgestellen, 4 Radsätzen und 2 großen Einstiegen																		
Untergeschoss															Leermasse in t	48,06	0,75	1,80	2,12
Anzahl	0	0	2	1	3	1	0	0	0	0	0	2	0	2	Länge in m	26,4			
Bausteinlänge in mm	0	0	4200	1800	2700	8500	0	0	0	0	0	4600	0	4600	Türspuren	6			
Sitzplätze	0	0	0	8	12	23	0	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze unten	59			
Türspuren	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	68			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	5530	1100	1650	7890	0	0	0	0	0	0	0	2200	Gesamtsitzplätze	127			
Obergeschoss															Zuladung in t	34,23			
Anzahl	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	Gesamtmasse in t	81,75			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	7200	900	0	0	0	0	0	12800	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,4			
Sitzplätze	0	0	0	32	4	0	0	0	0	0	32	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	4400	550	0	0	0	0	0	10910	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 26,8 m															Effizienz E		4,67		

Tab. 7-10.2: Modulkombination 1b für einen Doppelstockeinzelwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Variante 1c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht														Ermittelte Werte		A	B	C
Untergeschoss															Leermasse in t	95,94	0,69	1,80	2,33
Anzahl	0	0	4	6	8	1	0	0	0	0	0	4	0	4	Länge in m	53,3			
Bausteinlänge in mm	0	0	8400	10800	7200	8500	0	0	0	0	0	9200	0	9200	Türspuren	12			
Sitzplätze	0	0	0	48	32	23	0	0	0	0	0	0	0	32	Sitzplätze unten	135			
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	144			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	11060	6600	4400	7890	0	0	0	0	0	0	0	4400	Gesamtsitzplätze	279			
Obergeschoss															Zuladung in t	67,17			
Anzahl	0	0	0	9	2	0	0	0	0	0	4	0	0	0	Gesamtmasse in t	163,11			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	16200	1800	0	0	0	0	0	25600	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,4			
Sitzplätze	0	0	0	72	8	0	0	0	0	0	64	0	0	0	Effizienz E	4,81			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	9900	1100	0	0	0	0	0	21820	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,8 m = 53,6 m																			

Tab. 7-10.3: Modulkombination 1c für zwei Doppelstockeinzelwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			A	B	C	
Variante 2a	Zwei Doppelstockwagen, verbunden mit einem Jakobsdrehgestell, zwei konventionelle Enddrehgestelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, 2 kleine Einstiege														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	75,46	0,68	1,80	5,58	
Anzahl	0	2	0	6	5	1	2	0	2	0	0	2	0	2	Länge in m	41,92				
Bausteinlänge in mm	0	3600	0	10800	4500	8500	4200	0	1120	0	0	4600	0	4600	Türspuren	4				
Sitzplätze	0	0	0	48	20	23	16	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze unten	123				
Türspuren	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	100				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	4700	0	6600	2750	7890	2380	0	1100	0	0	0	0	2200	Gesamtsitzplätze	223				
Obergeschoss															Zuladung in t	47,15				
Anzahl	0	0	0	8	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	122,61				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	14400	1800	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,4				
Sitzplätze	0	0	0	64	8	0	0	0	0	28	0	0	0	0						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	8800	1100	0	0	0	0	9630	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 21,25 m = 42,5 mm																Effizienz E		8,05		

Tab. 7-10.4: Modulkombination 2a für zwei Doppelstockgelenkwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14						
Variante 2b	Zwei Doppelstockwagen, verbunden mit einem Jakobsdrehgestell, zwei konventionelle Enddrehgestelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, vier kleine Einstiege														Ermittelte Werte		A	B	C	
Untergeschoss															Leermasse in t	75,46	0,73	1,80	2,59	
Anzahl	0	4	0	4	5	1	2	0	2	0	0	2	0	2	Länge in m	41,92				
Bausteinlänge in mm	0	7200	0	7200	4500	8500	4200	0	1120	0	0	4600	0	4600	Türspuren	8				
Sitzplätze	0	0	0	32	20	23	16	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze unten	107				
Türspuren	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	100				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	9400	0	4400	2750	7890	2380	0	1100	0	0	0	0	2200	Gesamtsitzplätze	207				
Obergeschoss															Zuladung in t	49,95				
Anzahl	0	0	0	8	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	125,11				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	14400	1800	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,9				
Sitzplätze	0	0	0	64	8	0	0	0	0	28	0	0	0	0	Effizienz E	5,12				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	8800	1100	0	0	0	0	9630	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 21,25 m = 42,5 mm																				

Tab. 7-10.5: Modulkombination 2b für zwei Doppelstockgelenkwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			A	B	C	
Variante 2c	Zwei Doppelstockwagen, verbunden mit einem Jakobsdrehgestell, zwei konventionelle Enddrehgestelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, drei kleine Einstiege, verkürzte Wagen														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	67,36	0,74	1,80	3,05	
Anzahl	0	3	0	3	4	1	2	0	2	0	0	2	0	2	Länge in m	37,42				
Bausteinlänge in mm	0	5400	0	5400	3600	8500	4200	0	1120	0	0	4600	0	4600	Türspuren	6				
Sitzplätze	0	0	0	24	16	23	16	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze unten	95				
Türspuren	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	88				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	7050	0	3300	2200	7890	2380	0	1100	0	0	0	0	2200	Gesamtsitzplätze	183				
Obergeschoss															Zuladung in t	44				
Anzahl	0	0	0	7	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	111,36				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	12600	900	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	18,6				
Sitzplätze	0	0	0	56	4	0	0	0	0	28	0	0	0	0						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	7700	550	0	0	0	0	9630	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 21,25 m = 42,5 m																Effizienz E		5,59		

Tab. 7-10.6: Modulkombination 2c für zwei Doppelstockgelenkwagen

Baustein	Ein- stieg 1 a	Sitz- grupp e	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Trep- pen- be- reich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wagen- ende Do mit WC	Wagen- ende Do ohne WC	Trep- pen- haus 2 UG	Treppen- haus 2 OG					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16					
Bausteinlänge in mm	1800	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300	3300	6900					
Sitzplätze	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8	6	20					
Türspuren	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	2350	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. unter 11	4815	5455	820	1100	2420	7370					
Variante 2d	Drei Doppelstockwagen, verbunden mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionelle Enddrehgestelle, zwei Jakobsdrehgestelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, ein mittiges Treppenhaus im Mittelwagen, fünf kleine Einsteige, verkürzte Wagen													Ermittelte Werte	A	B	C		
Untergeschoss														Leermasse in t	94,21	0,80	1,80	2,37	
Anzahl	2	2	2	1	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	Länge in m				53,34
Bausteinlänge in mm	3600	3600	1800	8500	0	0	0	0	0	4600	0	4600	0	0	Türspuren				10
Sitzplätze	0	16	8	23	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	Sitzplätze unten				129
Türspuren	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben				108
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	4700	2200	1100	7890	0	0	0	0	0	0	0	2200	0	0	Gesamtsitz- plätze				237
Obergeschoss														Gesamtsitz- plätze	237				
Anzahl	0	4	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	Zuladung in t				63,62
Bausteinlänge in mm	0	7200	900	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	0	0	Gesamt- masse in t	157,83			
Sitzplätze	0	32	4	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	19,7			
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	4400	550	0	0	0	0	9630	0	0	0	0	0	0	Effizienz E	4,97			
Maximal mögliche Länge: 2 x 21,25 m + 16,1 m = 58,6 m																			

Tab. 7-10.7: Modulkombination 2d für drei Doppelstockgelenkwagen

Baustein-Nr.	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	17	18			A	B	C	
Variante 2e	Drei Doppelstockwagen, verbunden mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionelle Enddrehgestelle, zwei Jakobsdrehgestelle, je ein Treppenhaus im Bereich des Enddrehgestells, drei große Einstiege, verkürzte Wagen														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	96,91	0,77	1,80	1,69	
Anzahl	5	3	7	1	4	0	4	0	0	2	0	2	1	0	Länge in m	53,84				
Bausteinlänge in mm	10500	5400	6300	8500	8400	0	2240	0	0	4600	0	4600	3300	0	Türspuren	15				
Sitzplätze	0	24	28	23	32	0	0	0	0	0	0	16	6	0	Sitzplätze unten	129				
Türspuren	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	124				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	13825	3300	3850	7890	4760	0	2200	0	0	0	0	2200	2420	0	Gesamtsitzplätze	253				
Obergeschoss															Zuladung in t	68,63				
Anzahl	0	8	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	Gesamtmasse in t	165,54				
Bausteinlänge in mm	0	1440	1800	0	0	0	0	0	12800	0	0	0	0	6900	Durchsch. Radsatzlast in t	20,7				
Sitzplätze	0	64	8	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	20						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	8800	1100	0	0	0	0	0	10910	0	0	0	0	7370						
Maximal mögliche Länge: 2 x 21,25 m = 42,5 m																Effizienz E		4,25		

Tab. 7-10.8: Modulkombination 2e für drei Doppelstockgelenkwagen

Baustein-Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	17	18			A	B	C	
Variante 3a	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 26 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 1 dreiachsiges Mittendrehgestell, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	93,06	0,66	1,80	3,54	
Anzahl	4	0	10	0	1	2	0	0	0	0	4	2	0	0	Länge in m	51,7				
Bausteinlänge in mm	7200	0	18000	0	8500	4200	0	0	0	0	9200	4600	0	0	Türspuren	8				
Sitzplätze	0	0	80	0	23	16	0	0	0	0	0	16	0	0	Sitzplätze unten	135				
Türspuren	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	148				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	9400	0	11000	0	7890	2380	0	0	0	0	0	2200	0	0	Gesamtsitzplätze	283				
Obergeschoss															Zuladung in t	69,4				
Anzahl	0	0	9	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	Gesamtmasse in t	162,46				
Bausteinlänge in mm	0	0	16200	0	0	0	0	0	23600	0	0	0	0	6900	Durchsch. Radsatzlast in t	23,2				
Sitzplätze	0	0	72	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0	20						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	9900	0	0	0	0	0	19260	0	0	0	0	7370						
Maximal mögliche Länge: 2 x 26 m = 52 m																Effizienz E		6,0		

Tab. 7-10.9: Modulkombination 3a für einen zweiteiligen Doppelstockgelenkwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	17	18	Ermittelte Werte		A	B	C
Variante 3b	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 24 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 1 dreiachsiges Mittendrehgestell, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht																		
Untergeschoss															Leermasse in t	84,96	0,71	1,80	2,99
Anzahl	4	0	7	1	1	2	0	0	0	0	4	2	0	0	Länge in m	47,2			
Bausteinlänge in mm	7200	0	12600	900	8500	4200	0	0	0	0	9200	4600	0	0	Türspuren	8			
Sitzplätze	0	0	56	4	23	16	0	0	0	0	0	16	0	0	Sitzplätze unten	115			
Türspuren	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	124			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	9400	0	7700	550	7890	2380	0	0	0	0	0	2200	0	0	Gesamtsitzplätze	239			
Obergeschoss															Zuladung in t	63,35			
Anzahl	0	0	6	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	Gesamtmasse in t	148,31			
Bausteinlänge in mm	0	0	10800	0	0	0	0	0	23600	0	0	0	0	6900	Durchsch. Radsatzlast in t	21,2			
Sitzplätze	0	0	48	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0	20	Effizienz E		5,50		
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	6600	0	0	0	0	0	19260	0	0	0	0	7370					
Maximal mögliche Länge: 2 x 24 m = 48 m																			

Tab. 7-10.10: Modulkombination 3b für einen zweiteiligen Doppelstockgelenkwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	17	18	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 3c	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 24 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 1 dreiachsiges Mittendrehgestell, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht																			
Untergeschoss															Leermasse in t	85,5	0,72	1,80	1,99	
Anzahl	0	4	7	0	1	2	0	0	0	0	4	2	0	0	Länge in m	47,5				
Bausteinlänge in mm	0	8400	12600	0	8500	4200	0	0	0	0	9200	4600	0	0	Türspuren	12				
Sitzplätze	0	0	56	0	23	16	0	0	0	0	0	16	0	0	Sitzplätze unten	111				
Türspuren	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	128				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	11060	7700	0	7890	2380	0	0	0	0	0	2200	0	0	Gesamtsitzplätze	239				
Obergeschoss															Zuladung in t	66,47				
Anzahl	0	0	5	1	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1	Gesamtmasse in t	151,97				
Bausteinlänge in mm	0	0	9000	900	0	0	0	0	0	25600	0	0	0	6900	Durchsch. Radsatzlast in t	21,7				
Sitzplätze	0	0	40	4	0	0	0	0	0	64	0	0	0	20						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	5500	550	0	0	0	0	0	21820	0	0	0	7370						
Maximal mögliche Länge: 2 x 24 m = 48 m																Effizienz E		4,51		

Tab. 7-10.11: Modulkombination 3c für einen zweiteiligen Doppelstockgelenkwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	17	18			A	B	C	
Variante 3d	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 24 m lang, Mittelwagen 24 m, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 2 dreiachsiges Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	128,34	0,65	1,80	3,29	
Anzahl	6	0	14	0	1	4	0	0	0	0	6	2	0	0	Länge in m	71,3				
Bausteinlänge in mm	10800	0	25200	0	8500	8400	0	0	0	0	13800	4600	0	0	Türspuren	12				
Sitzplätze	0	0	112	0	23	32	0	0	0	0	0	16	0	0	Sitzplätze unten	183				
Türspuren	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	212				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	14100	0	15400	0	7890	4760	0	0	0	0	0	2200	0	0	Gesamtsitzplätze	395				
Obergeschoss															Zuladung in t	95,46				
Anzahl	0	0	13	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	1	Gesamtmasse in t	223,8				
Bausteinlänge in mm	0	0	23400	900	0	0	0	0	35400	0	0	0	0	6900	Durchsch. Radsatzlast in t	22,4				
Sitzplätze	0	0	104	4	0	0	0	0	84	0	0	0	0	20						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	14300	550	0	0	0	0	28890	0	0	0	0	7370						
Maximal mögliche Länge: 2 x 24 m + 24 = 72 m																Effizienz E		5,74		

Tab. 7-10.12: Modulkombination 3d für einen dreiteiligen Doppelstockgelenkwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	17	18	Ermittelte Werte		A	B	C				
Variante 3e	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen jeweils 24 m lang, Mittelwagen 24 m, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 2 dreiachsiges Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht																						
Untergeschoss																							
Anzahl	0	6	13	0	1	4	0	0	0	0	6	2	0	0	Leermasse in t	128,34	0,67	1,80	2,13				
Bausteinlänge in mm	0	12600	23400	0	8500	8400	0	0	0	0	13800	4600	0	0	Länge in m	71,3							
Sitzplätze	0	0	104	0	23	32	0	0	0	0	0	16	0	0	Türspuren	18							
Türspuren	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	175							
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	16590	14300	0	7890	4760	0	0	0	0	0	2200	0	0	Sitzplätze oben	208							
Obergeschoss																							
Anzahl	0	0	11	1	0	0	0	0	0	6	0	0	0	1	Gesamtsitzplätze	383							
Bausteinlänge in mm	0	0	19800	900	0	0	0	0	0	38400	0	0	0	6900	Zuladung in t	98,49							
Sitzplätze	0	0	88	4	0	0	0	0	0	96	0	0	0	20	Gesamtmasse in t	226,83							
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	12100	550	0	0	0	0	0	32730	0	0	0	7370	Durchsch. Radsatzlast in t	22,7							
Maximal mögliche Länge: 2 x 24 m + 24 = 72 m																Effizienz E		4,60					

Tab. 7-10.13: Modulkombination 3e für einen dreiteiligen Doppelstockgelenkwagen in Anlehnung an [105]

16.2.3 Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.3

Baustein	Führer- raum	Ein- stieg 1 a	Ein- stieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Bereich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Trep- pen- reich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wa- gen- ende Do mit WC	Wa- gen- ende Do ohne WC					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300					
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8					
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	80	2350	2765	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. un- ter 11	4815	5455	820	1100					
Variante 1	Doppelstockeinzelnwagen, zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; PRM-gerecht; zwei Führerräume													Ermittelte Werte	A	B	C		
Untergeschoss														Leermasse in t	55,65	1,28	2,10	2,18	
Anzahl	2	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	Länge in m				26,5
Bausteinlänge in mm	8000	3600	0	1800	0	8500	0	0	0	0	0	4600	0	0	Türspuren				4
Sitzplätze	0	0	0	8	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten				31
Türspuren	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben				56
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	160	4700	0	1100	0	7890	0	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitz- plätze				87
Obergeschoss														Zuladung in t	27,33				
Anzahl	0	0	0	3	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Gesamt- masse in t	83			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	5400	900	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,7			
Sitzplätze	0	0	0	24	4	0	0	0	0	28	0	0	0	0	Effizienz E	5,55			
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	0	0	3300	550	0	0	0	0	9630	0	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 26,8 m																			

Tab. 7-12.1: Modulkombination 1 für einen Doppelstockeinzelntriebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 2a	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																			
Untergeschoss															Leermasse in t	110,88	0,94	2,10	2,94	
Anzahl	2	4	0	7	3	1	0	0	0	0	0	4	0	2	Länge in m	52,8				
Bausteinlänge in mm	8000	7200	0	12600	2700	8500	0	0	0	0	0	9200	0	4600	Türspuren	8				
Sitzplätze	0	0	0	56	12	23	0	0	0	0	0	0	0	16	Sitzplätze unten	107				
Türspuren	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	128				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	9400	0	7700	1650	7890	0	0	0	0	0	0	0	2200	Gesamtsitzplätze	235				
Obergeschoss															Zuladung in t	58,16				
Anzahl	0	0	0	8	2	0	0	0	0	4	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	169				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	14400	1800	0	0	0	0	23600	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	21,1				
Sitzplätze	0	0	0	64	8	0	0	0	0	56	0	0	0	0	Effizienz E					5,98
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	8800	1100	0	0	0	0	19260	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,8 m = 53,6 m																				

Tab. 7-12.2: Modulkombination 2a für einen zweiteiligen Doppelstocktriebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 2b	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																			
Untergeschoss															Leermasse in t	111,72	1,06	2,10	1,76	
Anzahl	2	0	4	4	3	1	0	0	0	0	0	4	0	4	Länge in m	53,2				
Bausteinlänge in mm	8000	0	8400	7200	2700	8500	0	0	0	0	0	9200	0	9200	Türspuren	12				
Sitzplätze	0	0	0	32	12	23	0	0	0	0	0	0	0	32	Sitzplätze unten	99				
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	112				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	1106 0	4400	1650	7890	0	0	0	0	0	0	0	4400	Gesamtsitzplätze	211				
Obergeschoss															Zuladung in t	57,98				
Anzahl	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	Gesamtmasse in t	169,7				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	10800	0	0	0	0	0	0	25600	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	21,2				
Sitzplätze	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	Effizienz E	4,92				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	6600	0	0	0	0	0	0	21820	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,8 m = 53,6 m																				

Tab. 7-12.3: Modulkombination 2b für einen zweiteiligen Doppelstocktriebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			A	B	C	
Variante 2c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, je max. 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	100,38	1,26	2,10	1,33	
Anzahl	2	0	4	1	3	1	0	0	0	0	0	4	0	4	Sitzplätze unten	75				
Bausteinlänge in mm	8000	0	8400	1800	2700	8500	0	0	0	0	0	9200	0	9200	Länge in m	47,8				
Sitzplätze	0	0	0	8	12	23	0	0	0	0	0	0	0	32	Türspuren	12				
Türspuren	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	84				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	1106 0	1100	1650	7890	0	0	0	0	0	0	0	4400	Gesamtsitzplätze	159				
Obergeschoss															Zuladung in t	50,83				
Anzahl	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	4	0	0	0	Gesamtmasse in t	151,2				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	3600	900	0	0	0	0	0	25600	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	18,9				
Sitzplätze	0	0	0	16	4	0	0	0	0	0	64	0	0	0	Effizienz E	4,69				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	2200	550	0	0	0	0	0	21820	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 24 m = 48 m																				

Tab. 7-12.4: Modulkombination 2c für einen zweiteiligen, verkürzten Doppelstocktriebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 3a	Drei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																			
Untergeschoss																Leermasse in t	168	0,86	2,10	3,26
Anzahl	2	6	0	14	5	1	0	0	0	0	0	6	0	4	Länge in m	80				
Bausteinlänge in mm	8000	1080	0	25200	4500	8500	0	0	0	0	0	13800	0	9200	Türspuren	12				
Sitzplätze	0	0	0	112	20	23	0	0	0	0	0	0	0	32	Sitzplätze unten	187				
Türspuren	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	204				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	1410	0	15400	2750	7890	0	0	0	0	0	0	0	4400	Gesamtsitzplätze	391				
Obergeschoss																Zuladung in t	90,1			
Anzahl	0	0	0	14	2	0	0	0	0	6	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	258,1				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	25200	1800	0	0	0	0	35400	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	21,5				
Sitzplätze	0	0	0	112	8	0	0	0	0	84	0	0	0	0	Effizienz E		6,22			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	15400	1100	0	0	0	0	28890	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 3 x 26,8 m = 80,4 m																				

Tab. 7-12.5: Modulkombination 3a für einen dreiteiligen Doppelstocktriebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 3b	Drei Doppelstockeinzelwagen, je 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																			
Untergeschoss															Leermasse in t	168	0,88	2,10	2,13	
Anzahl	2	0	6	13	5	1	0	0	0	0	0	6	0	4	Länge in m	80				
Bausteinlänge in mm	8000	0	12600	23400	4500	8500	0	0	0	0	0	13800	0	9200	Türspuren	18				
Sitzplätze	0	0	0	104	20	23	0	0	0	0	0	0	0	32	Sitzplätze unten	179				
Türspuren	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	204				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	16590	14300	2750	7890	0	0	0	0	0	0	0	4400	Gesamtsitzplätze	383				
Obergeschoss															Zuladung in t	93,67				
Anzahl	0	0	0	12	3	0	0	0	0	0	6	0	0	0	Gesamtmasse in t	261,67				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	21600	2700	0	0	0	0	0	38400	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	21,8				
Sitzplätze	0	0	0	96	12	0	0	0	0	0	96	0	0	0	Effizienz E	5,11				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	13200	1650	0	0	0	0	0	32730	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 3 x 26,8 m = 80,4 m																				

Tab. 7-12.6: Modulkombination 3b für einen dreiteiligen Doppelstocktriebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14													
Variante 3c	Drei Doppelstockeinzelwagen, je 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume														Ermittelte Werte	A	B	C									
Untergeschoss															Leermasse in t	151	0,97	2,10	1,73								
Anzahl	2	0	6	9	4	1	0	0	0	0	0	6	0	4						Länge in m	71,9						
Bausteinlänge in mm	8000	0	12600	16200	3600	8500	0	0	0	0	0	13800	0	9200								Türspuren Sitzplätze unten	18				
Sitzplätze	0	0	0	72	16	23	0	0	0	0	0	0	0	32										Sitzplätze oben	143		
Türspuren	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0												Gesamtsitzplätze	168
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	16590	9900	2200	7890	0	0	0	0	0	0	0	4400													
Obergeschoss															Gesamtmasse in t	234,76											
Anzahl	0	0	0	7	4	0	0	0	0	0	6	0	0	0			Durchsch. Radsatzlast in t	19,6									
Bausteinlänge in mm	0	0	0	12600	3600	0	0	0	0	0	38400	0	0	0					Effizienz E	4,80							
Sitzplätze	0	0	0	56	16	0	0	0	0	0	96	0	0	0													
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	7700	2200	0	0	0	0	0	32730	0	0	0													
Maximal mögliche Länge: 3 x 24 m = 72 m																											

Tab. 7-12.7: Modulkombination 3c für einen dreiteiligen, verkürzten Doppelstocktriebswagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			A	B	C	
Variante 4a	Vierteliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 26 m lang, Mittelwagen 24 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume														Ermittelte Werte					
Untergeschoss															Leermasse in t	208,74	0,91	2,10	2,87	
Anzahl	2	8	0	17	1	1	6	0	0	0	0	8	0	0	Länge in m	99,4				
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	30600	900	8500	12600	0	0	0	0	18400	0	0	Türspuren	16				
Sitzplätze	0	0	0	136	4	23	48	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	211				
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	248				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	18800	0	18700	550	7890	7140	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	459				
Obergeschoss															Zuladung in t	110,46				
Anzahl	0	0	0	16	2	0	0	0	0	8	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	319,2				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	28800	1800	0	0	0	0	47200	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	24,6				
Sitzplätze	0	0	0	128	8	0	0	0	0	112	0	0	0	0	Effizienz E	5,88				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	17600	1100	0	0	0	0	38520	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: $2 \times 26 + 2 \times 24 \text{ m} = 100 \text{ m}$																				

Tab. 7-12.8: Modulkombination 4a für einen vierteiligen Doppelstock-Gelenktriebwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C
Variante 4b	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mitterdrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																		
Untergeschoss															Leermasse in t	192,36	0,92	2,10	2,62
Anzahl	2	8	0	16	1	1	6	0	0	0	0	8	0	0	Länge in m	91,6			
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	28800	900	8500	12600	0	0	0	0	18400	0	0	Türspuren	16			
Sitzplätze	0	0	0	128	4	23	48	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	203			
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	216			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	18800	0	17600	550	7890	7140	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	419			
Obergeschoss															Zuladung in t	104,96			
Anzahl	0	0	0	13	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	297,32			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	23400	0	0	0	0	0	47200	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	22,9			
Sitzplätze	0	0	0	104	0	0	0	0	0	112	0	0	0	0	Effizienz E				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	14300	0	0	0	0	0	38520	0	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 2 x 24+ 2 x 22 m = 92m																			

Tab. 7-12.9: Modulkombination 4b für einen vierteiligen Doppelstock-Gelenktriebwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C
Variante 4c	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																		
Untergeschoss															Leermasse in t	285,36	0,96	2,10	2,42
Anzahl	2	8	0	14	1	1	6	0	0	0	0	8	0	0	Länge in m	88,0			
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	25200	900	8500	12600	0	0	0	0	18400	0	0	Türspuren	16			
Sitzplätze	0	0	0	112	4	23	48	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	187			
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	200			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	18800	0	15400	550	7890	7140	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	387			
Obergeschoss															Zuladung in t	100,56			
Anzahl	0	0	0	11	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	285,36			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	19800	0	0	0	0	0	47200	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	22,0			
Sitzplätze	0	0	0	88	0	0	0	0	0	112	0	0	0	0	Effizienz E				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	12100	0	0	0	0	0	38520	0	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: $2 \times 24 + 2 \times 20 \text{ m} = 88 \text{ m}$																			

Tab. 7-12.10: Modulkombination 4c für einen vierteiligen Doppelstock-Gelenktriebwagen in Anlehnung an [105]

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C
Variante 4d	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, je zwei konventionelle Enddrehgestelle, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle pro Wagen; nur 1 Wagen PRM-gerecht; zwei Führerräume																		
Untergeschoss															Leermasse in t	184,17	0,99	2,10	1,55
Anzahl	2	0	8	13	0	1	6	0	0	0	0	8	0	0	Länge in m	87,7			
Bausteinlänge in mm	8000	0	16800	23400	0	8500	12600	0	0	0	0	18400	0	0	Türspuren	24			
Sitzplätze	0	0	0	104	0	23	48	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	175			
Türspuren	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	196			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	22120	14300	0	7890	7140	0	0	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	371			
Obergeschoss															Zuladung in t	104,6			
Anzahl	0	0	0	8	1	0	0	0	0	0	8	0	0	0	Gesamtmasse in t	288,77			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	14400	900	0	0	0	0	0	51200	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	22,2			
Sitzplätze	0	0	0	64	4	0	0	0	0	0	128	0	0	0	Effizienz E		4,64		
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	8800	550	0	0	0	0	0	43640	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: $2 \times 24 + 2 \times 20 \text{ m} = 88 \text{ m}$																			

Tab. 7-12.11: Modulkombination 4d für einen vierteiligen Doppelstock-Gelenktriebwagen in Anlehnung an [105]

16.2.4 Tabellen zu den Variantenuntersuchungen in Kapitel 7.6.4

Baustein	Führer- raum	Ein- stieg 1 a	Ein- stieg 1 b	Sitz- gruppe	Sitz- reihe	Be- reich U-WC	Über- gangs- hälfte kurz	Über- gangs- hälfte lang	Trep- pen- reich	Treppe 1a für OG	Treppe 1b für OG	Treppe UG	Wa- gen- ende Do mit WC	Wa- gen- ende Do ohne WC					
Visualisierung																			
Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14					
Bausteinlänge in mm	4000	1800	2100	1800	900	8500	2100	2200	560	2300	5900	6400	2300	2300					
Sitzplätze	0	0	0	8	4	23	8	8	0	0	14	16	4	8					
Türspuren	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	80	2350	2765	1100	550	1610	1190	1220	550	enth. un- ter 11	4815	5455	820	1100					
Variante 1a	Ein- und Doppelstocktriebwagen, 24,6 bzw. 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; 1 PRM-gerechter Mittelwagen; zwei Führerräume													Ermittelte Werte		A	B	C	
Untergeschoss														Leermasse in t	188,59	0,85	1,78	2,77	
Anzahl	2	8	0	23	10	1	0	6	4	0	0	4	0	0	Länge in m				105,94
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	41400	9000	8500	0	13200	2240	0	0	9200	0	0	Türspuren				16
Sitzplätze	0	0	0	184	40	23	0	48	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten				295
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben				148
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	160	18800	0	25300	5500	7890	0	7320	2200	0	0	0	0	0	Gesamtsitz- plätze				443
Obergeschoss														Zuladung in t	99,1				
Anzahl	0	0	0	10	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	Gesamt- masse in t				287,7
Bausteinlänge in mm	0	0	0	18000	2700	0	0	0	0	23600	0	0	0	0	Max. Durchsch. Radsatzlast in t				20,3
Sitzplätze	0	0	0	80	12	0	0	0	0	56	0	0	0	0	Effizienz E				5,4
Personenlast bei a.gew. Zula- dung in kg	0	0	0	11000	1650	0	0	0	0	19260	0	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,4 m + 2 x 26,8 m = 106,4 m																			

Tab. 7-14.1: Modulkombination 1a für einen ein- und doppelstöckigen Triebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C
Variante 1b	Ein- und Doppelstocktriebwagen, 24,6 bzw. 26,8 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; 1 PRM-gerechter Mittelwagen; zwei Führerräume																		
Untergeschoss															Leermasse in t	186,46	0,88	1,78	1,76
Anzahl	2	0	8	21	10	1	0	6	4	0	0	4	0	0	Länge in m	104,74			
Bausteinlänge in mm	8000	0	16800	37800	9000	8500	0	13200	2240	0	0	9200	0	0	Türspuren	24			
Sitzplätze	0	0	0	168	40	23	0	48	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	279			
Türspuren	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	144			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	22120	23100	5500	7890	0	7320	2200	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	423			
Obergeschoss															Zuladung in t	101,1			
Anzahl	0	0	0	8	4	0	0	0	0	0	4	0	0	0	Gesamtmasse in t	287,57			
Bausteinlänge in mm	0	0	0	14400	3600	0	0	0	0	0	25600	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	20,4			
Sitzplätze	0	0	0	64	16	0	0	0	0	0	64	0	0	0	Effizienz E				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	8800	2200	0	0	0	0	0	21820	0	0	0					
Maximal mögliche Länge: 2 x 26,4 m + 2 x 26,8 m = 106,4 m																			

Tab. 7-14.2: Modulkombination 1b für einen ein- und doppelstöckigen Triebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 2a	Ein- und Doppelstocktriebwagen, je 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; 1 PRM-gerechter Mittelwagen; zwei Führerräume																			
Untergeschoss															Leermasse in t	169,33	0,92	1,78	2,29	
Anzahl	2	8	0	18	8	1	0	6	4	0	0	4	0	0	Länge in m	95,14				
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	32400	7200	8500	0	13200	2240	0	0	9200	0	0	Türspuren	16				
Sitzplätze	0	0	0	144	32	23	0	48	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	247				
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	120				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	18800	0	19800	4400	7890	0	7320	2200	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	367				
Obergeschoss															Zuladung in t	88,63				
Anzahl	0	0	0	6	4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	257,96				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	10800	3600	0	0	0	0	23600	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	17,9				
Sitzplätze	0	0	0	48	16	0	0	0	0	56	0	0	0	0						
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	6600	2200	0	0	0	0	19260	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 4 x 24 m = 96 m																Effizienz E		5,0		

Tab. 7-14.3: Modulkombination 2a für einen ein- und doppelstöckigen Triebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 2b	Ein- und Doppelstocktriebwagen, je 24 m lang, je zwei konventionelle Drehgestelle pro Wagen, Tiefeinstieg, 2 Treppenhäuser jeweils oberhalb der Drehgestelle; 1 PRM-gerechter Mittelwagen; zwei Führerräume																			
Untergeschoss																Leermasse in t	168,82	0,95	1,78	1,48
Anzahl	2	0	8	17	7	1	0	6	4	0	0	4	0	0	Länge in m	94,84				
Bausteinlänge in mm	8000	0	16800	30600	6300	8500	0	13200	2240	0	0	9200	0	0	Türspuren	24				
Sitzplätze	0	0	0	136	28	23	0	48	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	235				
Türspuren	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	120				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	0	22120	18700	3850	7890	0	7320	2200	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	355				
Obergeschoss																Zuladung in t	91,76			
Anzahl	0	0	0	5	4	0	0	0	0	0	4	0	0	0	Gesamtmasse in t	260,58				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	9000	3600	0	0	0	0	0	25600	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	18,3				
Sitzplätze	0	0	0	40	16	0	0	0	0	0	64	0	0	0	Effizienz E		4,21			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	5500	2200	0	0	0	0	0	21820	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 4 x 24 m = 96 m																				

Tab. 7-14.4: Modulkombination 2b für einen ein- und doppelstöckigen Triebwagen

Baustein-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Ermittelte Werte		A	B	C	
Variante 3	Vierteiliger Triebzug mit Jakobsdrehgestellen, zwei konventionellen angetriebenen Enddrehgestellen unter den einstöckigen Endwagen und drei nicht angetriebenen Jakobsdrehgestellen unter den Doppelstockmittelwagen; ein PRM-gerechter Endwagen, 1 Treppenhaus über den Drehgestellen pro Doppelstockwagen																			
Untergeschoss																Leermasse in t	130,92	1,08	1,78	1,52
Anzahl	2	8	0	11	2	1	0	6	6	0	0	2	0	0	Länge in m	73,66				
Bausteinlänge in mm	8000	14400	0	19800	1800	8500	0	13200	3360	0	0	4600	0	0	Türspuren	16				
Sitzplätze	0	0	0	88	8	23	0	48	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze unten	167				
Türspuren	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Sitzplätze oben	76				
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	160	18800	0	12100	1100	7890	0	7320	3300	0	0	0	0	0	Gesamtsitzplätze	243				
Obergeschoss																Zuladung in t	66,9			
Anzahl	0	0	0	4	4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	Gesamtmasse in t	197,82				
Bausteinlänge in mm	0	0	0	7200	3600	0	0	0	0	11800	0	0	0	0	Durchsch. Radsatzlast in t	24,6				
Sitzplätze	0	0	0	32	16	0	0	0	0	28	0	0	0	0	Effizienz E		4,37			
Personenlast bei a.gew. Zuladung in kg	0	0	0	4400	2200	0	0	0	0	9630	0	0	0	0						
Maximal mögliche Länge: 2 x 21,25 m + 2 x 16,1 m = 74,7 m																				

Tab. 7-14.5: Modulkombination 3 für einen ein- und doppelstöckigen Triebwagen

16.3 Übersicht der ermittelten Werte aus den Kapiteln 7.6.1 bis 7.6.4 sowie 8.2.4

Fahrzeuggattung	Variante	Kurzbeschreibung	Länge in m	Sitzplätze	Türspuren	Leermasse in t	Gesamtmasse (bei aus. gew. Zul.) in t	A (Masse/Sitzplatz)	B (Masse/Meter)	C (Sitzpl./Türspur)	Effizienz E
Einstöckig	I - 1a	Zwei Einzelwagen, max. 26,4 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	52,24	131	12	91,97	128,34	1,40	1,76	1,09	4,26
Einstöckig	I - 1b	Zwei Einzelwagen, max. 26,4 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	51,94	135	8	91,41	126,7	1,35	1,76	1,69	4,80
Einstöckig	I - 1c	Drei Einzelwagen, max. 26,4 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	79,06	223	18	139,2	195,1	1,25	1,76	1,24	4,25
Einstöckig	I - 2a	Dreiteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und zwei Jakobsdrehgestellen	57,96	159	9	102,01	140,71	1,28	1,76	1,77	4,81
Einstöckig	I - 2b	Dreiteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und zwei Jakobsdrehgestellen	57,96	163	6	102,01	140,02	1,25	1,76	2,72	5,73
Einstöckig	I - 2c	Dreiteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und zwei Jakobsdrehgestellen	57,96	155	8	102,01	141,27	1,32	1,76	1,94	5,01
Einstöckig	I - 2d	Dreiteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und zwei Jakobsdrehgestellen	58,26	151	12	102,54	142,91	1,36	1,76	1,26	4,38
Einstöckig	I - 3a	Zwei Einzelwagen, max. 22 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	44,14	95	12	77,69	109,14	1,64	1,76	0,79	4,19
Einstöckig	I - 3b	Zwei Einzelwagen, max. 22 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	44,44	115	6	78,21	106,88	1,36	1,76	1,92	5,04
Einstöckig	I - 3c	Zwei Einzelwagen, max. 22 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	43,84	99	8	77,16	107,5	1,56	1,76	1,24	4,56
Einstöckig	I - 3d	Drei Einzelwagen, max. 22 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	65,56	163	18	115,4	165,19	1,40	1,76	0,93	4,09
Einstöckig	I - 4a	Vierteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und drei Jakobsdrehgestellen	74,38	215	12	130,9	181,36	1,22	1,76	1,79	4,77
Einstöckig	I - 4b	Vierteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und drei Jakobsdrehgestellen	74,08	195	18	130,38	183,61	1,34	1,76	1,08	4,18
Einstöckig	I - 5	Fünfteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und vier Jakobsdrehgestellen	89,9	239	24	158,2	224,31	1,32	1,76	1,00	4,08
Einstöckig	I - 6	Sechsteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und fünf Jakobsdrehgestellen	106,7	295	30	187,8	267,1	1,27	1,76	0,98	4,02
Einstöckig	I - 7	Sechsteiliger Triebzug mit zwei konventionellen Enddrehgestellen und fünf Jakobsdrehgestellen	106,1	283	33	186,7	267,1	1,32	1,76	0,86	3,94
Einstöckig	I - 8a	Zwei Einzelwagen, max. 27,9 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	54,94	143	12	96,7	134,7	1,35	1,76	1,19	4,30
Einstöckig	I - 8b	Zwei Einzelwagen, max. 27,9 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	55,54	135	12	97,8	137,74	1,45	1,76	1,13	4,33
Einstöckig	I - 8c	Zwei Einzelwagen, max. 27,9 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	55,54	127	18	97,8	139,1	1,54	1,76	0,71	4,00

Fahrzeuggattung	Variante	Kurzbeschreibung	Länge in m	Sitzplätze	Türspuren	Leermasse in t	Gesamtmasse (bei aus. gew. Zul.) in t	A (Masse/Sitzplatz)	B (Masse/Meter)	C (Sitzpl./Türspur)	Effizienz E
Einstöckig	I - 8d	Drei Einzelwagen, max. 27,9 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	83,56	215	27	147,1	210,2	1,37	1,76	0,80	3,92
DoSto Wg	II - 1a	Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	26,7	127	4	48,06	80,73	0,76	1,80	3,18	5,73
DoSto Wg mit Lok	II - 1a m. Lok	Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen plus Lokomotive	45,6	127	4	132,06	164,73	1,04	2,90	3,18	7,11
DoSto Wg	II - 1b	Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	26,4	127	6	48,06	81,75	0,75	1,80	2,12	4,67
DoSto Wg mit Lok	II - 1b m. Lok	Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen plus Lokomotive	45,3	127	6	131,52	165,75	1,04	2,90	2,12	6,06
DoSto Wg	II - 1c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	53,3	279	12	95,94	163,11	0,69	1,80	2,33	4,81
DoSto Wg mit Lok	II - 1c m. Lok	Zwei Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen plus Lokomotive	72,2	279	12	179,94	247,11	0,64	2,49	2,33	5,46
DoSto Wg	II - 2a	Zwei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestell, max. 42,5 m lang	41,92	223	8	75,46	122,61	0,68	1,80	5,58	8,05
DoSto Wg mit Lok	II - 2a m. Lok	Zwei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestell, max. 42,5 m lang plus Lokomotive	60,82	223	8	159,46	206,61	0,72	2,62	5,58	8,91
DoSto Wg	II - 2b	Zwei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestell, max. 42,5 m lang	41,92	207	12	75,46	125,11	0,73	1,80	2,59	5,12
DoSto Wg mit Lok	II - 2b m. Lok	Zwei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestell, max. 42,5 m lang plus Lokomotive	60,82	207	12	159,46	209,11	0,77	2,62	2,59	5,98
DoSto Wg	II - 2c	Zwei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestell, max. 42,5 m lang	37,42	183	6	67,36	111,36	0,74	1,80	3,05	5,59
DoSto Wg mit Lok	II - 2c m. Lok	Zwei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestell, max. 42,5 m lang plus Lokomotive	56,32	183	6	151,36	195,36	0,83	2,69	3,05	6,56
DoSto Wg	II - 2d	Drei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestelle, max. 58,6 m lang	52,34	237	10	94,21	157,83	0,80	1,80	2,37	4,97
DoSto Wg mit Lok	II - 2d m. Lok	Drei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestelle, max. 58,6 m lang plus Lokomotive	71,24	237	10	178,21	241,83	0,75	2,50	2,37	5,62
DoSto Wg	II - 2e	Drei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestelle, max. 58,6 m lang	53,84	253	15	96,91	165,54	0,77	1,80	1,69	4,25
DoSto Wg mit Lok	II - 2e m. Lok	Drei Doppelstockwagen, verbunden über Jakobsdrehgestelle, max. 58,6 m lang plus Lokomotive	72,74	253	15	180,91	249,54	0,72	2,49	1,69	4,89
DoSto Wg	II - 3a	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, dreiachsiges Mittendrehgestell, 52 m lang	51,7	283	8	93,06	162,46	0,66	1,80	3,54	6,00
DoSto Wg mit Lok	II - 3a m. Lok	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, dreiachsiges Mittendrehgestell, 52 m lang plus Lokomotive	70,6	283	8	177,06	246,46	0,63	2,51	3,54	6,67
DoSto Wg	II - 3b	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, dreiachsiges Mittendrehgestell, 48 m lang	47,2	239	8	84,96	148,31	0,71	1,80	2,99	5,50
DoSto Wg mit Lok	II - 3b m. Lok	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, dreiachsiges Mittendrehgestell, 48 m lang plus Lokomotive	66,1	239	8	168,96	232,31	0,71	2,56	2,99	6,25

Fahrzeuggattung	Variante	Kurzbeschreibung	Länge in m	Sitzplätze	Türspuren	Leermasse in t	Gesamtmasse (bei aus. gew. Zul.) in t	A (Masse/Sitzplatz)	B (Masse/Meter)	C (Sitzpl./Türspur)	Effizienz E
DoSto Wg	II - 3c	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, dreiachsiges Mittendrehgestell, 48 m lang	47,5	239	12	85,5	151,97	0,72	1,80	1,99	4,51
DoSto Wg mit Lok	II - 3c m. Lok	Zweiteiliger Doppelstockgliederzug, dreiachsiges Mittendrehgestell, 48 m lang plus Lokomotive	66,4	239	12	169,5	235,97	0,71	2,55	1,99	5,25
DoSto Wg	II - 3d	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, zwei dreiachsige Mittendrehgestelle, 72 m lang	71,3	395	12	128,34	223,8	0,65	1,80	3,29	5,74
DoSto Wg mit Lok	II - 3d m. Lok	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, zwei dreiachsige Mittendrehgestelle, 72 m lang plus Lokomotive	90,2	395	12	212,34	307,8	0,54	2,35	3,29	6,18
DoSto Wg	II - 3e	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, zwei dreiachsige Mittendrehgestelle, 72 m lang	71,3	383	18	128,34	226,83	0,67	1,80	2,13	4,60
DoSto Wg mit Lok	II - 3e m. Lok	Dreiteiliger Doppelstockgliederzug, zwei dreiachsige Mittendrehgestelle, 72 m lang plus Lokomotive	90,2	383	18	212,34	310,83	0,55	2,35	2,13	5,04
DoSto TW	III - 1	Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	26,5	87	4	55,65	83	1,28	2,10	2,18	5,55
DoSto TW	III - 2a	Zwei Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	52,8	235	8	110,88	169	0,94	2,10	2,94	5,98
DoSto TW	III - 2b	Zwei Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	53,2	211	12	111,72	169,7	1,06	2,10	1,76	4,92
DoSto TW	III - 2c	Zwei Doppelstockeinzelwagen, max. 24 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	47,8	159	12	100,38	151,2	1,26	2,10	1,33	4,69
DoSto TW	III - 3a	Drei Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	80	391	12	168	258,1	0,86	2,10	3,26	6,22
DoSto TW	III - 3b	Drei Doppelstockeinzelwagen, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	80	383	18	168	261,67	0,88	2,10	2,13	5,11
DoSto TW	III - 3c	Drei Doppelstockeinzelwagen, max. 24v m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	71,9	311	18	151	234,76	0,97	2,10	1,73	4,80
DoSto TW	III - 4a	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 26 m lang, Mittelwagen 24 m lang, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle	99,4	459	16	208,74	319,2	0,91	2,10	2,87	5,88
DoSto TW	III - 4b	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle	91,6	419	16	192,36	297,32	0,92	2,10	2,62	5,64
DoSto TW	III - 4c	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle	88	387	16	184,8	295,36	0,96	2,10	2,42	5,47
DoSto TW	III - 4d	Vierteiliger Doppelstockgliederzug, Endwagen 24 m lang, Mittelwagen 22 m lang, 3 dreiachsige Mittendrehgestelle	87,7	371	24	184,17	288,77	0,99	2,10	1,55	4,64
DoSto TW kl. Räder	III - 8-30	Vierteiliger Doppelstockzug, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	107,2	543	24	225,12	369,0	0,41	2,1	2,26	4,77
DoSto TW kl. Räder	III - 8-31	Vierteiliger Doppelstockzug, max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	107,2	550	24	225,12	323,8	0,41	2,1	2,29	4,8
1- und 2 stöckig	IV - 1a	Vierteiliger ein- und doppelstöckiger Triebzug, Wagen max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	105,94	443	16	188,59	287,7	0,85	1,78	2,77	5,40
1- und 2 stöckig	IV - 1b	Vierteiliger ein- und doppelstöckiger Triebzug, Wagen max. 26,8 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	104,74	423	24	186,46	287,57	0,88	1,78	1,76	4,42

Fahrzeuggattung	Variante	Kurzbeschreibung	Länge in m	Sitzplätze	Türspuren	Leermasse in t	Gesamtmasse (bei aus. gew. Zul.) in t	A (Masse/Sitzplatz)	B (Masse/Meter)	C (Sitzpl./Türspur)	Effizienz E
1- und 2 stöckig	IV - 2a	Vierteiliger ein- und doppelstöckiger Triebzug, Wagen max. 24 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	95,14	367	16	169,33	257,96	0,92	1,78	2,29	5,00
1- und 2 stöckig	IV - 2b	Vierteiliger ein- und doppelstöckiger Triebzug, Wagen max. 24 m lang, zwei Drehgestelle pro Wagen	94,84	355	24	168,82	260,58	0,95	1,78	1,48	4,21
1- und 2 stöckig	IV - 3	Vierteiliger ein- und doppelstöckiger Triebzug, verbunden mit Jakobsdrehgestellen	73,66	243	16	130,92	197,82	1,08	1,78	1,52	4,37

16.4 Rechenweg zur Vergleichsspannung gemäß Kapitel 8.2.6

Die nachfolgenden Betrachtungen basieren auf den theoretischen Grundlagen nach [96] und [98]. [98] beschreibt dazu im Kapitel §10, „der nichtebene, im Grundriss elliptische Stempel“ folgende Voraussetzungen: „Wir wollen voraussetzen, daß beide Krümmungen $1/R_1$ und $1/R_2$ (Anm.: im Folgenden als R_a und R_b bezeichnet) positiv sind, d.h. also, daß die Stempeloberfläche konvex ist. Dann werden die Schnitte dieser Oberfläche mit Ellipsen $\xi = \text{const}$ Ellipsen, und der Berührungsbereich Ω ist ebenfalls eine elliptische Fläche.“

Als Eingangsparameter gelten die Werte aus Tab. 8.8 aus Kapitel 8.2.6:

Eingangsparameter	Lokomotive BR187	Lokomotive IORE	Do-Triebzug
Maximale Radsatzlast	21,75 t	30 t	20 t
Verwendete Radkraft Q	107 kN	147,1 kN	98,1 kN
Raddurchmesser (neu) d	1250 mm	1250 mm	550 mm
$R_{x1} = d/2$	625 mm	625 mm	275 mm
Krümmungsradius des Rades [96] $R = R_{y1}$	360 mm		
Krümmungsradius der Schiene [96] $R' = R_{y2}$	290 mm		
Elastizitätskonstante [96] E	$2,06 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$		
Querdehnungszahl ν	0,25		
Gleitmodul $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	$8,24 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$		

Tab. 8-8: Eingangsparameter zum Vergleich der maximalen Flächenpressungen und Spannungen am Radaufstandspunkt

Die nachfolgende Musterrechnung bezieht sich auf die Parameter für den Doppelstock-Triebzug mit kleinen Rädern. Bei Verwendung der Parameter für die Lokomotive erhält man die entsprechenden Ergebnisse.

$$\text{aus } \frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_{y1}} + \frac{1}{R_{y2}} = \frac{1}{0,36 \text{ m}} + \frac{1}{0,29 \text{ m}} \quad \text{ergibt sich } R_a = 1,49 \text{ m} \quad [\text{Gl. 5}]$$

$$\text{aus } \frac{1}{R_b} = \frac{1}{R_{x0}} = \frac{1}{0,275 \text{ m}} \quad \text{ergibt sich } R_b = 0,275 \text{ m} \quad [\text{Gl. 6}]$$

$$\text{damit ergibt sich das Verhältnis } \frac{R_b}{R_a} = \frac{0,275 \text{ m}}{1,49 \text{ m}} = 0,185 \quad [\text{Gl. 7}]$$

Mit diesem Verhältnis R_b/R_a bzw. R_2/R_1 entnimmt man nun der Tabelle 13.3 nach [98] die Werte für e^2 sowie α_a und α_δ .

Tabelle 7

e^2	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
$\frac{R_2}{R_1}$	1	0,963	0,925	0,885	0,846	0,806	0,765	0,724	0,682	0,637
α_a	0,722	0,726	0,731	0,736	0,741	0,747	0,753	0,760	0,767	0,775
α_δ	0,520	0,523	0,526	0,530	0,534	0,538	0,543	0,547	0,553	0,559
e^2	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
$\frac{R_2}{R_1}$	0,594	0,549	0,502	0,454	0,405	0,353	0,297	0,238	0,174	0,101
α_a	0,783	0,793	0,803	0,815	0,829	0,844	0,863	0,888	0,921	0,975
α_δ	0,565	0,571	0,580	0,589	0,597	0,609	0,623	0,642	0,668	0,713

Tab. 13-3: Zusammenhang für einzelne Werte von e^2 zu R_2/R_1 sowie α_a und α_δ nach [98]

Abgelesen werden aus der Tabelle die folgenden Werte:

$$e^2 = 0,90$$

$$\alpha_a = 0,921$$

$$\alpha_\delta = 0,668$$

$$\text{Mit } a = \left[Q * R_a * 2 \left(\frac{1-\nu}{G} \right) \right]^{1/3} * \alpha_a \quad [\text{Gl. 8}]$$

$$\text{ergibt sich } a = 0,0133 \text{ m}$$

$$\text{Mit } b = a * \sqrt{1 - e^2} \quad [\text{Gl. 9}]$$

$$\text{ergibt sich } b = 0,0058 \text{ m}$$

$$\text{Die Fläche } A \text{ der Ellipse ergibt sich nach [99] zu } A = \pi * a * b \quad [\text{Gl. 10}]$$

$$\text{Somit ist } A = 242,4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Die Normalspannung } \sigma_z \text{ ergibt sich nach [96] zu } \sigma_z = \frac{-3 Q}{2 \pi a b} * \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2} \quad [\text{Gl. 11}]$$

$$\text{Mit } x = y = 0 \text{ ergibt sich für den Mittelpunkt der Ellipse somit } \sigma_z = \frac{-3 Q}{2 \pi a b} \quad [\text{Gl.12.1}]$$

Verwendet man den Eingangswert für die Radkraft Q aus Tab. 8-8 und die Ergebnisse aus Gl. 7 und Gl. 8, so erhält man die maximale Normalspannung zu

$$\sigma_z = \frac{-3 Q}{2 \pi a b} = \frac{-3 * 98.100 \text{ N}}{2 \pi * 13,3 \text{ mm} * 5,8 \text{ mm}} = -607,2 \text{ N/mm}^2 \quad [\text{Gl. 12.2}]$$

Die zulässige Vergleichsspannung nach van Mises lässt sich nach folgender Gleichung ermitteln:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + 3\tau^2} \leq \sigma_F \quad [\text{Gl. 13}]$$

Die in Gl.11 enthaltenen Normalspannungsanteile σ_x und σ_y sowie der Tangentialspannungsanteil τ für Antreiben und Bremsen ergeben sich nach folgenden Gleichungen:

$$\sigma_y = -\nu * \sigma_z * \left[2 + \left(\frac{1}{\nu} - 2 \right) * \frac{a}{a+b} \right] \quad [\text{Gl. 14}]$$

$$\sigma_x = -\nu * \sigma_z * \left[2 + \left(\frac{1}{\nu} - 2 \right) * \frac{b}{a+b} \right] \quad [\text{Gl. 15}]$$

$$\tau = \mu * \sigma_z \quad \text{wobei } \mu = 0,3 \text{ für beide Fahrzeugvarianten gesetzt wird} \quad [\text{Gl. 16}]$$

Damit ergibt sich unter Verwendung der errechneten bzw. definierten Parameter eine Vergleichsspannung von $\sigma_V = 365 \text{ N/mm}^2$.

Mit gleicher Vorgehensweise erhält man den Wert der Vergleichsspannung für die beiden betrachteten Lokomotiven. Die Ergebnisse sind der folgenden Tabelle 8-9 zu entnehmen.

Ermittelte Werte	Lokomotive BR 187	Lokomotive IORE	Do-Triebzug
Verhältnis R_b / R_a	0,42		0,185
Exzentrizität e^2	0,65		0,90
Faktor α_a	0,815		0,921
a-Wert der Ellipse	11,8 mm	13,5 mm	13,3 mm
b-Wert der Ellipse	8,97 mm	10,2 mm	5,8 mm
Fläche der Ellipse A_E	332,5 mm ²	432,6 mm ²	242,4 mm ²
Normalspannung σ_x	- 345,6 N/mm ²	- 400,3 N/mm ²	-395,8 N/mm ²
Normalspannung σ_y	-378,5 N/mm ²	- 364,6 N/mm ²	-515 N/mm ²
Normalspannung σ_z	- 482,7 N/mm ²	- 510,0 N/mm ²	-607,2 N/mm ²
Tangentialspannung τ	144,81 N/mm ²	153 N/mm ²	182,2 N/mm ²
Van Mises Vergleichsspannung σ_V	279,8 N/mm ²	295,8 N/mm ²	365 N/mm ²

Tab. 8-9: Ermittelte Werte zum Vergleich der maximalen Flächenpressung am Radaufstandspunkt