



# LEISE, ENERGIEEFFIZIENT, WIRTSCHAFTLICH

BMVI-Forschungsprojekt  
„Aufbau und Erprobung von Innovativen Güterwagen“

Technologie Screening  
SCI Verkehr / TU Berlin / RWTH Aachen

Auftraggeber:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Hauptauftragnehmer  
(Arge):



Auftragnehmer  
für Energie- und  
Lärmmessungen:



Institut für Land- und Seeverkehr  
Fachgebiet Schienenfahrzeuge



**SCI** / Verkehr

## Technologie Screening für den Aufbau und die Erprobung eines Innovativen Güterwagens

Im Auftrag von:



In Kooperation mit:

**hwh**

Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH

# Technologie Screening für den Aufbau und die Erprobung eines Innovativen Güterwagens

## Kurzfassung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur werden von DB Cargo und VTG innovative Güterwagen aufgebaut und erprobt. Die Hochschulen TU Berlin und RWTH Aachen vertreten durch die Institute ILS und IFS haben dazu ein Technologie Screening durchgeführt, dessen Ergebnisse in dem vorliegenden Bericht zusammengefasst sind. Ergänzt wurde dieser durch eine Wirtschaftlichkeitsannahme von SCI Verkehr, deren Ergebnisse in den Bericht eingearbeitet wurden.

Hochschulbericht

TU-Bericht: 22/2016

Bearbeiter: Mirko Leiste M.Sc., Daniel Jobstfinke M.Sc., Dipl.-Ing. Sebastian Piffka M. Sc.,  
Dipl.-Ing. Nicolas Wille

Projektpartner/Auftraggeber: DB/VTG

Datum: 07.02.2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Radform .....</b>	<b>7</b>
1.1 Technologie/Produkt.....	7
1.1.1 Radform A – sinusförmiger Wellensteg.....	8
1.1.2 Radform B – Gerader Steg .....	8
1.2 Wirtschaftlichkeitsannahmen .....	10
<b>2 Elektronische Bremssteuerung .....</b>	<b>12</b>
2.1 Technologie/Produkt.....	14
2.2 Nutzeneffekte .....	15
2.2.1 Schlüsseltechnologie „ep-Bremse“ .....	15
2.2.2 Detaillierte Betrachtung.....	16
2.2.2.1 Verbesserung der Regelbarkeit.....	17
2.2.2.2 Homogene Belastung des Bremssystems.....	21
2.2.2.3 Verbesserung der Längsdynamik.....	22
2.2.2.4 Effektiveres Bremsverhalten .....	22
2.2.2.5 Operative Verbesserungen .....	23
2.3 Wirtschaftlichkeitsannahmen .....	24
<b>3 Radsatzbeschichtungen .....</b>	<b>27</b>
3.1 Technologie/Produkt.....	27
3.1.1 Vor- und Nachteile .....	28
3.1.2 Lieferanten bzw. Marktreife.....	28
3.1.3 Potenzialeinschätzung und Empfehlung .....	29
<b>4 Radschallabsorber .....</b>	<b>30</b>
4.1 Radial-Radschallabsorber .....	30
4.2 Axial-Radschallabsorber.....	31
4.3 Radkappenschallabsorber.....	32
4.4 Vor- und Nachteile.....	33

4.5	Lieferanten bzw. Marktreife .....	34
4.6	Potenzial und Empfehlung.....	36
<b>5</b>	<b>Lärmschürzen .....</b>	<b>37</b>
5.1	Drehgestellschürzen.....	37
5.1.1	Vor- und Nachteile .....	39
5.2	Radsatzschürzen.....	39
5.2.1	Vor- und Nachteile .....	40
5.3	Marktreife und Potenzialeinschätzung .....	40
<b>6</b>	<b>Aerodynamische Verkleidungen.....</b>	<b>41</b>
6.1	Verkleidung und Leitblech für Wagenübergänge .....	41
6.1.1	Vor- und Nachteile .....	42
6.1.2	Lieferanten und Marktreife .....	42
6.2	Gitter für Autotransporter und Schüttgutwagen.....	42
6.2.1	Vor- und Nachteile .....	43
6.2.2	Hersteller und Marktreife.....	44
<b>7</b>	<b>Konstruktion und Entwicklung .....</b>	<b>45</b>
7.1	Stahlhybridbauweise .....	45
7.1.1	Vor- und Nachteile .....	45
7.1.2	Lieferanten und Marktreife .....	45
7.1.3	Potenzialeinschätzung und Empfehlung .....	46
7.2	Ganzzüge mit MPK.....	46
7.2.1	Vor- und Nachteile .....	46
7.2.2	Lieferanten und Marktreife .....	46
7.2.3	Potenzialeinschätzung und Empfehlung .....	47
<b>8</b>	<b>Telematik und Sensorik.....</b>	<b>48</b>
8.1	Anwendungsbeispiele.....	48
8.1.1	Zustandserfassung des Bremssystems .....	48
8.1.2	Erfassung des Radzustandes .....	49
8.1.3	Zustandserfassung der Radsatzlager .....	49
8.1.4	Sensorik für die Detektion des Wagenkasten- und Ladungszustandes .....	49

8.2	Übersicht über Anwendungsfälle und Hersteller .....	50
8.3	Wirtschaftlichkeitsannahmen .....	53
<b>9</b>	<b>Automatische Pufferschmierung .....</b>	<b>55</b>
9.1	Gleitplatten .....	55
9.2	Automatische Schmiervorrichtungen .....	56
9.3	Vor- und Nachteile.....	58
9.4	Wirtschaftlichkeitsannahmen .....	58
<b>10</b>	<b>Strom- und Datenbusleitung .....</b>	<b>61</b>
10.1	Stromleitung .....	61
10.1.1	Motivation .....	61
10.1.2	Verfügbare Steckverbindungen.....	62
10.1.3	Auswahl geeigneter Kabel .....	68
10.2	Datenbus-Systeme .....	69
10.2.1	Forschungsprojekte zu Bussystemen auf Güterwagen .....	70
10.2.2	Zug- und Fahrzeugbussysteme allgemein .....	70
10.2.3	Train Communication Network Anwendungsbeispiel .....	72
10.2.4	Empfehlung für ein Güterwagenbussystem.....	73
10.3	Wirtschaftlichkeitsannahmen .....	74
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>75</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>78</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>81</b>

## Einleitung

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) werden von der DB Cargo AG und der VTG Rail Europe GmbH innovative Güterwagen aufgebaut und erprobt. Die Hochschulen TU Berlin und RWTH Aachen - vertreten durch die Institute ILS und IFS - haben dazu ein Technologie-Screening durchgeführt, dessen Ergebnisse in dem vorliegenden Bericht zusammengefasst sind. Ergänzt wurde dieser durch Wirtschaftlichkeitsannahmen von SCI Verkehr, deren Ergebnisse in den Bericht eingearbeitet wurden.

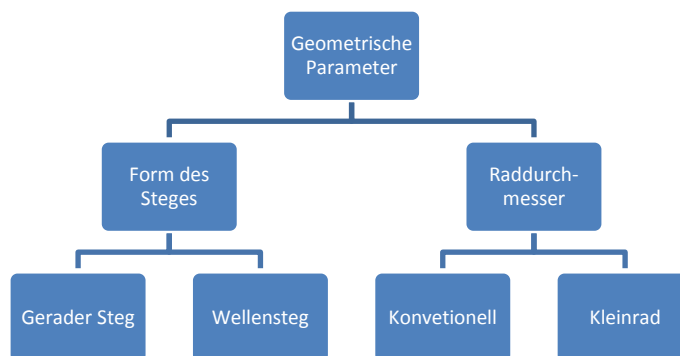
Das Technologie-Screening verfolgt die sinnvollsten Innovationen, die zur Weiterentwicklung von Güterwagen und Schienengüterverkehr beitragen könnten. Folgende Innovationen wurden erstmals im Workshop „Zwischenergebnisse Technologie-Screening“ am 25. Oktober 2016 durch DB Cargo, VTG, hwh, SCI Verkehr, TU Berlin, RWTH Aachen und TÜV Rheinland diskutiert und abgestimmt:

1. Radform
2. Elektronische Bremssteuerung
3. Radsatzbeschichtungen
4. Radschallabsorber
5. Lärmschürzen
6. Aerodynamische Verkleidungen
7. Konstruktion und Entwicklung
8. Telematik und Sensorik
9. Automatische Pufferschmierung
10. Strom- und Datenbusleitung

Die getroffenen Wirtschaftlichkeitsannahmen stellen die zu erwartende Höhe von Investitionskosten, laufenden Kosten sowie potenziellen Kostenersparnissen dar. Diese grobe Analyse dient der schnellen Identifikation von Innovationen mit sehr geringer Chance auf ein erfolgreiches Ergebnis in der detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, welche im nächsten Schritt des Projekts durchgeführt wird. Innovationen, die schon in der aktuellen Analyse als unwirtschaftlich identifiziert wurden, werden nicht weiter betrachtet. Alle anderen Innovationen werden weiterverfolgt.

# 1 Radform

In diesem Kapitel werden mehrere Radformen vorgestellt, welche potentiell die Lärmemissionen senken können. Grundsätzlich ist es sehr sinnvoll direkt am Laufwerk der Güterwagen Optimierungen vorzunehmen, da die dominierende Lärmquelle in der Regel das Rollgeräusch im Rad-Schiene Kontakt ist. Diese Lärmquelle dominiert vor allem im Geschwindigkeitsbereich ab circa 50 km/h bis zur maximalen Betriebsgeschwindigkeit eines Güterwagens und darüber hinaus. [HEWI99] Die Lärminderung wird hauptsächlich durch eine Entkoppelung und/oder durch eine Verschiebung der vertikalen und lateralen Schwingungsmoden der Eigenfrequenzen erreicht. Der Fokus in diesem Kapitel liegt auf der Anpassung der Stegform hin zu einem geraden Steg. Die Möglichkeit kleinere Raddurchmesser zu verwenden, wird hier nur vollständigheitshalber mit aufgeführt und nicht weiter ausgeführt.



**Abbildung 1: Potentielle geometrische Parameter zur Reduzierung der Lärmemission der Radscheibe**

## 1.1 Technologie/Produkt

In diesem Kapitel werden zwei mögliche Radformen vorgestellt. Gemäß Untersuchungen von Rollgeräuschen für verschiedene Radbauarten ist das Lärminderungspotenzial alternativer Radscheiben bereits erfolgreich nachgewiesen worden.

Im Rahmen einer Untersuchung des Fachgebietes Schienenfahrzeuge der TU Berlin konnte bereits der positive Einfluss der Radform auf die Lärmemissionen nachgewiesen werden. Konkret wurde an drei Fahrzeugen der Berliner S-Bahn der Schalldruckpegel in 7,5 m Abstand vom Gleismittelpunkt unter gleichen Randbedingungen gemessen (1999). Alle drei Bauarten waren derzeit mit unterschiedlichen Radscheiben bestückt (siehe Tabelle 1). Es stellte sich bei Vorbeifahrtsmessungen heraus, dass bei 50 km/h in 7,5 m Abstand auf einem Schottergleis die BR 485 mit den geraden Radstegen mit 81 dB(A) am leisesten war. Die tangential gewellte Radscheibe der BR 480 war mit 84 dB(A) immer noch 3 dB(A) leiser als die BR 481 mit den glockenförmigen Radscheiben. [HEWI99]



**Tabelle 1: Übersicht über untersuchte Fahrzeuge und deren Radform im Rahmen einer Lärmemissionsmessung bei der Berliner S-Bahn vom Fachgebiet Schienenfahrzeuge 1999 bei  $v=50$  km/h in 7,5 m Abstand auf Schottergleis [HEWI99]**

Fahrzeug	Radform	Schalldruckpegel $v=50$ km/h
BR 480	Tangential gewellt	84 dB(A)
BR 481	glockenförmig	87 dB(A)
BR 485	Gerader Steg	81 dB(A)

Grundsätzlich kann aus diesen Messungen die Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Anpassung der Radform viel Potenzial hat, um die Lärmemissionen nachhaltig zu senken. Es ist aber allein aufgrund dessen keine Aussage möglich, welche der alternativen Radformen das größere Potenzial hat, da hier sehr viele Parameter hineinspielen. Durch eine gezielte Entwicklung von leisen Radscheiben kann ebenso auch der gewellte Steg leiser sein.

### 1.1.1 Radform A – sinusförmiger Wellensteg

Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, gibt es die Möglichkeit die Radscheibe in tangentialer Richtung wellenförmig zu gestalten. In diesen Abschnitt wird eine Form, nämlich der sinusförmige Wellensteg, vorgestellt. Diese Innovation stammt aus einem Gemeinschaftsforschungsvorhaben (2001-2003) der Deutschen Bahn AG, der TU Dresden und der Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH. Der Radsteg ist, wie in Abbildung 2 dargestellt, sinusförmig in Umfangsrichtung gewellt. Diese Formgebung führt zur Verschiebung der Eigenfrequenzen des Rades, sodass eine geringere Überschneidung von Erregerfrequenzband und Eigenfrequenzen auftritt. Das Schallminderungspotenzial beträgt circa 2 dB(A). Diese Radform wurde nicht über das Versuchsstadium hinaus entwickelt und ist daher auch nicht zugelassen.



**Abbildung 2: Wellenstegrad in verschiedenen Ansichten [KLO12]**

### 1.1.2 Radform B – Gerader Steg

Statt des glockenförmigen Steges ist es ebenfalls möglich einen geraden Steg zu verwenden. Diese Stegform verspricht, wie in Abschnitt 1.1 erwähnt, ebenso eine potentielle Reduktion der Lärmemissionen. Erst durch den Einsatz von scheibengebremsten Güterwagen ist eine Abweichung vom bisherigen glockenförmigen Radsteg möglich. Die in

der Vergangenheit notwendige ertragbare Wärmeleistung von 45 kW nach UIC, ist mit Scheibenbremsen nicht mehr maßgebend. Bei Scheibengebremsten Rädern ist von einer maximalen Wärmeleistung von 15 kW auszugehen und aufgrund der deutlich geringeren thermischen Belastung ist die Glockenform nicht mehr erforderlich.

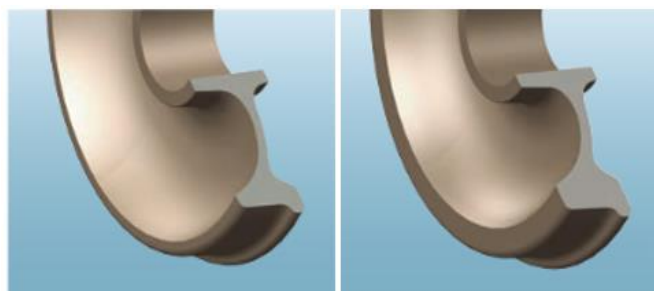
Ein weiterer Vorteil der geraden Stegform ist die einfache Geometrie. Es ist anzunehmen, dass die vereinfachte Geometrie einen geringeren Fertigungsaufwand als das heutige Glockenrad verursacht. Dies könnte sich auch positiv auf den Preis auswirken.

### **Verbreiteter Steg**

Das Lärminderungspotenzial ist besonders hoch, wenn der Radsteg breiter ausgeführt wird. Damit kann die Schwingungsneigung im akustisch relevanten Bereich verringert werden. Auf diese Weise ist eine Reduzierung des Schallpegels von bis zu 4 dB(A) möglich. 1992 wurde diese Verbreiterung des Steges bereits erfolgreich am ICE 1 getestet. Ein signifikanter Nachteil ist die Gewichtssteigerung der Radscheiben um circa 25 %. Als Hersteller kommen alle gängigen Radsatzhersteller in Frage, da die Veränderung der Geometrie aller Voraussicht nach keinen besonderen Fertigungsanspruch stellt.

### **Parabelförmiger Steg**

Abgesehen von Europa sind Radscheiben mit geradem Steg weltweit am meisten verbreitet. Die einzige bekannte Ausnahme in Europa ist Polen. Dort sind mehr als 4.500 dieser Räder im Einsatz. Die dort verwendeten Radscheiben haben einen leicht parabelförmig zur Radsatzmitte gewölbten Steg (siehe Abbildung 3). Da die Wölbung gering ausgeprägt ist, wird dieses Rad der Radform mit geradem Steg zugeordnet. Ein exemplarischer Hersteller, der auch die Radscheiben in Polen liefert, ist das US-amerikanische Unternehmen „Amsted Rail“.



**Abbildung 3: Radscheiben mit Geradem Steg von „Amsted Rail“ in „One-Wear Plus“ und „Multi-Wear“ Ausführung aus Stahlguss [AMS16]**

Eine Besonderheit dieser Räder ist zudem, dass Sie mittels eines speziellen Druckgussverfahrens hergestellt und nicht geschmiedet werden. Diese Radscheiben gibt es in verschiedenen Ausführungen (siehe Abbildung 3). Zum einen gibt es das „One-Wear Plus“, welches gemäß Herstellerangaben ein besonders langlebiges Radprofil besitzt und ein geringeres Eigengewicht hat, dafür aber nicht reprofiliert werden kann. Zum anderen gibt es

die „Two-Wear“ oder „Multi-Wear“ Radscheiben, welche einen breiteren Radkranz besitzen und dadurch reprofiliert sind.

Die Stahlgussräder von „Amsted Rail“ zeichnen sich durch eine besonders harte Oberfläche aus. Um den Einfluss harter Räder auf den Schienenverschleiß zu ermitteln, wurde das Verschleißverhalten in einem Langzeitlaborversuch für verschiedene Härtegrade untersucht.

Das Ziel dieser Untersuchung war es nachzuweisen, dass der Einsatz von harten Radscheiben keinen negativen Einfluss auf den Schienenverschleiß hat, sondern umgekehrt eine Verbesserung darstellt. Dies ist ein oft geäußertes Bedenken in der Schienenfahrzeugbranche und wurde bereits in aktuellen Vorträgen entkräftet. An dieser Stelle wird als exemplarisches Beispiel auf den Vortrag von Frau Dr. Katrin Mädler (DB Systemtechnik) auf der Rad-Schiene Tagung 2015 verwiesen.

In der Tabelle 2 ist die Verschleißveränderung nach 100.000 Testzyklen unter einer Radlast von 55 kN und einem Anlaufwinkel des Rades an die Schiene von 1°30' dargestellt. Entsprechend der Versuche reduzierte sich der Schienenverschleiß deutlich mit dem Einsatz der „Amsted Rail“ Radscheiben um bis zu 67 % (Radscheibe 5). Die Ursache für die starke Ausprägung der Reduktion liegt voraussichtlich in der parabolischen Form des Radstegs. Der Einfluss der Erhöhung des Härtegrades erzeugt eine Verschleißverringerung um circa 5 % (Vergleich von Radscheibe 3 und 5). Dadurch, dass der Fokus des zu Grunde liegenden Auszugs vor allem auf dem Einfluss der Radoberflächenhärte auf den Schienenverschleiß lag, ist die relative Reduktion des Radverschleißes nicht quantifiziert. Eine Verringerung des Radverschleißes tritt aber mit der Härtung der Oberfläche auf und es tritt dementsprechend der geringste Verschleiß bei dem härtesten Testrad (Class C) auf. [BOG10]. Dieser ist deutlich geringer als bei weicheren Rädern.

**Tabelle 2: Auf dem Prüfstand ermittelter durchschnittlicher Schienenverschleiß in Abhängigkeit der Oberflächenhärte der Radscheibe nach [BOG10]**

Nummer	Radscheiben Typ	Bezeichnung	Durchschnittlicher Schienenverschleiß
1	UIC Standard ER7	B5.1/10	100 %
2	Bereift	B4.1/10	86,3 %
3	Class ER7	B8.1/10	37,8 %
4	Class B	B7.1/10	36,78 %
5	Class C (Einsatz in Nordamerika)	B6.1/10	32,64 %

## 1.2 Wirtschaftlichkeitsannahmen


Im Rahmen der Erstellung der Wirtschaftlichkeitsannahmen analysiert SCI Verkehr die direkt entstehenden Anschaffungskosten sowie die gesamten Lebenszykluskosten unter Berücksichtigung der aktuell verfügbaren Informationen.

Bei den Stahlgussrädern des Typs One-Wear Plus verursacht die erwartete Verlängerung des Lebenszyklus direkte und indirekte Kostenreduzierungen gegenüber konventionellen

gegossenen Rädern [AMS16]. Zum einen werden hierdurch weniger Räder über die gesamte Nutzungsdauer eines Güterwagens benötigt und der Verschleiß der Räder wird reduziert. Auf der anderen Seite kommt es zu einer indirekten Reduzierung der Kosten der Räder, da die Anzahl der aufwendigen Radwechsel verringert wird und die Standzeiten der Güterwagen sowie Lagerkosten reduziert werden können. Räder in der Ausführung Multi-Wear können darüber hinaus mehrfach reprofiliert werden. Damit reduzieren sich die Gesamtausgaben für die Räder.

In Deutschland werden in der Regel geschmiedete statt gegossene Räder im Betrieb von Güterwagen eingesetzt. Die drei größten Radhersteller liefern in Deutschland ausschließlich geschmiedete Räder. Daher sind nahezu alle in Deutschland im Einsatz befindlichen Räder geschmiedet. Obwohl geschmiedete Räder gegenüber konventionellen gegossenen Rädern einen höheren Anschaffungspreis haben, bieten sie gegenüber gegossenen Rädern Vorteile in Bezug auf ihren Lebenszyklus, dem Gewicht sowie Lärmemissionen. Allerdings verringern sich diese Vorteile beim Vergleich von aktuellen modernen Produkten, wie den gegossenen Rädern der Typen One-Wear Plus und Multi-Wear von Amsted Rail. Härtere Räder und Multi-Wear-Räder sind in der Anschaffung deutlich teurer als konventionelle gegossene Räder und die Anzahl an Anbietern solcher Räder ist begrenzt. Da die Verwendung von innovativen Radformen dennoch signifikante Potenziale für Kostenreduzierungen bietet, sollte ihre Wirtschaftlichkeit weiter geprüft werden.

**Tabelle 3: Vorteile und Risiken von Stahlgussrädern mit geradem / leicht parabelförmigem Steg**

Vorteile	Risiken	Wirtschaftlichkeitsbewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Signifikante Reduzierung der laufenden Kosten</li> <li>• Niedrigere Radabnutzung dank des niedrigeren Verschleißes → seltenere Radwechsel</li> <li>• Reduzierung von Radbeständen und Wechselanforderungen (Wagen abstellen, Aufwand in Werkstatt, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaum Erfahrung mit gegossenen Rädern in Deutschland</li> <li>• Preise und laufende Kosten noch unklar</li> <li>• Abhängigkeit von einem Hersteller</li> </ul>	

## 2 Elektronische Bremssteuerung

In diesem Kapitel wird im Sinne des Technologiescreenings zunächst die Wirkungsweise der elektronischen Bremssteuerung, im Speziellen für die elektro-pneumatische Bremse erklärt.

Grundsätzlich hat jedes Bremssystem die Aufgabe, bei Bedarf eine Bremskraft zu initiieren. Die Initiierung der Bremskraft geht mit der Anforderung einher, dass der Bremsvorgang zentral, in der Regel vom Führerbremssventil, regelbar ist. Hinsichtlich der Regelung des Bremsvorganges gibt es zwei Möglichkeiten der Informationsübertragung.

Eine Möglichkeit stellt die Regelung über eine Druckluftleitung dar, welche durch den gesamten Zugverband verläuft und wofür auf jedem Fahrzeug Druckluftleitungen vorhanden sein müssen. Über die Regelung des Luftdruckes in dieser sogenannten Hauptluftleitung werden alle Bremssysteme im Zugverband angesteuert. Die Nutzung von Luft als Steuermedium ist im weltweiten Güterverkehr fast ausschließlich in Form der selbsttätigen Druckluftbremse vertreten. Mittels einer stufenweisen Veränderung des Hauptluftleitungsdruckes wird, je nach Bedarf, die Bremskraft erhöht oder gesenkt. Ein Hauptmerkmal und zugleich der dominierende Nachteil dieses Informationsübertragungsweges ist die damit verbundene Trägheit. Ein Bremsbefehl kann auf dieser Weise nur mit einer begrenzten Geschwindigkeit von circa 250 m/s bis 280 m/s übertragen werden. [MIN07] Bei einem Güterzug von ungefähr 750 m Länge benötigt es folglich eine sogenannte Durchschlagzeit von bis zu 3 Sekunden bis der Bremsbefehl am letzten Güterwagen ankommt. Die angestrebte Bremskraft stellt sich mit einer deutlich größeren Verzögerung als 3 Sekunden ein. Der Hintergrund ist, dass die stufenweise Regelung, das heißt Druckveränderung in der Hauptluftleitung, am Führerbremssventil geschieht. Die der Bremsstufe entsprechende Luftmenge muss größtenteils an dieser Stelle entweichen oder zugeführt werden, was im Vergleich zu anderen Steuermöglichkeiten ebenfalls einen sehr trägen Prozessablauf darstellt.

Eine zweite Möglichkeit stellt die Regelung des Bremsvorganges per Übertragung elektrischer Signale dar. Der Vorteil hierbei ist die vielfach schnellere Signalübertragung. Ein Bremsbefehl wird auf diese Weise zeitnah und gleichzeitig in allen Güterwagen unabhängig von der Zuglänge umgesetzt. Das Erreichen der geforderten Bremskraft eines jeden Wagens\des gesamten Zugverbandes erfolgt in deutlich kürzerer Zeit, da die Informationen über die Bremsstufe ebenfalls über elektrische Signale übertragen werden.

Während die Übertragung der Informationen über Druckluft oder elektrische Signale erfolgen kann, wird die Bremskraft immer über die Druckluft erzeugt. Das Arbeitsmedium ist folglich sowohl bei der rein pneumatischen Bremse als auch bei der elektro-pneumatischen Bremse die Druckluft.

Hinsichtlich der Wirkungsweise wird die pneumatische Bremse in zwei Arten unterschieden. Zum einen gibt es die direkte pneumatische Bremse, welche in der Regel nur im Triebfahrzeug integriert ist. Diese Bremse reagiert „direkt“ auf die Veränderung des Luftdruckes. Das heißt, dass bei einer Erhöhung des Luftdruckes in der Hauptluftleitung auch die Bremskraft steigt. Die „indirekte“ pneumatische Bremse, welche in nahezu allen Güterwagen weltweit verwendet wird, wirkt exakt umgekehrt zur Luftdruckveränderung. Das heißt, dass eine konkrete Druckminderung einer definierten Bremskraftsteigerung

entgegensteht. Ein plötzlicher Abfall des Luftdruckes in der Hauptluftleitung verursacht in der Folge beim Einsatz der indirekten pneumatischen Bremse immer einen Bremsvorgang. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass bei gefährdenden Ereignissen, wie beispielsweise Zugtrennungen, bei denen der Luftdruck in der Hauptluftleitung abfällt und ein direktes Ansprechen der Bremse nicht mehr möglich ist, die Wagen \ der Zugverband selbsttätig anhalten.

Bei der elektro-pneumatischen Bremse gibt es ebenfalls die Unterscheidung zwischen „direkter“ und „indirekter“ Bremse. Die Differenzierung hat in diesem Fall technische und nicht sicherheitsrelevante Gründe und wird in den folgenden Absätzen erklärt. Die folgende Tabelle zeigt die Unterschiede in der benötigten Verfügbarkeit von Versorgungs- und Steuerleitungen der verschiedenen Bremssysteme.

**Tabelle 4: Übersicht über ausgewählte Bremssysteme und deren benötigten Versorgungs-/Steuerleitungen:**

	Hauptluftleitung	Signalleitung	Hilfsbehälterleitung
<b>Pneumatische indirekte Bremse</b>	X		
<b>ep-Bremse direkt</b>	X	X	
<b>ep-Bremse indirekt</b>	X	X	x
<b>Maximaldruck</b>	5 bar		10 bar

### **Indirekte „ep-Bremse“**

Die indirekt wirkende „ep-Bremse“ entlüftet und füllt die Hauptluftleitung eines jeden Wagens lokal direkt vor dem jeweiligen (Brems-)Steuerventil. Die Funktionsweise des Steuerventils wird daher bei diesem Prinzip nicht verändert, sondern lediglich der Informationsübertragungsprozess und der Ort der Hauptluftleitungsdruckregulierung. Die Durchschlagzeit wird durch ein elektrisches Signal verkürzt. Dementsprechend ist die Druckluft genau betrachtet auch bei der indirekten „ep-Bremse“ das primäre Steuermedium. Hinsichtlich der Anforderung, die Umsetzung der Bremsbefehle zu beschleunigen, ist es ausreichend, ein zusätzliches Signalkabel im Zugverband zu integrieren. Dieses Kabel dient der Steuerung von Magnetventilen, die die Hauptluftleitung lokal bedarfsgerecht entlüften. Analog zum beschleunigten Bremsen, muss das Lösen der Bremse ebenfalls verbessert werden. Dies geschieht, in dem der Füllvorgang der Hauptluftleitung beschleunigt wird, was bei der indirekten Bremse nur mithilfe einer zusätzlichen Druckluftleitung möglich ist. Für die ep-Bremse in Reisezugwagen wird die bereits vorhandene Hilfsbehälterleitung, welche mit 10 bar betrieben wird, genutzt. Aufgrund der zweiten Leitung wird die indirekte „ep-Bremse“ auch als „Zweileitungs-ep-Bremse“ bezeichnet.

### **Direkte „ep-Bremse“**

Abgesehen von wenigen Ausnahmen verfügen Güterwagen über keine zusätzliche Druckluftleitung. Für Güterwagen wird daher der Einsatz der direkten „ep-Bremse“ empfohlen. Dieses System benötigt nur die bereits vorhandene Hauptluftleitung und ein zusätzliches Signalkabel. Bei der direkten Bremse wird ein elektronisches Steuerventil „direkt“ vom Führerbremsventil des Triebfahrzeugs elektrisch gesteuert. Die Steuerung des Bremsvorganges erfolgt bei Betriebsbremsungen ausschließlich elektrisch ohne eine Absenkung des Hauptluftleitungsdruckes. Die Bremskraft wird zwar weiterhin mittels

Druckluft erzeugt, aber der Luftverbrauch reduziert sich auf diese Art so deutlich, dass der Luftdruck in der Hauptluftleitung deutlich geringeren Schwankungen unterliegt. Die Hauptluftleitung erfüllt die Aufgaben, die Güterwagen mit Druckluft zu versorgen und die Selbsttätigkeit zu realisieren. Zudem dient sie als Rückfallebene im Schadensfall. Für diese zusätzlichen Aufgaben muss, aus Gründen der Redundanz, das elektronische Steuerventil in der Lage sein, im Notfall wie ein konventionelles, rein pneumatisches Steuerventil zu agieren.

## 2.1 Technologie/Produkt

Es gibt weltweit drei Hersteller von elektropneumatischen Bremssystemen für Güterwagen.

### ***EP60 – New York Airbrake***

Ein weltweit genutztes System ist das EP-Bremssystem „EP60“ der Firma „New York Air Brake“, welche zum Konzern Knorr-Bremse gehört. Dieses System wird seit 1988 in den USA eingesetzt. In Kanada, sowie in Südafrika ist es heutzutage ebenfalls verbreitet.

Das System hat folgende Eigenschaften [NYA16]:

- direkte ep-Bremse mit pneumatischer Rückfallebene
- Integrierte Lastabbremmung
- Gleitschutz unbekannt
- automatische Bremsprobe & digitale Erstellung der Wagenliste\reihung integriert
- Kommunikation und Stromversorgung via „LON“ Kabel
- „LON“ In Europa anerkannt und im Zusammenhang mit der ep-Bremse genutzt
- Marktreife: kurzfristig realisierbar (Annahme, da ähnliche Konfiguration bereits in D erfolgreich getestet (FEBIS))

Das Kuppeln der zusätzlichen Leitung geschieht manuell. Das Entkuppeln wird analog zu der Luftleitung über eine Schnellkupplung ohne den Eingriff von Personal realisiert. [VAN08]

### ***ECP – Wabtec***

Ein weiteres System ist „ECP“ der Firma Wabtec Corp., welche von Faiveley Transport übernommen wurde. Dieses System wird in den USA und in Australien für schwere Erzzüge\Rohstofftransport eingesetzt. [RAI14] Es ist anzunehmen, dass dieses System die gleichen Eigenschaften wie das EP60 System hat. [VAN08]

### ***EDS 300 – KES GmbH***

Ein weiteres Produkt stellt das hybride Bremssystem „EDS 300“ der Firma KES GmbH aus Deutschland dar. Das „EDS 300“ ist ein UIC Steuerventil einer indirekten Bremse. Der Unterschied ist, dass die Druckluftabsenkung nicht pneumatisch ausgewertet und der C-

Druck erzeugt wird, sondern elektronisch. Somit handelt es sich hierbei um eine indirekte Bremse. [DB Systemtechnik]

Das Produkt wurde für den europäischen Eisenbahnmarkt entwickelt. Es ist bei diesem System bereits möglich einen Gleitschutz als Option zu integrieren. Eine manuelle Umstellung von Leer auf Beladen oder umkehrt ist aufgrund der integrierten automatischen Lastabbremung nicht mehr notwendig. Das ep-Bremsgerät kann über die Bussysteme „RS485“, „CANopen“, „MVB“ und „Ethernet“ kommunizieren. Die einzelnen Systeme werden im Kapitel 10.2.2 ausführlich erläutert.

Die Stromversorgung des Gerätes ist derzeit mit dem Achslagergenerator der KES GmbH vorgesehen. Eine mögliche Stromversorgung via Kabel ist aber anzunehmen. Dieses System hat den Vorteil, dass es bereits marktreif und zugelassen ist. Die Diagnosefähigkeit der „EDS 300“ ist vorhanden. Der Umfang und die Verwendbarkeit der Diagnosefähigkeit für elementare zukunftsorientierte Anwendungen, wie die automatische Bremsprobe und Wagenlistenerstellung ist zu prüfen.

## **2.2 Nutzeneffekte**

Die Einführung der „ep-Bremse“ bietet eine Vielzahl an Vorteilen. Im Grunde resultiert der Nutzen des Systems einzig aus der Reduktion der Ansprechzeit. Die Nutzeneffekte sind im Abschnitt 2.2.22.3 dargestellt und werden im Anschluss an die Beschreibung der Bedeutung der ep-Bremse für den Schienengüterverkehr detailliert erläutert.

### **2.2.1 Schlüsseltechnologie „ep-Bremse“**

Vorab soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die „ep-Bremse“, unabhängig von der betriebswirtschaftlichen Betrachtung, eine Schlüsseltechnologie für den Schienengüterverkehr darstellt.

Es ist allgemein mithilfe der ep-Bremse möglich signifikante Energieeinsparungen zu erreichen. Die Verringerung des Energieverbrauchs ist nicht nur zum Vorteil für die Eisenbahnverkehrsunternehmen. Aufgrund der einhergehenden Verringerung der Energiebeziehungsweise Treibstoffkosten, ist es ebenso möglich mithilfe der „ep-Bremse“ eine deutliche Entlastung der Umwelt zu erzielen. Diese Entlastung resultiert einerseits aus dem geringeren Energieverbrauch pro Tonnenkilometer, andererseits verringert der Einsatz der „ep-Bremse“ auch den Verschleiß an Rad, Schiene und Bremssystem. Das heißt, dass das ganze Eisenbahnsystem noch nachhaltiger wird. Zum Vorteil der Wagenhalter steigt mit der Verschleißreduktion zudem auch die Wirtschaftlichkeit eines jeden Güterwagens. Dies wiederum kann sich sehr positiv auf den „modal shift“ zu umweltfreundlichen Transportmitteln, wie dem Schienengüterverkehr auswirken, welcher auf den aktuellen UN-Klimakonferenzen von Paris und Marrakesch sehr deutlich gefordert wird.



## 2.2.2 Detaillierte Betrachtung

Allein durch diese Technologie ist es möglich die folgenden Nutzeneffekte zu erreichen:

- Verbesserung der Längsdynamik
- Operative Verbesserungen
- Verbesserte Regelbarkeit
- Effektiveres Bremsverhalten
- Homogene Belastung des Bremssystems

Diese Effekte werden im den nächsten Abschnitten zunächst als Übersicht dargestellt und im Anschluss detailliert erläutert.

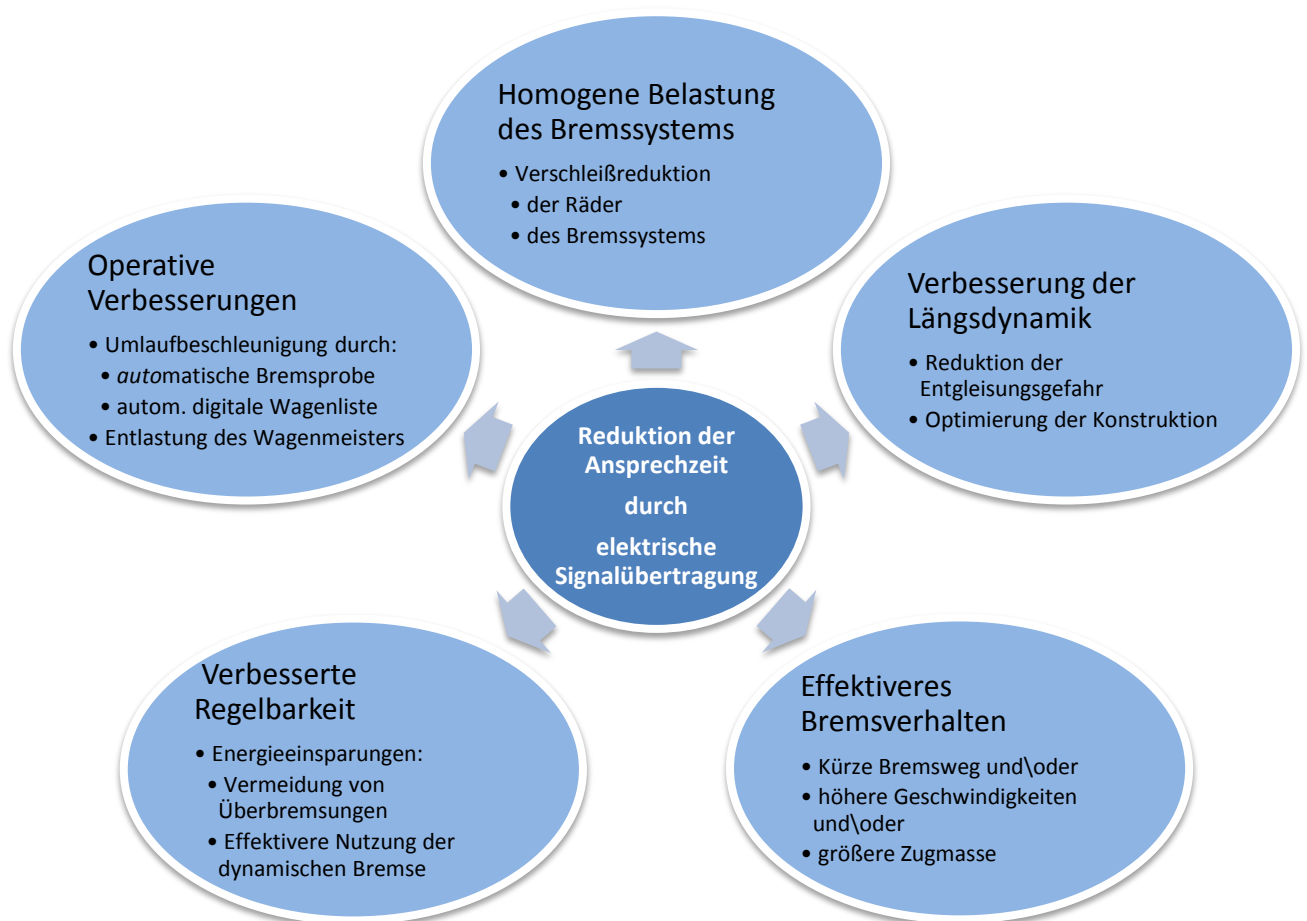


Abbildung 4: Übersicht über Nutzeneffekte des Einsatzes der „ep-Bremse“ durch die Verkürzung der Reaktionszeit

### 2.2.2.1 Verbesserung der Regelbarkeit

Die signifikante Reduktion der Ansprechzeiten sowie die exaktere Einstellbarkeit der Bremskraft erleichtern dem Triebfahrzeugführer die Handhabung des Zugverbandes. Dadurch ist es zudem möglich den Energiebedarf einer Zugfahrt zu reduzieren. Zum einen kann das Überbremsen und das anschließende Beschleunigen vermieden werden. Zum anderen kann die elektrodynamische Bremse effektiver genutzt werden. Das sogenannte Blending, das Zusammenwirken von pneumatischer und dynamischer Bremse, kann auf diese Weise hinsichtlich der dynamischen Bremse optimiert werden. Heutzutage kann aufgrund der ungenauen Dosierbarkeit der rein pneumatischen Bremse die dynamische Bremse im kritischen Geschwindigkeitsbereich nicht effektiv oder teilweise gar nicht eingesetzt werden. [MIN08]

Bedingt durch die schlechte Regulierbarkeit der pneumatischen Bremse, insbesondere bei langen Zügen, die in der Bremsstellung G gefahren werden, kommt es immer wieder zu Bremsungen, die zu einer stärkeren Geschwindigkeitsreduktion führen, als vom Triebfahrzeugführer beabsichtigt. Dieser Effekt wird verstärkt durch Wagen, bei denen die Füll- und Lösezeiten nicht (mehr) mit den Sollwerten übereinstimmen sowie durch die weitere Verbreitung von Verbundstoffbremssohlen. Hier berichten Triebfahrzeugführer immer wieder davon, dass zum Erreichen einer ausreichenden Bremsleistung zunächst eine höhere Bremsstufe eingelegt werden müsse, als es bei Graugusssohlen der Fall wäre. Sobald eine ausreichende Verzögerung festgestellt wird, könnten die Bremsen wieder schrittweise gelöst werden. Das Einlegen höherer Bremsstufen ist für den Fall niedriger Bremsausgangsgeschwindigkeiten oder Winterbedingungen auch in den Anwendungsrichtlinien für Verbundstoffbremssohlen vorgeschrieben. Dieser sicherheitsbedingte Vorgang führt zu einer erheblichen Zunahme des Radverschleißes.

Triebfahrzeugführer sind selbstverständlich bestrebt, zulässige Geschwindigkeiten nicht zu überschreiten. Eine schlecht regulierbare Bremse und/oder ein schlechtes Ansprechverhalten der Bremse können daher dazu führen, dass die zulässige Geschwindigkeit (beispielsweise 60 km/h oder 80 km/h bei einem Abzweig, aber auch andere Geschwindigkeiten bei Langsamfahrstellen) bei Bremsungen unterschritten wird, um auf der sicheren Seite zu liegen. In welchem Ausmaß und mit welcher Häufigkeit dies vorkommt, müsste anhand einer Datenauswertung gezeigt werden. Bei mehreren Mitfahrten auf Güterzügen durch die Autoren in den vergangenen Monaten waren Unterschreitungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von mehr als 10 km/h keine Seltenheit. Diese an sich unnötigen Unterschreitungen der Höchstgeschwindigkeit führen zu einem erhöhten Energieverbrauch bei der Zugfahrt, da Energie zum erneuten Beschleunigen aufgebracht werden muss. Der Einsatz einer ep-Bremse könnte durch ihre sehr gute Regulierbarkeit ein unnötiges Überbremsen wirkungsvoll verhindern. Zur Abschätzung des grundsätzlichen Potenzials dieser Maßnahme wurde eine überschlägige Berechnung durchgeführt. Hierzu wurden folgende Annahmen getroffen:

- 180 Zugfahrten pro Wagen und Jahr
- 25 Wagen pro Zug
- 90 t Lokmasse
- 1,06 Massenfaktor des gesamten Zuges (mittlerer Wert für voll beladenen Zug [konservativ], Quelle DB Systemtechnik)
- 0,8 Wirkungsgrad der Lok (vollständig, d. h. Getriebe, Fahrmotor, Umrichter, Trafo, Hilfsbetriebe)
- 0,12 €/kWh Energiekosten (Wert der letzten Jahre)

Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass 15 % aller Bremsungen zur reinen Geschwindigkeitsreduktion (kein Halt) eine Zielgeschwindigkeit von 80 km/h vorsehen, 35 % eine solche von 60 km/h und die restlichen 50 % eine Zielgeschwindigkeit von 40 km/h. Da das mittlere Wagengewicht einen sehr großen Einfluss hat, aber stärker schwanken kann wegen paariger vs. unpaariger Verkehre, Massengütern vs. Volumengütern etc., wurden drei verschiedene mittlere Wagenmassen betrachtet (siehe Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7).

Die Anzahl der Fahrten, an dieser Stelle als Annahme mit 180 angesetzt, geht rein proportional in die Rechnung ein. Falls es doppelt so viele Fahrten sein sollten, müssten die angegebenen Kosten lediglich verdoppelt werden. Ein realistischer Bereich könnte so liegen, wie den Abbildungen markiert. Dieser müsste aber mit realen Fahrdaten (z.B. PZB-Schrieben) unterlegt werden.

Das Ergebnis, ist das Einsparpotenzial pro Wagen und Jahr, aufgetragen über die mittlere Abweichung von der Zielgeschwindigkeit und der Anzahl der Geschwindigkeitsreduzierungen pro Zugfahrt.

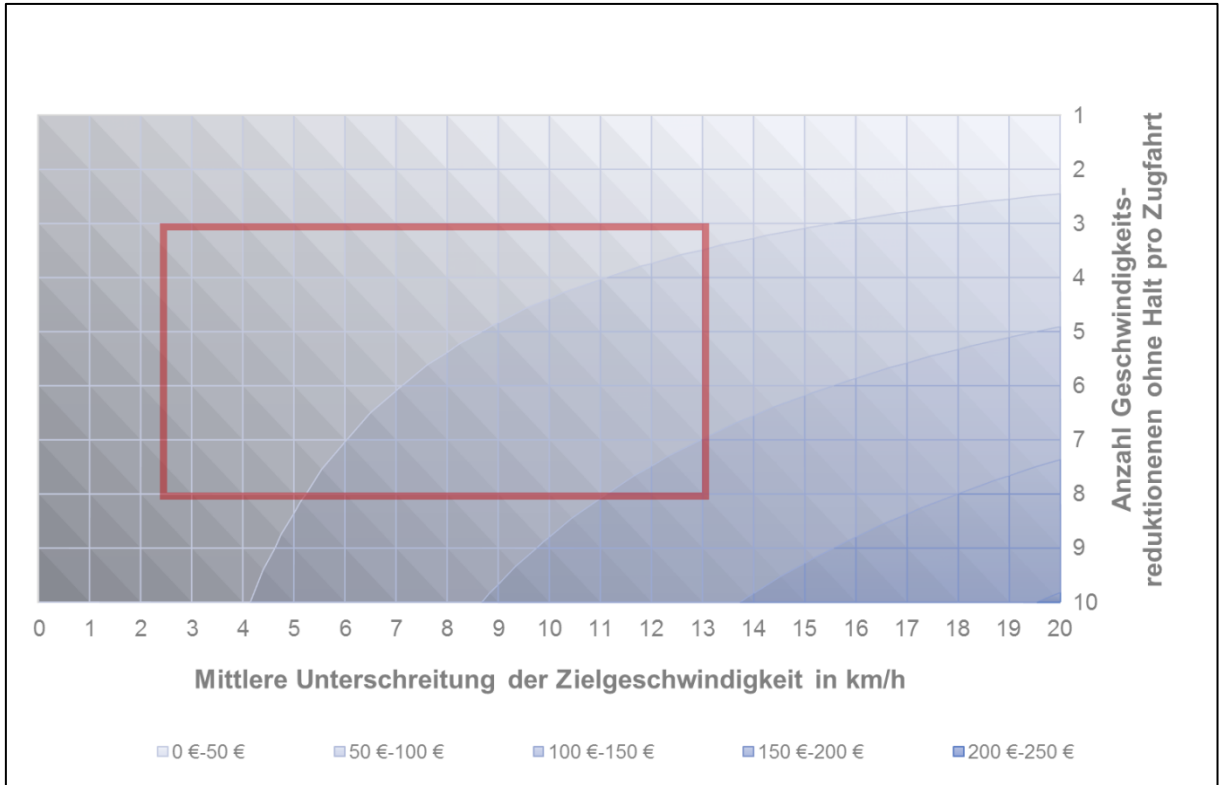


Abbildung 5: Energiekosteneinsparpotenzial pro Wagen und Jahr bei 35 t mittlerer Wagenmasse (leicht) mit Markierung des zu erwartenden Bereiches

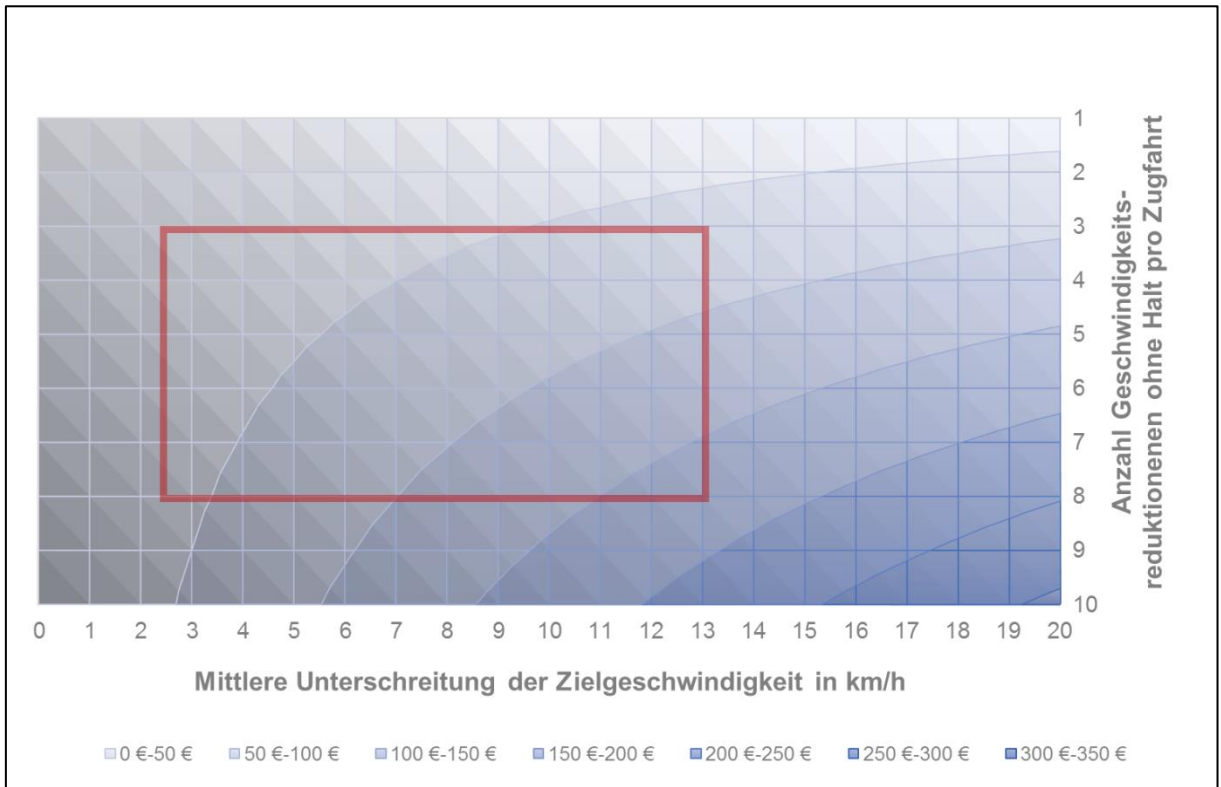


Abbildung 6: Energiekosteneinsparpotenzial pro Wagen und Jahr bei 55 t mittlerer Wagenmasse (mittelschwer) mit Markierung des zu erwartenden Bereiches

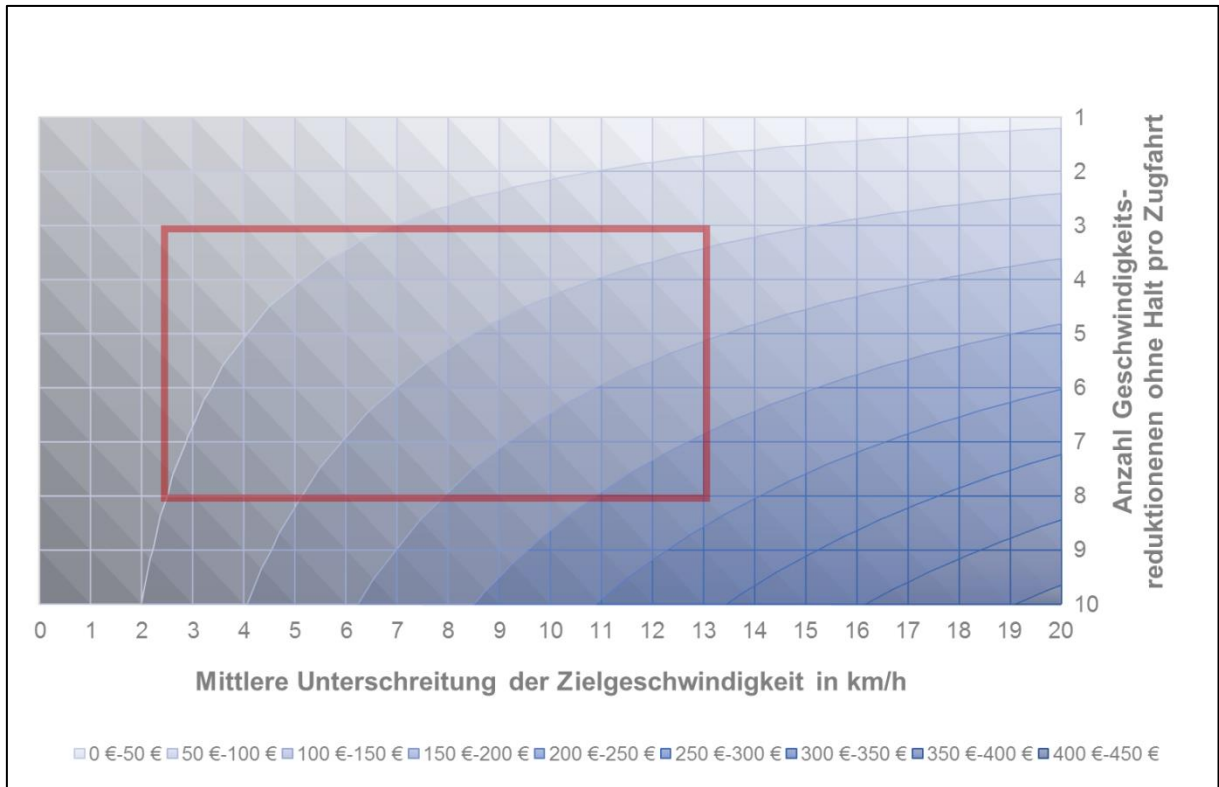
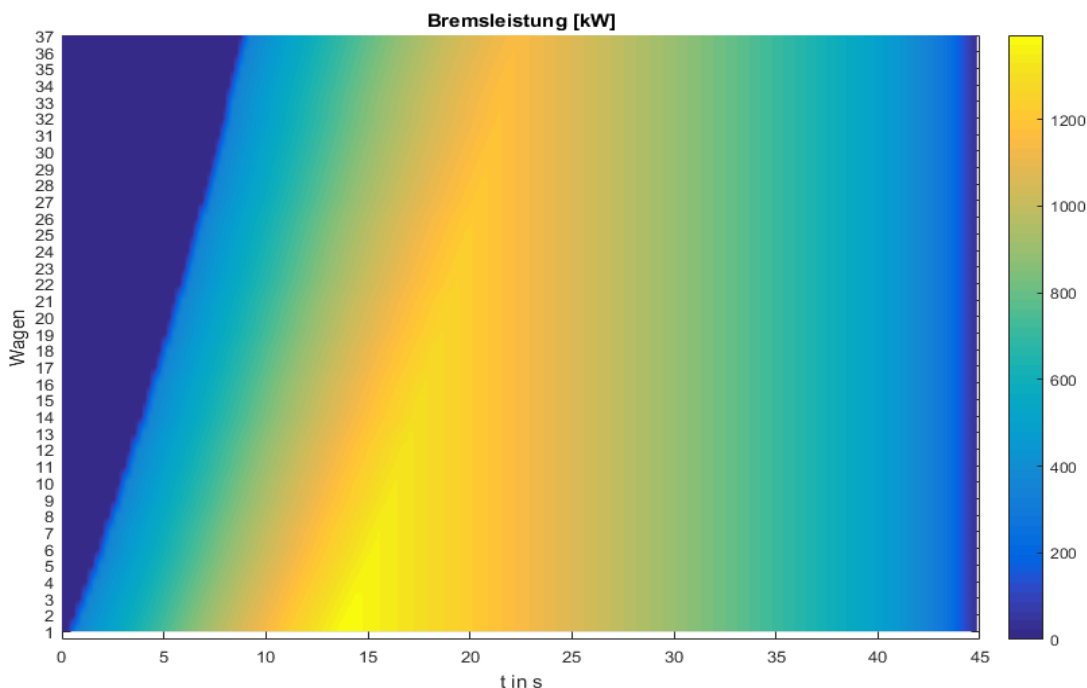


Abbildung 7: Energiekosteneinsparpotenzial pro Wagen und Jahr bei 75 t mittlerer Wagenmasse (schwer) mit Markierung des zu erwartenden Bereiches

### 2.2.2.2 Homogene Belastung des Bremssystems

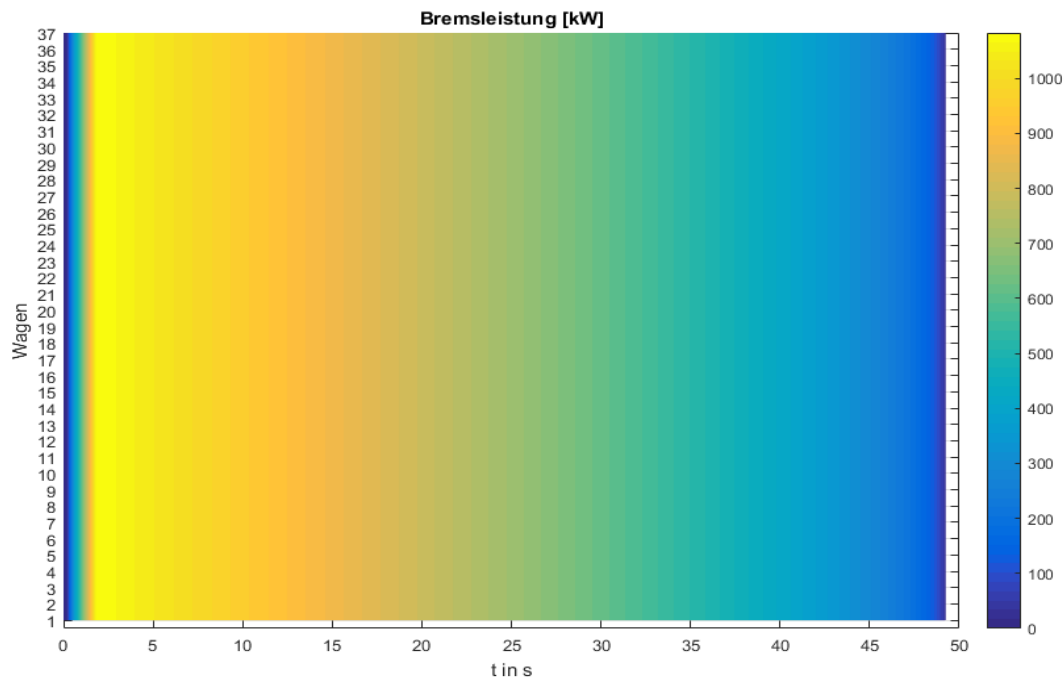
Da aufgrund der erhöhten Übertragungsgeschwindigkeit der Bremsbefehle alle Güterwagen gleichzeitig anfangen zu bremsen, erfolgt eine gleichmäßigere Verteilung der Bremsleistung über den Zugverband.

In Abbildung 8 ist die Bremsleistungsverteilung für einen exemplarischen Güterzug mit 37 Wagen, mit einer Länge von 740 m und einer Gesamtmasse von 3300 t dargestellt. Der Zug führt eine Anhaltebremsung (Betriebsbremsung) in Bremsstellung G aus 100 km/h durch. Es ist zu erkennen, dass die Bremsleistung erst 20 Sekunden nach dem Einleiten des Bremsvorganges harmonisch im Zugverband verteilt ist. Vor allem die vorderen Güterwagen des Zugverbandes müssen deutlich länger bremsen, insgesamt größere Bremsleistungen aufbringen und haben einen wesentlich höheren Verschleiß.



**Abbildung 8: Verteilung der Bremsleistung für einen 740 m langen, 3300 t schweren Güterzug in Bremsstellung G mit rein pneumatischer Bremsung bei einer Betriebsbremsung von 100 km/h bis in den Stillstand**

In der Abbildung 9 ist der gleiche Zugverband wie aus der vorherigen Abbildung dargestellt, mit dem Unterschied, dass der Zugverband mit der ep-Bremse bremsen. Es ist zu erkennen, dass alle Wagen über den gesamten Bremsvorgang mit der gleichen Bremsleistung bremsen. Die maximalen Reibleistungen reduzieren sich um bis zu 20 %. Die maximale Klotzkraft am Rad um bis zu 28 %. Zusätzlich zur Reduktion der Belastung des Bremssystems und der Räder ist der Bremsweg in diesem Beispiel um circa 3 % kürzer. Mit der Entlastung des Bremssystems ist auch eine deutliche Reduktion des Verschleißes an den Bremsklötzen und den Rädern beziehungsweise an den Bremsscheiben und –belägen zu erwarten.



**Abbildung 9: Verteilung der Bremsleistung für einen 740 m langen, 3300 t schweren Güterzug mit elektropneumatischer Bremsung bei einer Betriebsbremsung von 100 km/h bis in den Stillstand**

### 2.2.2.3 Verbesserung der Längsdynamik

Ein gleichmäßiges Ansprechen aller Bremsen verbessert die Längsdynamik im Zugverband signifikant. Beim Bremsen mit der „ep-Bremse“ reduzieren sich die Druckkräfte im Zugverband derart, dass ein deutlich geringes Längsdruckniveau im Zugverband herrscht. Der Zugverband agiert de facto wie ein einzelner Wagen. Der Vorteil ist zum einen das vollständige Entfallen des Entgleisungsrisikos in Folge zu großer Längsdruckkräfte. Zum anderen ist die sicherheitsbedingte Umstellung zwischen den Bremsstellungen G und P nicht mehr nötig. Das heißt, die erzwungene Verzögerung des Bremskraftaufbaus durch den Wechsel in Bremsstellung G, zur Minimierung der Längsdynamik, entfällt. Der Zugverband kann infolge dessen dauerhaft in Bremsstellung P verkehren, was mit einer Steigerung der Bremsleistung des Zugverbandes einhergeht. Positiv ist ebenfalls, dass eine Verringerung des Verschleißes an den Zug-Stoßeinrichtungen zu erwarten ist.

### 2.2.2.4 Effektiveres Bremsverhalten

Der Bremsvorgang wird durch das gleichzeitige Ansprechen aller Bremsen und der damit einhergehenden Bremsverkürzung deutlich effektiver. Das ermöglicht es, Züge mit höherer Geschwindigkeit und/oder größeren Zugmassen bei gleichem Bremsweg fahren zu lassen.

Zuglängen<sup>1</sup>- und Zugmassenrestriktionen<sup>2</sup>, bei denen heutzutage die Bremsleistung eines Zuges reduziert werden, entfallen an dieser Stelle. Für einen Zugverband mit ep-Bremse kann dementsprechend immer das angeschriebene Bremsgewicht angerechnet werden. Ob gemäß [MIN07] sogar ein Zuschlag aufgrund der entfallenden Längenrestriktion von circa 12 % möglich ist, gilt es zu überprüfen.

### 2.2.2.5 Operative Verbesserungen

Für den Betrieb ergeben sich vor allem aus der Verkürzung des Bremsweges sowie durch die Diagnosefähigkeit der „ep-Bremse“ Vorteile. Mit Diagnosefähigkeit ist vor allem die Funktion des Selbsttests gemeint. Dies kann zum Beispiel in Form von Zustandsmeldungen über:

- das Steuerventil,
- den Bremszylinderdruck,
- den Hauptluftleitungsdruck und
- der Daten\Kommunikationsverbindung zur Lok

erfolgen.

Die Diagnosefähigkeit ermöglicht die automatisierte Erstellung von digitalen Wagenlisten sowie die automatische Bremsprobe. Insbesondere die Bremsprobe ist in der heutigen Durchführung sehr zeitintensiv. Der Zeitaufwand reduziert sich dadurch schätzungsweise um circa 1 Stunde pro vollständiger Bremsprobe. Für die vereinfachte Bremsprobe ist eine Zeitersparnis von jeweils 15 Minuten anzunehmen. Die Umläufe können auf diese Weise deutlich beschleunigt werden sowie Stillstandzeiten reduziert werden. Zudem ist es denkbar, mit der Diagnosefähigkeit eine Unterwegsabfrage („Bremsprobe“ während der Zugfahrt) zu integrieren. Unter Umständen sind dafür weitere Sensoren notwendig. Auf diese Weise können defekte im Bremssystem früher detektiert werden und die betroffenen Wagen gegebenenfalls am Zielort oder Rangierbahnhof gezielt der Wartung zugeführt werden. Eine optische Anzeige am Wagen könnte den lokalen Wagenmeister sofort, zum Beispiel beim Einfahren in den Rangierbahnhof, einen Handlungsbedarf signalisieren. Eine ungünstige Fehlerdetektion in der Ausfahrgruppe unmittelbar vor der Ausfahrt, die die Abfahrt des Güterzuges unter Umständen massiv verzögern kann, wird dadurch verhindert.

Der Wagenmeister erfährt durch die Automatisierung der Bremsprobe, durch die automatische Erstellung der Wagenliste sowie durch den Wegfall der Bremsstellungen G und P eine deutliche Entlastung.

---

<sup>1</sup> Das angeschriebene Bremsgewicht bezieht sich auf 500 m lange Güterzüge. Bei längeren Zügen wird das anrechenbare Bremsgewicht des gesamten Zuges reduziert. Für einen 700 m langen Zug beträgt der Abschlag 10 %. [MIN07]



Die Verkürzung des Bremsweges erlaubt es, wie bereits unter Aspekt „Effektiveres Bremsverhalten“ aufgeführt, bei gleicher Zugkonfiguration dauerhaft über die gesamte Strecke schneller zu fahren. Es sei an dieser Stelle nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Erhöhung der Bremsleistung, durch den Wegfall der Bremsleistung „Güterzug G“, eine je nach Streckenabschnitt dauerhafte Erhöhung der maximalen Fahrgeschwindigkeit zulässt. Der Zeitgewinn pro Fahrt resultiert folglich nicht aus den optimierten Bremsvorgängen, sondern ausdrücklich durch die Fahrt mit höherer Endgeschwindigkeit.

### 2.3 Wirtschaftlichkeitsannahmen

Die Nutzung einer ep-Bremse ermöglicht mehreren betriebliche Verbesserungen sowie die Erschließung von Einsparpotenzialen (Nutzeneffekte).

Die Verbesserung der Regelbarkeit hat einen bedeutenden Einfluss auf den Energieverbrauch. Wie im Kapitel 2.2.2.1 dargestellt, könnte das Einsparpotenzial bis zu 450 Euro pro Wagen pro Jahr erreichen. Die reale Ersparnis hängt vom Gewicht der mittleren Wagenmasse ab. Die tatsächlich zu erzielende Ersparnis liegt voraussichtlich zwischen **100 und 150 Euro** pro Wagen pro Jahr, welche aus der Einsparung von Energiekosten beim EVU resultiert.

Parallel wird eine Verringerung des Verschleißes der Bremsen durch gleichmäßige Bremsvorgänge erzielt. Die homogene Belastung des Bremssystems reduzierte, beispielweise im Nordamerikanischen Markt, die Radtemperatur um 6% und die Verschleißkosten um bis zu 30%. [BAH06] Bei den Bremssohlen wurde eine Ersparnis von bis zu 25% erzielt. [BAH06] Dies sind Erfahrungswerte von Untersuchungen in den USA. Die Einsparung im europäischen Schienengüterverkehr muss näher überprüft werden, sind aber wahrscheinlich deutlich niedriger.

Die Verbesserung der Längsdynamik reduziert die potenziellen Kosten von Entgleisungen. Allerdings sind diese Kosten schwierig zu kalkulieren, da für die Kalkulation von Entgleisungen die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls sowie dessen Ausmaß nötig wären. In diesem Schritt wird dieses Potenzial als zusätzlicher Nutzen betrachtet, aber nicht kalkuliert.

Ep-Bremsen können auch operative Verbesserungen schaffen. Die Diagnosefähigkeit dieser Bremsen kann beispielweise die Bremsprobe optimieren. Die Durchführung von Bremsproben nimmt viel Zeit in Anspruch. Mindestens einmal pro Tag müssen die Bremsen vollständig überprüft werden. Hinzu kommen noch ein bis zwei vereinfachte Bremsproben. Wenn diese Prozesse durch die ep-Bremse übernommen werden können, erwartet SCI Verkehr eine Ersparnis in Bezug auf Personalkosten von **490-500 Euro** pro Wagen pro Jahr. Hierfür wurden folgende Annahmen getroffen:

- Zuglänge: 25 Wagen
- 1 Stunde Aufwandreduzierung bei der vollständigen Bremsprobe
- 15 Minuten Aufwandreduzierung bei der vereinfachten Bremsprobe
- Personalkosten: 50 Euro pro Stunde
- 180 Betriebstage pro Jahr (durchschnittlich)
- 1 vollständige und 1,5 vereinfachte Bremsprobe pro Betriebstag (durchschnittlich)


Darüber hinaus besteht Einsparungspotenzial hinsichtlich der Einsparung von Fahrzeugen (Güterwagen und Lokomotiven) durch die schnellere Bremsprobe. Das effektive Bremsverhalten und die damit verbundene Erhöhung der Bremsleistung hat über die Energiekostenreduzierung hinaus positive Effekte auf die Erhöhung der Infrastrukturkapazität, denn Züge können in kürzerer Zugfolge und/oder schneller fahren. Mehrere positive Effekte können daraus resultieren, wie bspw. die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der Schiene aufgrund von schnelleren Zügen oder eine intensivere Nutzung der Infrastruktur. Das ist ein theoretisches Sparpotenzial, denn die Geschwindigkeitserhöhung ist abhängig von Infrastrukturkapazität und Netzeffekte (je mehr Wagen so fahren, desto größer der Effekt). Die Einführung der ep-Bremse in Kohleverkehren in Richards Bay in Südafrika führte u.a. zu einer deutlichen Reduzierung der Fahrzeit. [RAI07]

Die Kosten für die Umrüstung auf eine ep-Bremse in den USA liegen zwischen 6.000 und 8.000 US-Dollar pro Wagen. [WSJ15] Im Betrieb bei Schienengüterverkehrsbetreibern - wie der US-amerikanischen Class-1-Bahngesellschaft Norfolk Southern Railway - sind bereits deutliche Betriebsvorteile der ep-Bremse erzielt worden. [BMP09]

Die Summe der einzelnen kalkulierten Vorteile und Einsparpotenziale beträgt **590-650 Euro** pro Wagen pro Jahr. Hinzu kommen noch die erwähnten nicht einkalkulierten Vorteile, wie Verschleißreduzierung, Energieeinsparung durch Verbesserung der Längsdynamik sowie die Kostenreduzierung der Infrastrukturnutzung und der niedrigere Bedarf an Fahrzeugen.

Die Wirtschaftlichkeit der ep-Bremse hängt insbesondere vom Netzwerkeffekt, also der Verbreitung der ep-Bremse im Betriebsgebiet sowie der Aufteilung von Kosten und Investitionen ab. Eine ep-Bremse mit Gleitschutz führt zusätzlich zu einer Reduzierung von Flachstellen um bis zu 80%. Der Gleitschutz verursacht allerdings zusätzliche Investitionskosten. Die Voraussetzung für die Nutzung einer ep-Bremse ist eine vorhandene Stromversorgung am Güterwagen.

**Tabelle 5: Vorteile und Risiken einer ep-Bremse**

Vorteile	Risiken	Wirtschaftlichkeitsbewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapazitätserweiterung</li> <li>• Geringere Verschleißkosten</li> <li>• Energieeinsparung</li> <li>• Reduktion von Entgleisungen</li> <li>• Zeitersparnis durch elektronische Bremsprobe</li> <li>• Ersparnis bei Bremssohlen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Anschaffungskosten pro Wagen</li> <li>• Abhängigkeit von Netzwerkeffekten und unklare Aufteilung der Kosten</li> <li>• Positive Externalität für Infrastrukturbetreiber</li> </ul>	

## 3 Radsatzbeschichtungen

### 3.1 Technologie/Produkt

Die Lärmentwicklung von Güterwagen entsteht vordergründig im Rad/Schiene-Kontakt. Durch Körperschallübertragung findet eine Induktion von Schwingungen auf andere Körper statt (z.B. der Radscheibe). Die Schallabstrahlung dieser schwingenden Oberflächen lässt sich durch Beschichtung mit schallabsorbierenden Materialien (Polyurethan (PU)-Schäumen) dämpfen. Abbildung 10 zeigt anschaulich die Beschichtung eines Radsatzes:

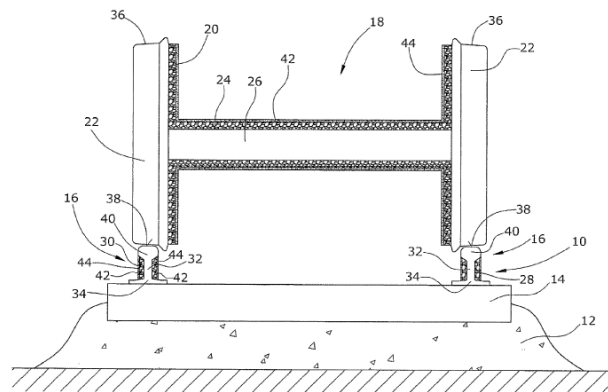


Abbildung 10: Schallschutzbeschichteter Radsatz [ZIN09]

Neben der Beschichtung von schwingenden Oberflächen direkt besteht außerdem die Möglichkeit, schallreflektierende Bauteile (z.B. den Drehgestellrahmen) bei geringen Mehrkosten zu beschichten. Hiervon wäre eine weitere Absenkung des Schalldruckpegels zu erwarten. Eine weitere Einsatzmöglichkeit stellt die Beschichtung von Körperschallübertragenden Bauteilen (z.B. der Drehpfanne) dar. Mit dieser Maßnahme kann eine sekundäre Schallentstehung wie beispielsweise bei unbeladenen Kesselwagen (Resonanzkörper) reduzieren.

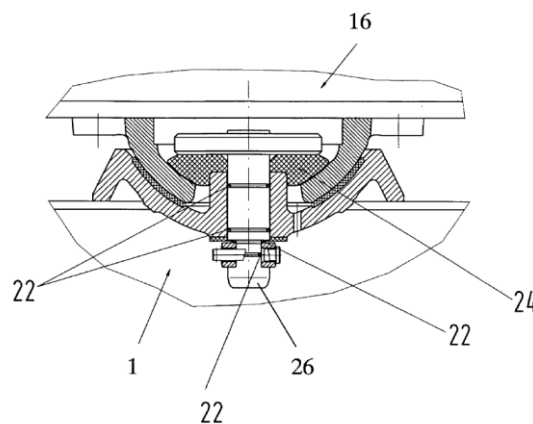


Abbildung 11: Drehpfanne [BUN04]

### 3.1.1 Vor- und Nachteile

Lärmindernde Beschichtungen von Drehgestellen zeichnen sich in erster Linie durch zwei wesentliche Vorteile aus: Effektivität und geringe Kosten. Einerseits soll die Körperschallentstehung an schwingenden Oberflächen selbst durch die dämpfende Wirkung der Beschichtung reduziert werden. Andererseits soll durch die Beschichtung weiterer Bauteile (wie etwa dem Drehgestellrahmen) eine Verringerung der Schallreflexion und Aufnahme von Luftschallwellen erreicht werden. Darüber hinaus sorgen sie für die Unterbrechung von Körperschallübertragung zwischen Wagenkasten und Drehgestell.

Die Kosten für eine nachträglich aufgetragene Beschichtung pro Drehgestell auf einen niedrigen dreistelligen Betrag [ZIN16]. Bei Beschichtung einer höheren Anzahl von Drehgestellen kann über eine (Teil-)Automatisierung des Beschichtungsvorganges nachgedacht werden.

Grundsätzlich kommen alle Güterwagentypen für - auch nachträglich aufgebrachte - Schallschutzbeschichtungen infrage. Weiterer Vorteil ist die gleichzeitige Schutzwirkung vor mechanischen Beschädigungen wie bspw. beim Schotterflug. Aufgrund der guten chemischen Beständigkeit eignen sich PU-Beschichtungen auch zur Innenbeschichtung von Kesselwagen. Vorteilhaft ist auch das geringe Mehrgewicht, hier sind Werte von etwa 20 kg pro beschichtetem Drehgestell zu erwarten<sup>3</sup> [ZIN16]. Als nachteilig erweisen sich hingegen die schlechtere Zugänglichkeit bzw. Einsehbarkeit der Bauteile. Die Detektion allfälliger Rissbildungen kann somit unter Umständen erschwert werden. Ferner wird die Lärmentstehung im Rad/Schiene-Kontakt selbst nicht direkt beeinflusst. Für Radbremsscheiben scheidet die Verwendung von Beschichtungen aufgrund der thermischen Belastung aus. Da bisher kaum betriebliche Erfahrungswerte von PU-beschichteten Komponenten existieren wären derzeit noch offene Fragen hinsichtlich der Alterungs- und Abriebbeständigkeit unter realen Betriebsbedingungen zu klären. Bei Scheibenbremsen muss keine Erkennung von zu hohem Wärmeeintrag durch Farbabbblätterungen mehr vorgeschrieben werden.

### 3.1.2 Lieferanten bzw. Markreife

Als potentielle Lieferanten kommen prinzipiell eine Vielzahl von Anbietern von Polyurethan-Beschichtungen infrage. Der Auftrag der Beschichtung kann vom fahrzeugwartenden Unternehmen unter geringem Aufwand selbst durchgeführt werden.

Die der Technologie zugrunde liegenden Patente wurden bereits vor einigen Jahren erteilt [ZIN09], [SCH02]. Auch wenn bisher keine Erfahrungen in der Praxis gesammelt werden konnten erscheint die technologische Hürde zur betrieblichen Umsetzung als gering.

---

<sup>3</sup> Zweilagige Beschichtung der Radsätze.

### 3.1.3 Potenzialeinschätzung und Empfehlung

Außer für die Beschichtung von Radsatzwellen bzw. der Räder kann die Beschichtung auch zur Reduktion sekundärer Lärmemissionen verwendet werden. Dies wären in erster Linie Kesselwagen (Resonanzkörper) und Kraftfahrzeug-Transportwagen.

Hervorzuheben ist das günstige Kosten-Nutzen-Verhältnis von Beschichtungen zur Lärmreduktion. Fernerhin können alle bestehenden Altbaugüterwagen kostengünstig lärmgemindert werden. Insbesondere für Wagen mit geringer jährlicher Laufleistung prädestiniert sich die Beschichtung von lärmemittierenden Baugruppen damit.

In Anbetracht der geringen Kosten und dem zu erwartenden hohen Nutzen kann abschließend die Empfehlung gegeben werden, Drehgestelle mit beschichteten Radsätzen (und ggf. weiteren beschichteten Komponenten) zumindest versuchsweise umzusetzen. Speziell für Bestandsgüterwagen mit geringer jährlicher Laufleistung erscheint die Lärminderung durch Einsatz von Beschichtungen die einzige ökonomisch sinnvolle Möglichkeit.

## 4 Radschallabsorber

Zur Dämpfung der Laufgeräusche der Räder von Schienenfahrzeugen besteht die Möglichkeit, Radschallabsorber einzusetzen. Diese verringern die Amplituden der Schwingungen des Schienenrades. Dabei ist zwischen axialen und radialen Schwingungen zu unterscheiden. Radiale Schwingungen treten beim Abrollvorgang des Schienenrades auf dem Gleis auf, die axialen Schwingungen werden durch Kurvenfahrten verursacht und werden als Kurvenkreischen bezeichnet. In den folgenden Unterkapiteln werden drei Radschallabsorber beschrieben. Dabei wird auf den Aufbau und die dämpfenden Fähigkeiten der Schallabsorber eingegangen. Darauf folgt eine wirtschaftliche Betrachtung der vorgestellten Schallabsorber.

### 4.1 Radial-Radschallabsorber

Die Absorptionsfähigkeit dieser Radschallabsorber dient vorwiegend den radialen Schwingungen. Eine Absorption der axialen Schwingung fällt geringer aus. Zur Befestigung der Radial-Radschallabsorber werden diese innenliegend am Radkranz auf der Spurkranzseite mit radialer Ausrichtung angebracht. In der folgenden Abbildung ist ein Produkt beispielhaft dargestellt.



Abbildung 12: Radial-Radschallabsorber des Bochumer Vereins [FEH11]

Die Schallabsorber, welche als Schichtung von Metallzungen und elastischem Material aufgebaut sind, können mit zwei Befestigungsarten am Schienenrad montiert werden. In der Abbildung 13 ist eine Nut zur Befestigung zu erkennen. Bei dieser Befestigungsart werden die einzelnen Radialschallabsorber mit Nutensteinen in einer Schwalbenschwanznut befestigt, die an der Radkranzinnenseite im Bereich des Spurkranzes spanend gefertigt wird. [FEH11]



Abbildung 13: Radial-Radschallabsorber des Bochumer Vereins am Schienenrad mit Nut zur Befestigung [FEH11]

Eine Verspannung der einzelnen Radialradschallabsorber mit einer Haltevorrichtung innenliegend am Radkranz stellt eine zweite Befestigungsvariante dar (vergleich siehe Abbildung 14). Durch das Weglassen der Nut kann dieser Radial-Radschallabsorber auch bei Verwendung von Klotzbremsen eingesetzt werden.

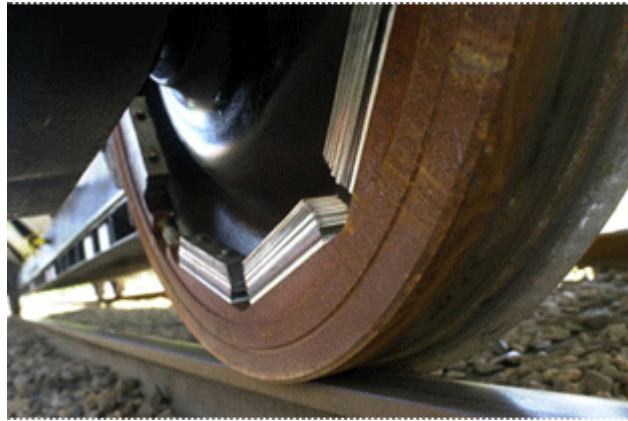


Abbildung 14: Radial-Radschallabsorber der Schrey & Veit GmbH mit Haltevorrichtung am Schienenrad [SUV16]

## 4.2 Axial-Radschallabsorber

Die Axial-Radschallabsorber dienen hauptsächlich der Absorption des Schalls, der in axialer Richtung, z.B. bei Kurvenfahrten entsteht. Eine Absorption des Schalls durch radiale Schwingung fällt geringer aus. Abbildung 15. zeigt die Befestigung der einzelnen Axialradschallabsorber die durch Schrauben mit Muttern direkt auf der Radscheibe befestigt werden. Dabei ist die Auflagefläche möglichst eben zu gestalten.



Abbildung 15: Axial-Radschallabsorber des Bochumer Vereins [FEH11]



Abbildung 16: Axial-Radschallabsorber von GHH-Bonatrans am Schienenrad [GHH16]



Die Hauptwirkung dieses Axial-Radschallabsorbers ist die Verringerung der axialen Kreischfrequenz. Es wird gleichzeitig eine breitbandige Dämpfung in die Radscheibe induziert.

### 4.3 Radkappenschallabsorber

Der Radkappenschallabsorber verringert Geräusche durch entstehende radiale und axiale Schwingungen beim Abrollen des Schienenrades. Zur optimalen Lärmreduzierung werden an einem Schienenrad jeweils ein Radkappenschallabsorber an der Radinnen- und Radaußenseite montiert. Der Radkappenschallabsorber, in Form und Einbau ähnlich einer Tellerfeder, stützt sich einerseits in einer umlaufenden Nut an der Radnabe ab. [FEH11] Andererseits pressen sich 30 thermisch standfeste Reibelemente je Radkappenschallabsorber, die am Absorberblech befestigt sind, auf eine auf akustische Wirkung ausgelegte Anlagefläche am Schienenradkranz. Abbildung 17 zeigt Radkappenschallabsorber, die auf einem Radsatz montiert sind.



Abbildung 17: Radkappenschallabsorber des Bochumer Vereins, vorletzte Entwicklungsstufe [FEH11]

Da die Kontur des Schienenrades zur Aufnahme des Radkappenschallabsorbers sich von der gängigen Bauart eines Schienenrads unterscheidet, entfällt die Möglichkeit zur Umrüstung bestehender Schienenräder. Eine Nutzung mit Klotzbremse ist durch die Befestigung an der Nabe und den thermisch standfesten Reibelementen möglich.



Abbildung 18: Radkappenschallabsorber des Bochumer Vereins am Güterwagen [FEH11]

## 4.4 Vor- und Nachteile

Eine einfache Montage der Radial-Radschallabsorber an Schienenrädern ist hervorzuheben. Die kompakte Konstruktion und die gute Sichtbarkeit des Schienenrades sind ebenfalls als Vorteil anzusehen.

Nachteilig bei der Befestigungsvariante durch eine Nut im beanspruchten Radkranz ist die Schwächung an einem kritischen Bereich des Schienenrades, so dass eine festigkeitsmäßige Anpassung des Schienenkranzes erforderlich wird. Bei beiden Befestigungsvarianten ist eine Anpassung der Absorber an den jeweiligen Umfang bzw. Radius des Rades nötig. Die Absorber sind je nach Schienenradtyp und -größe entsprechend der Schienenradeigenfrequenzen anzupassen. Durch die Hitzeentwicklung bei Klotzbremsen werden Radial-Radschallabsorber für diesen Bremsentyp nicht eingesetzt. [FEH15] Auch die geringe Absorption der axialen Schwingungen, bedingt durch die Montage und Ausrichtung des Absorbers, wird als nachteilig angesehen. Es muss weiterhin sichergestellt werden, dass sich die Befestigungsschrauben durch Vibrationen nicht lösen.

Obwohl die Axial-Radschallabsorber an der Radscheibe montiert werden, kann es bei starker Hitzeentwicklung durch den Einsatz von Klotzbremsen zu einem Ausfall der Funktion als Absorber führen. Die Schallbildung am Schienenrad in kleinen Bogenradien und Weichenfahrten wird minimiert. Durch die offene Bauweise ist das Schienenrad leicht zu sichten.

Als Nachteil, bedingt durch die Montage und Ausrichtung des Absorbers, gilt die geringere Absorption des radialen Schalls. Weiterhin ist eine Anpassung der Absorber für verschiedene Schienenräder hinsichtlich Geometrie und Frequenz notwendig. Auch hier muss sichergestellt werden, dass sich die Befestigungsschrauben durch Vibrationen nicht lösen.

Der Radkappenschallabsorber, welcher in erster Linie für den Einsatz mit Klotzbremsen entwickelt ist, dämpft sowohl radiale, als auch axiale Schwingungen durch den Kontakt der Reibelemente auf die auf akustische Wirkung ausgelegte Anlagefläche am Schienenradkranz. Weiterhin kommt es auch zu einer Absorption des abgestrahlten Schalls, da die Radkappe die Schienenradscheibe abdeckt. Ein Lösen von Schraubverbindungen entfällt beim Radkappenschallabsorber, da dieser in einer Nut an der Nabe befestigt ist. Die Hitzeentwicklung bei einem Bremsvorgang durch Klotzbremsen hat keinen Einfluss auf die Festigkeit und Funktion des Absorbers.

Die Umrüstung auf Radsätze mit Radkappenschallabsorbern ist mit einem Kompletttausch der Schienenräder verbunden. Auch die Sichtkontrolle des Schienenrades auf Risse bzw. Indikation einer Überbremsung ist bei diesen Absorbern eingeschränkt.

## 4.5 Lieferanten bzw. Marktreife

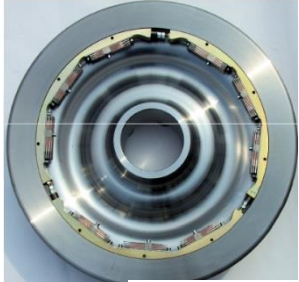

Die Radial-Radschallabsorber und der Axial-Radschallabsorber finden im Personenverkehr Verwendung und gelten als Stand der Technik. Sie sind im Schienenverkehr erprobt und anerkannt. Im Bereich des Güterverkehrs werden sie zum heutigen Zeitpunkt selten verwendet.

Als Hersteller und Lieferanten der Radial-Radschallabsorber sind der Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH, LucchiniRS und Schrey & Veit GmbH zu nennen. Die Axial-Radschallabsorber werden beispielsweise von den Herstellern Bochumer Verein GmbH, LucchiniRS und GGH-Bonatrans hergestellt. Diese werden in Tabelle 6 einzeln aufgelistet und die Eignung für die Bremstypen genannt. Zudem wird das Lärmreduktionspotenzial für die jeweilige Schwingungsart angegeben.

Der Radkappenschallabsorber befindet sich in der Erprobung und steht kurz vor der Marktreife. Der Nachweis der Lärmreduktion um 3 dB(A) (79 zu 82 dB(A)) wurde mit einem Vorgängerrad (Entwicklungsprototyp auf Basis der Bauart 004) bei einer Messfahrt in Anlehnung an die TSI Lärm und ISO 3095, die durch die VTG organisiert wurde, erbracht. In der nächsten Entwicklungsstufe wurde die Dämpfungswirkung durch konstruktive Maßnahmen verbessert und durch Messungen der Übertragungsfunktion sowie vergleichende, schalltechnische Untersuchungen in der Schallschutzkabine am IFS verifiziert. Durch geeignete Werkstoffwahl und Fertigungsverfahren wurde die Anforderung in der Dauerschwingprüfung in Anlehnung an die DIN EN 61373 erfüllt. Die Weiterentwicklung erfolgte mit einem Schienenrad auf Basis der Bauart 303.

Die nächsten Entwicklungsschritte beschäftigen sich mit den Themen der Kontrolle auf Risse bzw. Indikation einer Überbremsung, da die Sicht auf die Schienenradscheibe durch die Radkappe eingeschränkt ist. Lösungsansätze wären z.B. Löcher in der Radkappe zur möglichen Erkennung von Rissen mit Hilfsmitteln und Auftragung von Farbumschlagfarben am Radkranz, durch die eine Überbremsung erkannt werden kann. Als Lieferant ist bei diesem Radschallabsorber ebenfalls der Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH zu nennen.

**Tabelle 6: Übersicht über Radschallabsorbertechnologien, deren Hersteller und Eignung für Klotz- und Scheibenbremsen**

Absorber		Klotzbremse	Scheibenbremse	Grafik zum Absorber
Radial-Schallabsorber Verein 5 bis 6 dB(A)	Bochumer	ungeeignet	geeignet	 <p>[FEH11]  Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH - seit 1842</p>

Absorber	Klotzbremse	Scheibenbremse	Grafik zum Absorber
Radial-Schallabsorber Schrey & Veit, Lärmreduktions- potenzial 3,5 dB(A)	bedingt	geeignet	 [SUV16] 
Radial-Schallabsorber Syope von LucchiniRS, Lärmreduktions- potenzial 4 bis 7 dB(A)	ungeeignet	geeignet, Hochgeschwindigkeit	 [LUC16] 
Axial-Radschallabsorber Bochumer Verein	ungeeignet	geeignet	 [FEH11]  Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH - seit 1842
Axial-Radschallabsorber Bonatrans GmbH	bedingt	geeignet	 [GHH16] 
Axial-Radschallabsorber Hypno von LucchiniRS Lärmreduktions- potenzial 3 bis 4 dB(A)	geeignet	geeignet	 [LUC16] 
Radkappenschallabsorber vom Bochumer Verein Lärmreduktions- potenzial 3 dB(A) in der vorletzten Entwicklungsstufe	geeignet	geeignet	 [FEH11]  Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH - seit 1842

## 4.6 Potenzial und Empfehlung

Aufgrund der hauptsächlich durch das Abrollen des Schienenrades auftretenden Radial-schwingungen werden die Radial-Radschallabsorber für den Bereich Hochgeschwindigkeits- und Fernverkehr, da hier vorwiegend Geraden und Bögen mit großen Radien zu erwarten sind, weiter ihren Einsatz finden. Weiterhin sind diese Absorber bekannt und erprobt.

Dementsprechend werden die Axial-Radschallabsorber auch weiterhin in Zügen des Nahverkehrs bzw. Straßenbahnen zu finden sein, da hier eine Lärminderung für kleine Bogenradien und Weichenfahrten gewünscht ist.

Radial- und Axial-Radschallabsorber, im Aufbau aus einer Schichtung von Metallzungen und elastischem Material, sind empfindlich auf die Hitzeentwicklung, die beim Einsatz von Klotzbremsen entstehen können, aber für Scheibenbremsen stellen diese kein Problem dar.

Radkappenschallabsorber, dessen Entwicklung eigentlich auf Güterwagen mit Klotzbremsen zielt, sind unempfindlich gegen Hitzeentwicklung und zeichnen sich durch gutes Absorptionsvermögen aus. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Kosten bei Radial- und Axial-Radschallabsorbern höher als bei einem Radkappenschallabsorber sind.

Im Vergleich zu einem standardmäßigen Radsatz kann der Mehraufwand eines Radkappenschallabsorbers wie folgt bestimmt werden:

Zur Abschätzung der Kosten der Radkappenschallabsorber werden nachfolgend die Mehrkosten eines Radsatzes mit Radkappenschallabsorber auf Basis der Schienenräder nach Bauart 303 im Vergleich zur Anschaffung eines üblichen Radsatzes nach Bauart 303 gegenübergestellt. Dies wird für „einen Güterwagen“ und für „1000 Güterwagen“ jeweils in der Ausführung mit Drehgestellen berechnet.

Für einen Güterwagen mit Drehgestellen würden derzeit die erforderlichen 16 Radkappenschallabsorber als Kombination aus Stanzen und Laserschnitt gefertigt. Die 480 Reibelemente würden als Frästeile auf einem Automaten hergestellt. Somit ergeben sich Mehrkosten für einen Radsatz bei Ausrüstung eines Güterwagens durch die Herstellung und Montage der Radkappenschallabsorber, der Reibelemente und die Mehrarbeit an den Schienenrädern von ca. 1.300,00 Euro.

Wird der Fertigungsprozess für höhere Stückzahlen z.B. für 1000 Güterwagen mit Drehgestellen ausgelegt, können durch automatische Umform- oder Stanzprozesse und das Spritzgießen der Reibelemente Kosteneinsparungen erreicht werden. Berücksichtigt man für diese Losgröße auch die Kosten für die Investitionen der Maschinen zur Bearbeitung der hohen Stückzahlen, so ergeben sich Mehrkosten für einen Radsatz durch die Herstellung und Montage der Radkappenschallabsorber, der Reibelemente und die Mehrarbeit an den Schienenrädern von ca. 450,00 Euro.

## 5 Lärmschürzen

Lärmschürzen stellen eine Möglichkeit dar die Lärmbelastung des Schienengüterverkehrs zu reduzieren. Lärmschürzen sind lärmisolierende und -absorbierende Schürzen zur Minderung der Schallausbreitung nah an der Quelle. Als Anwendungsbeispiele sind Lärmschürzen bisher nur als Teil der Seitenverkleidung bei der SBB Re460, Re450 und bei Straßenbahnen bekannt. Im Güterverkehr gibt es mehrere Forschungsprojekte, die sich mit dem Thema auseinandergesetzt haben. Im Betriebseinsatz sind keine.

Die Grundsätzlichen Anforderungen an Schallschürzen sind [Czo10]:

- Abschirmung der Schallquelle (Drehgestelle, Radscheiben)
- Reduktion des Luftspaltes zwischen Boden und Schallschürze
- Material der Schürzen darf nicht zu Eigenschwingungen neigen.
- zusätzliche Absorptionsmaterialien an der Innenseite der Schürze und Antidröhnbeschichtungen erhöhen die Wirksamkeit

Die Anforderung, die Einsehbarkeit während der Wagentechnischen Untersuchung zu gewährleisten, ist beim Einsatz von Diagnoseeinrichtungen nicht relevant.

Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Lärmschürzen. Zum einen gibt es Drehgestellschürzen die großflächig das Drehgestell seitlich abschirmen und zum anderen gibt es Radsatzschürzen, welche lediglich ein Teil des Radsatzes abdecken.

### 5.1 Drehgestellschürzen

Die Befestigung von Drehgestellschürzen kann am Wagenkasten und am Drehgestell selbst erfolgen. Die Montage am Wagenkasten ist aufgrund der Anforderungen an das Lichtraumprofil ungünstiger. Hierbei gilt es sich an das europäische „Worst-Case“ Lichtraumprofil zu halten, welches deutliche Einschränkungen hinsichtlich der akustischen Gestaltung mit sich bringt. In den folgenden Abbildungen sind zwei Beispiele von am Wagenkasten befestigten Lärmschürzen zur Abschirmung der Drehgestelle aufgezeigt.



Abbildung 19: Test einer Lärmschürze mit Befestigung am Wagenkasten in der akustischen effektivsten Kombination mit einer niedrigen Schallschutzwand und leiser, präparierter SBB-Lok BR 460 [TU Berlin]



Abbildung 20: Test einer Lärmschürze bei der DB befestigt am Wagenkasten mit einer niedrigen Schallschutzwand [TU Berlin]



Abbildung 21: Lärmschürzen am Low Noise Train mit seitlichen Öffnungen zur Einsehbarkeit im Wintertest [MAH15]

### 5.1.1 Vor- und Nachteile

Die für das Projekt Low Noise Train 1996 entwickelte Schallschürze der Deutschen Bahn AG erzielte eine Abschirmung von 3 dB(A). [Czo10] In weiteren Messungen und Projekten wurden durch Schallschürzen an Schienenfahrzeugen eine Reduktion von 1-3 dB(A) gemessen. Die Streuung erklärt sich in den Anforderungen an die Konstruktion. Je mehr vom Drehgestell abgedeckt wird, je höher ist die potentielle Lärminderung. [MAH15] Zusammenfassend allein ohne Einsatz von niedrigen Lärmschutzwänden ist folglich eine Lärmreduktion von 1-3 dB(A) potentiell möglich. Zudem kann eine Lärmschürze die Aerodynamik des Güterwagens verbessern und damit den Fahrwiderstand reduzieren.

Der Nachteil dieser Lärmschürzen ist die erschwerte Inspektion und Sichtprüfung nach heutigem Maßstab sowie die eventuell eingeschränkte Kompatibilität mit streckenseitigen Heißläuferdiagnoseanlagen. Mit Diagnosetechnik am Wagen ist das zu kompensieren. Es können zudem je nach Anwendung Behinderungen beim Be- und Entladen auftreten. [MAH15] Zudem erhöhen Lärmschürzen das Wagengewicht leicht.

Gemäß bisheriger Kostenschätzung mit 4.000 – 8.000 € ist diese Art von Lärmschürzen, solange keine gestuften lärmabhängigen Trassenpreise wie in der Schweiz in D vorhanden sind, sehr kostenintensiv. Meist wird jedoch mit einer Zeitverzögerung von 5 bis 10 Jahren die Schweizer Praxis übernommen. Dann können Schürzen zu Ertragsbringern werden. Die Wintertauglichkeit von Lärmschürzen ist noch unklar.

## 5.2 Radsatzschürzen

Neben den Drehgestellschürzen wurden im Rahmen des Projektes „Low Noise Train“ seitens der ÖBB und SBB Radsatzschürzen getestet. Diese haben eine gemessene Schallreduktion von 2 dB(A) erreicht. [MAH15] Radsatzschürzen werden am Lagergehäuse angebracht und ragen hauptsächlich nach unten aus (siehe Abbildung 22). Allerdings sind die dort ausgeführten Schürzen in mehrfacher Hinsicht ungeschickt gestaltet und mit Sicherheit nicht am Ende ihrer Möglichkeiten.



Abbildung 22: Beispiel von Radsatzschürzen für Güterwagen aus dem Projekt Low Noise Train seitens ÖBB und SBB [HEWI02]



### 5.2.1 Vor- und Nachteile

Die Vorteile von Radsatzschürzen sind im Wesentlichen, dass das Lichtraumprofil leichter eingehalten werden kann und die optische Einsehbarkeit leicht besser ist als bei Drehgestellschürzen. Auch sind sie universeller bei verschiedenen Wagentypen verwendbar.

Nachteilig ist, dass die Schallschutzwirkung (je nach Forschungsprojekt) geringer ist als bei Drehgestellschürzen. Es ist aufgrund der schlechteren Lärmisolation im Vergleich zu Drehgestellschürzen grundsätzlich anzunehmen, dass das Minderungspotenzial geringer ist. Die Lärminderung in Verbindung mit niedrigen Schallschutzwänden ist ebenfalls geringer. Eine Kompatibilität mit streckenseitigen Heißläuferüberwachungsanlagen ist zu prüfen (DIN EN 15437-1).

### 5.3 Marktreife und Potenzialeinschätzung

Es gibt derzeit keine marktreifen Lärmschürzen für Güterwagen. Abgesehen von dem System aus dem Projekt „Low Noise Train“, welches in der Schweiz zugelassen ist, sind alle bekannten Lärmschürzen nicht über den Erprobungsstand hinaus entwickelt worden. Ein bekannter aber nicht kommerzieller Hersteller ist „Apuset Oy“ aus Finnland. Einige Prototypen wurden bei der DB AG, SBB, ÖBB und durch die TU Berlin am Beispiel einer Straßenbahn und der S-Bahn Berlin erfolgreich getestet.

Das Potenzial der Technologie wird als positiv eingeschätzt. Vor allem die Drehgestellschürzen erscheinen als sinnvoll, da diese als einzige das Drehgestell zu einem Großteil abschirmen und bei entsprechender Gestaltung eine größere Lärminderung als die erprobten Lärmschürzen haben. Zudem bildet die Kombination mit der niedrigen Lärmschutzwand ein derart großes Reduktionspotenzial, welches durch keine andere Maßnahme erreicht werden kann.

## 6 Aerodynamische Verkleidungen

In diesem Kapitel werden zwei Maßnahmen für die Optimierung der Aerodynamik von Güterwagen vorgestellt. Beide Maßnahmen beziehen sich im Wesentlichen auf Veränderungen am Bestandswagen und erfordern keinen elementaren Eingriff in die Wagenstruktur. Zum einen werden Verkleidungen und Leitbleche für den Wagenkasten und zum anderen aerodynamische Gitter für Autotransportwagen vorgestellt.

### 6.1 Verkleidung und Leitblech für Wagenübergänge

Eine Option die aerodynamischen Eigenschaften von Güterwagen zu verbessern, ist die Montage von Leitblechen zum Beispiel an den Wagenübergängen. In der Abbildung 23 ist am Beispiel eines Tanklastwagens eine mögliche Ausführung von Leitblechen dargestellt. Bei Schienenfahrzeugen ist im Gegensatz zu Nutzfahrzeugen und vor allem bei Leitblechen immer auf die Eignung für den Zweirichtungsbetrieb zu achten. Das Tragflächenprofil der Leitbleche sowie eine geeignete Werkstoffauswahl verringern die Wirbelentstehung und damit auch den Luftwiderstand. Als Werkstoffe sind grundsätzlich leichte Materialien zu empfehlen, zum Beispiel Fieberglass oder Faserverbundstoffe. Ein wesentlicher Aspekt bei der Gestaltung der Wagenübergänge ist eine Minimierung des Spaltes und damit eine Reduktion von Luftwirbeln zwischen den einzelnen Güterwagen



**Abbildung 23: Exemplarische Darstellung von Leitblechen an einem Lkw [KKC16]**

Eine weitere ähnliche Möglichkeit ist zudem eine vollständige oder eine Teilverkleidung des Güterwagens. Hierfür kommen zum Beispiel Seitenverkleidungen zwischen den Drehgestellen oder die Verkleidung offener Zugänge in Frage. In der folgenden Abbildung ist eine Beispielhafte Anwendung aus dem Nutzfahrzeugbereich für Seitenverkleidungen und nochmals für die Gestaltung der Wagenübergänge darstellt.



**Abbildung 24: Aerodynamische Optimierung eines Lkws durch Leitbleche und Seitenverkleidungen [WAB16]**

### 6.1.1 Vor- und Nachteile

Der Einsatz von Leitblechen verbessert die Aerodynamik und somit auch den Energieverbrauch. Am Beispiel von Nutzfahrzeugen konnte der Kraftstoffverbrauch um 1.5 l pro 100 km reduziert werden bei einer Reduzierung des Luftwiderstands von bis zu 10 %. Zudem ist es möglich, dass durch Verkleidungen die Beladung besser geschützt wird. Eine Reduzierung von Fahr-\Windgeräuschen kann ebenfalls erzielt werden. [WAB16]

Nachteilig wirkt sich ein, je nach Konstruktion und je nach Verwendung von Diagnosesystemen erhöhter Betriebsaufwand (Montage, Einstellung des Anstellwinkels) aus. Zudem sind leichte Gewichtssteigerungen zu erwarten.

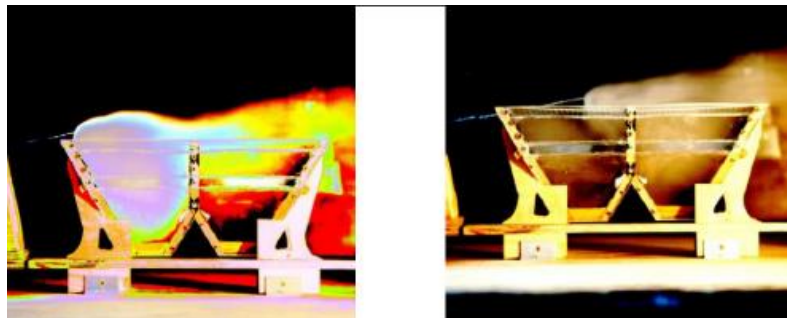
### 6.1.2 Lieferanten und Marktreife

Als Hersteller kommen viele Unternehmen in Frage. Im Folgenden sind ausgewählte Firmen beispielhaft genannt:

- Technik Lehmann & Sohn GmbH
- KK Composites GmbH
- Wabco
- Kuda /Megaform
- Willig
- KK Components

## 6.2 Gitter für Autotransporter und Schüttgutwagen

Speziell für Autotransporter ist die Integration von aerodynamisch optimierten Gittern eine Möglichkeit den Fahrwiderstand zu reduzieren. Die Gitter können an den Seitenwänden angebracht werden. Auf diese Weise werden große Luftwirbel, welche bei entsprechend großen Öffnungen entstehen, durch viele kleine Öffnungen reduziert. Am Beispiel eines Schüttgutwagens wurde dies an der Technischen Universität Berlin bereits erfolgreich nachgewiesen (siehe Abbildung 25). [SOH13]



**Abbildung 25: Modellversuch zur Verringerung des Fahrwiderstandes durch aerodynamische Gitter, links großer Wirbel ohne Gitter, rechts sehr kleine Wirbel mit festem Gitter [SOH13]**

Insofern bereits ein Gitter vorhanden ist, wie zum Beispiel bei dem in der Abbildung 26 dargestellten Autotransswagen können diese hinzu aerodynamischen Gittern optimiert werden.



**Abbildung 26: Moderner Autotransportwagen von Waggonbau Niesky mit seitlichen Gitter zum Schutz vor Vandalismus aufgenommen auf der Innotrans 2016**

### 6.2.1 Vor- und Nachteile

Die Vorteile von aerodynamischen Gittern sind umfangreich. Grundsätzlich sind diese einfach zu realisieren. Der Energieverbrauch wird durch die Verringerung des Fahrwiderstandes reduziert. Zudem bewirkt die optimierte Aerodynamik eine Reduzierung der Geräuschemissionen. Das Gitter kann gleichzeitig als Diebstahl- bzw. Schutz vor Vandalismus genutzt werden und bringt daher fast keine Gewichtserhöhung mit sich. Die Wirkung der Gitter ist darüber hinaus im Windkanal schnell messbar.

## 6.2.2 Hersteller und Marktreife

Es ist kein Hersteller bekannt. Es wird hierbei aber von einer schnellen Realisierbarkeit durch die Waggonhersteller ausgegangen. Eine Begleitung des Prozesses durch Aerodynamiker ist analog der Automobilindustrie unumgänglich.

## 7 Konstruktion und Entwicklung

Das Themengebiet 7 Konstruktion und Entwicklung befasst sich mit den Möglichkeiten durch konstruktive Maßnahmen das Gewicht der Wagen zu reduzieren, die Flexibilität zu erhöhen und die Wirtschaftlichkeit der Wagen allgemein zu steigern.

### 7.1 Stahlhybridbauweise

Leichtbau kann unter anderem durch Substitution von bewährten aber schweren Materialien durch leichtere Alternativen erfolgen, beispielsweise Kunststoffe oder Faserverbundwerkstoffe. Für Güterwagen ist die Marktakzeptanz für Bauteile die nicht aus Stahl gefertigt sind als gering einzuschätzen. Zum einen aus Kostengründen zum anderen aus Gründen der Wartbarkeit. Daher beschränkt sich der Vorschlag von alternativen Materialien auf den Einsatz von hochfesten Stählen in hoch beanspruchten Zonen ohne kritische Schweißnähte. Die so entstehende Stahlhybridbauweise führt zu folgenden Vor- und Nachteilen.

#### 7.1.1 Vor- und Nachteile

Der Vorteil der Stahlhybridbauweise liegt in dem Gewichtseinsparpotenzial. Reparaturen, insbesondere das Schweißen, werden komplexer, sind im Verhältnis zu anderen Leichtbau Materialien allerdings immer noch deutlich einfacher. Die Kosten für eine Stahlhybridbauweise liegen über denen einer reinen Baustahlweise, aber deutlich unter den Kosten anderer Leichtbaumaterialien.

#### 7.1.2 Lieferanten und Marktreife

Hochfeste Stähle sind ein ausgereiftes Produkt welches von einer Vielzahl an Lieferanten angeboten wird wie z.B.:

- Salzgitter Flachstahl
- Thyssen Krupp
- ArcelorMittal
- Voestalpine
- Böhler+
- SSAB

Wagen in Stahlhybridbauweise werden noch nicht angeboten.

### 7.1.3 Potenzialeinschätzung und Empfehlung

Es wird von einem mittleren Gewichtseinsparpotenzial ausgegangen. Für eine präzise Aussage müssen die Wagen einzeln betrachtet werden und einem noch zu konstruierendem Hybriddesign gegenübergestellt werden.

## 7.2 Ganzzüge mit MPK

In Europa werden Zugkräfte (Kupplung – Zentral an den Wagenenden) und Druckkräfte (Puffer – Außen an den Wagenenden) standardmäßig getrennt in die einzelnen Wagen geleitet. Bei den meisten Triebzügen und außerhalb Europas sowie bei speziellen Güterzügen (z.B. Erzzüge) werden die Druckkräfte über eine Mittelpufferkupplung ebenfalls mittig eingeleitet. Da sowohl Autozüge als auch Containerzüge i.d.R. ebenfalls als Ganzzüge verkehren ist die Idee hier ebenfalls die Mittelpufferkupplung einzuführen und lediglich die Endwagen als Übergangswagen einseitig mit Schraubekupplung und Außenpuffern auszurüsten.

### 7.2.1 Vor- und Nachteile

Durch die Reduzierung der Krafteinleitungspunkte von sechs auf zwei Punkte pro Wagen kann die Wagenstruktur deutlich leichter ausgeführt werden. Zusätzlich bietet die Einleitung von Druckkräften in der Wagenmitte insbesondere bei der Bogenfahrt Vorteile bezgl. des Laufverhaltens wodurch u.a. die zulässigen Druckkräfte erhöht werden können und somit ein höherer Rekuperationsgrad erzielt werden kann. Die höheren zulässigen Druckkräfte bringen den weiteren Vorteil mit sich, dass die Einführung längerer Züge vereinfacht wird. Weitere Vorteile sind geringerer Verschleiß an Rad und Schiene aufgrund geringerer Querkkräfte sowie eine höhere Sicherheit gegen Entgleisen. Nachteilig ist zu beachten, dass die Wagen weniger flexible eingesetzt werden können und dass in Abhängigkeit der Stückzahl und Anforderungen an die Kupplung höhere Anschaffungskosten und Mehrgewichte entstehen können.

### 7.2.2 Lieferanten und Marktreife

Auf dem Markt werden verschiedene Mittelpufferkupplungen von verschiedenen Herstellern angeboten. Dabei wird zwischen drei Hauptprinzipien Scharfenberg (vorwiegend Personenverkehr), Janney (vorwiegend außerhalb Europas (mit Ausnahme UK, dort ist sie weit verbreitet, allerdings heißt sie dort Buckeye, ist aber Janney) und Russland) und Willson (vorwiegend Russland, Kaukasus) unterschieden von denen wiederum verschiedene Ausführungen existieren. Hersteller sind u.a. Voith und Knorr. Nur Scharfenberg ist von starrer Ausführung und so auch für Leitungskupplung geeignet. Janney und Willson sind höhenverschieblich und so in der Anlenkung billiger als Scharfenberg, aber technisch stark

veraltet. Die Wagen können prinzipiell von jedem Güterwagenhersteller produziert werden wie beispielsweise Waggonbau Niesky oder Tatravagonka.

### 7.2.3 Potenzialeinschätzung und Empfehlung

Den gelisteten Vorteilen entsprechend ist das Potenzial, welches durch die Einführung der Mittelpufferkupplung bei Ganzzügen und noch mehr im Wagenladungsverkehr entsteht, vielseitig und groß. Dies bezieht sich auf Leichtbau, Betrieb als auch Verschleiß. Da die Mittelpufferkupplung bereits seit über 170 Jahren, Schaku seit 90 Jahren, genutzt wird, ist die Markreife vollständig gegeben und es besteht somit kein Entwicklungsrisiko. Der einzige Nachteil ist die Mentalitätsumstellung. In der Umstellungsphase ist die bisherige Idee, mit Schraubekupplungen interoperable Mittelpufferkupplungen zu benutzen, zu verwerfen, da dies mehrfach ins Aus geführt hat. Stattdessen ist der in Finnland praktizierte und in der Schweiz in Umsetzung befindliche Weg zu bevorzugen, 2 Parallelsysteme aufzubauen, einmal konventionelle Zug- und Stoßeinrichtungen und einmal Mittelpufferkupplungen. Nur die Lokomotiven sollen interoperabel ausgeführt werden. Die Rangierloks mit Vapitikupplungen, Abbildung 27, und die Streckenloks mit Adaptern. Das bewährt sich seit 30 Jahren in Finnland.



Abbildung 27: Vapitikupplung an finnischer Rangierlok mit Willisonkupplung und Seitenpuffer, bereit für Kupplung mit SA-3-Kupplungen ausgestatteten Wagen, Aufnahme 2010 [TU Berlin]



## 8 Telematik und Sensorik

Im diesem Kapitel sind Nutzungsmöglichkeiten für Telematik und Sensorik Anwendungen für die vorbeugende Instandhaltung aufgelistet und erläutert.

### 8.1 Anwendungsbeispiele

Den Nutzen der verschiedenen „Use Cases“ für die Instandhaltung von Güterwagen werden zunächst kurz der Reihe nach erläutert und im Anschluss in der Tabelle 7 übersichtlich zusammengefasst.

#### 8.1.1 Zustandserfassung des Bremssystems

Bei Erfassung des Zustands der Handbremse wird in der einfachsten Ausführung lediglich bestimmt, ob die Handbremse angelegt oder gelöst ist. In Kombination mit der Geschwindigkeitsinformation des Wagens können daraufhin Warnungen generiert werden, sobald ein Fahrzeug mit angelegter Bremse bewegt wird. Daraus ist ableitbar, dass sich ein gewisser Verschleiß an Bremse und Rädern ergeben haben könnte und ggf. Flachstellen erzeugt wurden. Diese Information kann damit als Anhaltspunkt für das Instandhaltungspersonal dienen.

Präzisere Informationen lassen sich über die Verschleißbestimmung der Bremsen erzielen. Einerseits können Endlagenschalter an den Bremsbelägen bzw. -sohlen Verschleißgrenzen detektieren und so für die Instandhaltung einen Tausch der Beläge initiieren. Eine Überwachung des Verschleißvorrates ist dann möglich, wenn über geeignete Drucksensorik alle Bremsvorgänge gezählt und kollektiviert werden. Daraus kann abgeleitet werden, um welchen Grad der Verschleiß der Bremsbeläge/-sohlen sowie ggf. der Räder vorangeschritten ist.

Die Durchführung einer automatisierten Bremsprobe mit Hilfe von Telematik und Sensorik bietet auf den ersten Blick zunächst vor allem Vorteile hinsichtlich der Optimierung des Betriebsablaufes, da diese Bremsprobe schneller durchgeführt und zudem automatisiert die Wagenreihung aufgenommen werden kann. Zusätzlich jedoch ist der Aspekt zu berücksichtigen, dass für die ordnungsgemäße Durchführung der Bremsprobe alle Bauteile der Bremsanlage einwandfrei funktionieren müssen. Gibt es Probleme bei der automatisierten Bremsprobe, kann dies z.B. auf ein defektes Steuerventil o.ä. hindeuten und direkt durch das installierte System erfasst werden. Damit bietet die automatisierte Bremsprobe auch einen Mehrwert für die Instandhaltung.

### 8.1.2 Erfassung des Radzustandes

Eine Entgleisungsdetektion besitzt ebenfalls deutliche Vorteile für den Eisenbahnbetrieb, insbesondere der Betriebssicherheit. Durch eine frühzeitige Erkennung einer Entgleisung wird die Beschädigung von Infrastruktur und Fahrzeugen (z.B. Räder, Radsatzlager etc.) selbst über einen längeren Zeitraum vermieden und der entstehende Schaden damit minimiert. Durch eine Flachstellenerkennung am Güterwagen ist es möglich, diesen Schaden an der Radlauffläche zeitnah zu detektieren und eine Überarbeitung der Räder in der Instandhaltung anzuordnen. Darüber hinaus wird das Radsatzlager einer periodischen Belastung durch Schläge bei Abrollen des geschädigten Radsatzes ausgesetzt, die durch eine frühzeitige Flachstellenerkennung minimiert und so die Entstehung von Heißläufern durch Lagerschäden schon frühzeitig vermieden werden kann. Neben der im Forschungsprojekt ESZÜG entwickelten energieautarken Flachstellendetektion am Güterwagen existiert am Markt gegenwärtig nur für Gleisbaumaschinen eine von FELA Management angebotene Lösung zur Flachstellenerkennung. Im Gegensatz dazu sind für die Hohllaufdetektion, die über eine geeignete Auswertung von Schwingungsanalysen am Radsatzlager realisierbar wäre und für die Instandhaltung den Mehrwert der Erkennung von Hohllauf als Radverschleißform aufweist, keine Produkte als Sensorlösungen bekannt.

### 8.1.3 Zustandserfassung der Radsatzlager

Mit Hilfe der Überwachung der Radsatzlager wird die Instandhaltung deutlich optimiert. So könnte mit Hilfe einer Schwingungsdiagnose auf Basis von Beschleunigungsdaten festgestellt werden, ob Schäden am Radsatzlager selbst oder dem Radsatz vorhanden sind. Ferner kann mit Hilfe einer Trendanalyse langfristig die erreichbare Lebensdauer des Radsatzlagers abgeschätzt werden. Auf diese Weise kann die planmäßige Aufarbeitung der Lager gemäß Instandhaltungsstufen auf den tatsächlichen Zustand angepasst werden. Als kurzfristig hilfreiche Information für die Instandhaltung können die Temperaturdaten einer fahrzeugseitigen Heißläuferdetektion dienen und den unmittelbaren Lagertausch initiieren.

### 8.1.4 Sensorik für die Detektion des Wagenkasten- und Ladungszustandes

Eine Stoßerkennung kann sowohl für den Zustand der Ladung als auch für den Güterwagenzustand interessant sein. Erfährt der Güterwagen einen unzulässig hohen Stoß, kann dies Schäden an der Zug- und Stoßeinrichtung sowie dem Wagenaufbau zur Folge haben. Wird also ein entsprechender Schwellenwert überschritten, kann diese Information der Instandhaltung übermittelt werden und ebenfalls von Nutzen sein. Die Erfassung der Beladung des Güterwagens kann einerseits zur Vermeidung von Überladungen dienen, aber andererseits auch in Kombination mit der genauen Laufleistung des Wagens die Information liefern, unter welcher Belastung ein Güterwagen wie viele Kilometer gelaufen ist. Durch

gezielte Langzeitauswertung der Daten kann dies Rückschlüsse auf den Verschleiß oder etwaige Schäden von Bauteilen ermöglichen und so die Instandhaltung zusätzlich optimieren.

Die Bestimmung der exakten Laufleistung eines Güterwagens kann entweder über die Auswertung der (möglichst genauen) GPS-Signale mit Hilfe der Ortungsfunktion verschiedener Telematikeinheiten erfolgen oder mit Hilfe einer Messung und Zählung der Umdrehungen der Radsatzwelle realisiert werden. Wie oben schon angedeutet wurde, bietet insbesondere die Kombination der Beladungsinformation mit der Laufleistungsangabe ein erhebliches Potenzial zur Ableitung von Empfehlungen für die Instandhaltung. Bei Analyse der Ortungsdaten selbst kann darüber hinaus bestimmt werden, welche Relationen mit entsprechendem Streckenprofil befahren wurden. Damit handelt es sich um weitere hilfreiche Informationen für die Instandhaltung, da sich unter Berücksichtigung des ebenfalls aufgezeichneten Geschwindigkeitsprofils teilweise Rückschlüsse auf den Verschleiß von Komponenten ziehen lassen (z.B. bei Befahrung von kurvenreichen Strecken oder Strecken mit starken Gefällen/Anstiegen).

## 8.2 Übersicht über Anwendungsfälle und Hersteller

In der folgenden Tabelle sind die im vorherigen Abschnitt erläuterten Anwendungsbeispiele nochmal übersichtlich zusammengefasst. Zusätzlich sind Angaben über Hersteller und den Entwicklungsstand angegeben. Zudem ist in dieser Tabelle ebenfalls eine Preisabschätzung integriert.

Tabelle 7: Use Cases für eine zustandsorientierte Instandhaltung inkl. Herstellern für Sensorik, Stand der Technik sowie geschätzten Kosten


Kategorie	Use Case	Hersteller (Produktbeispiel)	Stand der Technik	Investitionskosten (Schätzung)
Bremsen	Zustand Handbremse	<ul style="list-style-type: none"> <li>AmstedRail (IONX)</li> <li>system7 (RaVeM)</li> <li>PJM (WaggonTracker ADV)</li> <li>Lenord + Bauer (Fokus auf Sensoren)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AmstedRail: An der Handbremse montierte Sensoren messen Kraftereinwirkung der Bremse auf das Rad (keine Verschleißmessung)</li> <li>system7: Prüfung der Feststellbremse (keine Verschleißmessung)</li> <li>PJM: Erfassung Zustand der Handbremse über periphere Sensorik bei Verwendung des WaggonTracker ADV möglich</li> </ul>	Periphere Sensoren im Bereich von ca. 200 – 500€ PJM: 2.200 – 5.000€/Wagen je nach Ausstattung + Funktionsumfang
	Verschleiß	Keine Hersteller bekannt	<ul style="list-style-type: none"> <li>Überwachung Verschleiß ableitbar über Zählen und Kollektivierung der Bremsvorgänge (Drucksensorik)</li> <li>Über Endlagenschalter Erkennung von Verschleißgrenzen möglich</li> </ul>	
	Bremsprobe	<ul style="list-style-type: none"> <li>AIS Automation (VarOBU)</li> <li>Prose AG (BrakePass)</li> <li>Bosch</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AIS: Automatische Bremsprobe und Aufnahme Wagenreihung</li> <li>Prose AG: Assistent, der durch die Bremsprobe führt</li> </ul>	unbekannt
Rad	Entgleisung	fahrzeugseitig keine Produkte als Sensorlösungen bekannt (das Wascosa safe tank car ist mit zwei mechanischen Entgleisungsdetektoren ausgerüstet)		
	Flachstellen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fraunhofer LBF/ts3 (ESZüG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ESZüG: Energieautarker Flachstellendetektor und Lagertemperaturmessung, Datenübertragung über RF (Erprobung und Validierung in Forschungsprojekt)</li> </ul>	
	Hohllaufdetektion	Bisher keine Produkte als Sensorlösungen bekannt; Lösung vorstellbar über geeignete Auswertung Schwingungsdiagnose Radsatzlager		
Radsatzlager	Schwingungsdiagnose	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lenord+Bauer (Fokus auf Sensoren)</li> <li>SKF (Axletronic)</li> <li>FAG/Schaeffler</li> <li>Perpetuum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lenord+Bauer: Beschleunigungssensoren am Drehgestell</li> <li>SKF: Integration in die Radsatzlagereinheit oder das Radsatzlagergehäuse, jedes rotierende Bauteil erzeugt ein typisches Frequenzband / Die an Messstellen ermittelten Daten werden in einer Zentraleinheit ausgewertet / Einsatz bisher nur in Metrozügen (Barcelona)</li> </ul>	1000 – 3000 €; FAG: 20.000 € pro Drehgestell für komplette Drehgestellüberwachung Perpetuum: 500 € pro Lager [VTG]
	Heißläufer	<ul style="list-style-type: none"> <li>PJM (Waggontracker ADV)</li> <li>AmstedRail (IONX)</li> <li>Lenord+Bauer</li> <li>Franz Kaminski Waggonbau (LLVZ3)</li> <li>Fraunhofer LBF/ts3 (ESZüG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PJM: Integration von Sensoren zur Prüfung der Achslagertemperatur in das Gesamtsystem möglich</li> <li>AmstedRail: Messung der Radsatzlagertemperatur über am Gehäuse angebrachte Sensoren</li> <li>Lenord+Bauer: Messung der Temperatur durch Sensoren direkt am Lager</li> </ul>	Periphere Sensoren im Bereich von ca. 200 – 500€ PJM: 2.200 – 5.000€/Wagen je nach Ausstattung und Funktionsumfang

Kategorie	Use Case	Hersteller (Produktbeispiel)	Stand der Technik	Investitionskosten (Schätzung)
Ladung	Stoßerken- nung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bosch (AMRA)</li> <li>Eureka (Navmaster)</li> <li>FELA Management (CarLoc)</li> <li>Yellowfish (Fleetmoitor)</li> <li>AmstedRail (IONX)</li> <li>PJM (Waggontracker ADV)</li> <li>Nexiot [VTG]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bosch: Stoßererkennung in AMRA-System integriert</li> <li>Eureka: Meldung bei Sensorereignissen (Tür-auf, Rangierstoß)</li> <li>FELA: Temperaturüberwachung der Ware, Stoßdetektion, Beladungserfassung über eine Box mit integrierten Antennen, Installation an fast jeder Stelle des Wagens möglich (Übermittlung der Daten nicht kontinuierlich, sondern an definierten Zeitpunkten, z. B. zweimal täglich)</li> <li>Yellowfish: Temperatursensor kann an den Sensorkasten angeschlossen werden / Auswertung der Daten von einem Serviceprovider</li> </ul>	300 – 600 EUR PJM: 2.200 – 5.000 EUR /Wagen je nach Ausstattung und Funktionsumfang
	Beladung/ Gewichts- erfassung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Franz Kaminski Waggonbau (Zuladekontrolle)</li> <li>PJM (WaggonTracker ADV)</li> <li>AmstedRail (IONX)</li> <li>Savvy Telematic Systems AG [VTG]</li> <li>Eureka [VTG]</li> <li>Cognid [VTG]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kaminski: Verriegelung der Zuladung durch Kalibrierung der Drehgestelle mit DMS; Überladungserkennung</li> <li>AmstedRail: Wiegen des Wagens mittels Sensoren zur Prüfung der Position des Ladegutes</li> </ul>	Kaminski: 4.000 EUR /Wagen PJM: 2.200 – 5.000 EUR /Wagen je nach Ausstattung und Funktionsumfang
Wagen	Waggon- identifikation / Ortung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eureka (aJour Telematics Rail)</li> <li>FELA Management (CarLoc)</li> <li>Yellowfish (Fleetmonitor)</li> <li>Cognid (Trackcube 5)</li> <li>PJM (Waggontracker)</li> <li>AmstedRail (IONX)</li> <li>system 7 (RaVeM)</li> <li>Bosch (AMRA)</li> <li>Franz Kaminski Waggonbau (LLVZ3)</li> <li>IBES AG/ ECD (SERCAM Rail)</li> <li>Savvy Telematic Systems AG (MultiTrac)</li> <li>Nexiot [VTG]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eureka: Regelmäßige Übermittlung der aktuellen GPS-Position und Sensordaten per GSM / Meldung beim Verlassen oder Erreichen von Gebieten (Werke, Bahnhöfe, Grenzen)</li> <li>FELA: Umlafoptimierung über Tracking möglich</li> <li>Yellowfish: Fest verbauter Sensor am Wagenkasten – Meldungen von Ort und Status in zyklischen Zeiten</li> <li>Cognid: GPS-Ortung von mobilen Objekten, Einsatzüberwachung und Diebstahlschutz / Energieautark (Laufzeit 5 Jahre bei täglich 3 Positionsmeldungen), Benutzeroberfläche Webinterface Locate24</li> <li>PJM: GPS-Ortung und Übermittlung via GSM-Modem</li> <li>system7: Austausch des Achslagerdeckels mit integrierten Sensoren und GPS-Empfänger sowie GSM-Modem</li> </ul>	300 – 600 EUR Cognid: 428 EUR für den TrackCube + 6,95 EUR pro Monat (Deutschland) + (2,99 EUR Europaflatrate) Kaminski: 1.200 – 1.400 EUR inkl. Datenflatrate (EU+CH) für 6 Jahre PJM: WaggonTracker STD/STD EX: 1.000 – 1.200 EUR
	Wagen- reihung	<ul style="list-style-type: none"> <li>AIS Automation (VarOBU)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufnahme der Wagenreihung im Zusammenhang mit automatischer Bremsprobe</li> </ul>	Unbekannt
	Laufleis- tungserfas- sung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eureka (RodoTag)</li> <li>FELA Management (CarLoc)</li> <li>PJM (WaggonTracker STD/ STD EX)</li> <li>system 7 (RaVeM)</li> <li>SKF (Axletronic)</li> <li>Bosch (AMRA)</li> <li>Franz Kaminski Waggonbau (LLVZ3)</li> <li>Lenord+Bauer (GEL 2510)</li> <li>IBES AG/ ECD (SERCAM Rail)</li> <li>Nexiot [VTG]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eureka: Messung der Umdrehungen der Welle über einen Sensor direkt an der Welle</li> <li>FELA: Laufleistungserfassung via GPS</li> <li>Lenord+Bauer: Energieautarker Kilometerzähler am Rad kann manuell (z. B. vom Wagenmeister) mit mobilem Lesegerät ausgelesen werden (RFID-Technologie)</li> <li>PJM: Auswertung der Drehzahl des Radsatzwellengenerators mit integriertem Akku (Laden ab 20 km/h), Integration eines GPS-Empfängers sowie von Antennen in das Gehäuse des Radsatzlagers</li> <li>SKF: Mechanische Messung über Drehzahl und Drehrichtung der Achse</li> </ul>	300 – 600 € PJM: WaggonTracker STD/STD EX: 1.000 – 1.200 €; WaggonTracker ADV: 2.200 – 5.000 € /Wagen je nach Ausstattung + Funktionsumfang Kaminski: 1.200 – 1.400 € inkl. Datenflatrate (EU+CH) für 6 Jahre

### 8.3 Wirtschaftlichkeitsannahmen









Telematik- und Sensorik-Systeme bieten gute Möglichkeiten für die Prozessoptimierung und die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs. Die einzelnen Systeme sind sehr heterogen. Die wichtigsten Vor- und Nachteile von Telematik- und Sensorik-Technologien sind nachfolgend dargestellt.






**Tabelle 8: Vorteile und Risiken von Telematik- und Sensorik-Technologien**

Vorteile	Risiken	Wirtschaftlichkeitsbewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozesse optimieren</li> <li>• Instandhaltungskosten reduzieren</li> <li>• Ausfälle verhindern</li> <li>• Unfälle vermeiden</li> <li>• Schäden allokieren</li> <li>• Möglichkeit zur Kostenreduzierung bei Produktbündelung (Use Cases)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teilweise hohe Kosten pro Wagen</li> <li>• Schnittstellen, Kommunikation und Nutzen der verfassten Daten müssen im Detail vorab geplant werden</li> <li>• Erfordert Umschulungen bzw. Prozessumstrukturierungen</li> </ul>	

Allgemein sind diese Systeme gut einsetzbar und bieten Sparpotenzial an. Die Wirtschaftlichkeit hängt von den einzelnen Verwendungen ab. In der nachfolgenden Tabelle sind diese Anwendungsmöglichkeiten auf die einzelnen Komponenten von Güterwagen dargestellt, sowie eine erste Bewertung der Wirtschaftlichkeitsannahmen.

**Tabelle 9: Bewertung von Telematik- und Sensorik-Technologien nach Komponentenkategorien**

Kategorie	Use Case	Bewertung	Vorteile	Risiken
Bremsen	Zustand Handbremse		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reale Informationen von Zustand und Verschleiß der Bremsen sind notwendig zur Vermeidung von Schäden an Rad und Bremsen und für eine bessere Planung der IH</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teilweise hohe Investitionskosten (bis zu 5.000 Euro pro Wagen)</li> </ul>
	Verschleiß			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Noch keine Lösung im Markt</li> <li>• Ähnliche Produkte für den Straßenverkehr</li> </ul>
	Bremsprobe		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisierung der Bremsprobe bietet erhebliches Sparpotenzial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überflüssig, wenn EP-Bremse weiterbetrachtet wird.</li> </ul>
Rad	Entgleisung			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein fahrzeugseitiges Produkt im Markt</li> <li>• Wascosa bietet eine mechanische Lösung (Sensorik nicht notwendig)</li> <li>• Infrastrukturseitige Lösung von Vorteil</li> </ul>
	Flachstellen		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieautarke Lösungen</li> </ul>	
	Hohllaufdetektion			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Noch keine Lösung am Markt vorhanden</li> <li>• Überflüssig durch Schwingungsdiagnose</li> </ul>
Radsatzlager	Schwingungsdiagnose		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mehrere Lösungen am Markt verfügbar</li> <li>• Unterschiedlicher Diagnosegrad</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teure Produkte sind für Güterwagen nicht geeignet (z.B. komplette Drehgestellüberwachung)</li> </ul>
	Heißläufer		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sofortige Informationen über kritische Situationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Komplexere Lösungen sind dementsprechend teuer</li> </ul>

Kategorie	Use Case	Bewertung	Vorteile	Risiken
<b>Ladung</b>	Stoßerkennung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zuordnung von Stoßschäden möglich</li> <li>Mehrere verschiedene Produkte am Markt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Informationen werden teilweise von anderen Use Cases erfasst</li> <li>Produkte am Markt sind sehr unterschiedlich</li> </ul>
	Beladung/ Gewichtserfassung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Wichtig für Überladungserkennung</li> <li>Ermöglicht auch Preis- und Kontrolloptimierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Marktlösungen sind relativ teuer</li> </ul>
<b>Wagen</b>	Wagenidentifikation/Ortung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gefragte Funktion für die Optimierung des Wagenverlaufs</li> <li>Relativ technologisch einfache und günstige Produkte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verursacht neue permanente Kosten (neben Investitionskosten monatliche Gebühren)</li> </ul>
	Wagenreihung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Verbesserte Informationen über den Zug</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produkte werden in Verbindung mit EP-Bremse angeboten</li> </ul>
	Laufleistungserfassung		<ul style="list-style-type: none"> <li>Gefragte Funktion für die Optimierung der Instandhaltung und der Abrechnung (Leasing)</li> <li>Teilweise energieautark über Achsgeneratoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ggf. Ersetzung durch bzw. kombinierbar mit Wagonidentifikation/Ortung.</li> </ul>

## 9 Automatische Pufferschmierung

Eine ausreichende Schmierung von Seitenpuffern muss aus mehreren Gründen immer gewährleistet sein. Dies ist zum Beispiel notwendig, um den Verschleiß der Pufferstirnflächen und damit einhergehende Instandhaltungsmaßnahmen zu reduzieren. Zudem stellen ungeschmierte oder gar unzureichend geschmierte Seitenpuffer ein Betriebsrisiko dar. In engen Bögen können in solch einem Fall sogar Entgleisungen hervorgerufen werden. Deswegen werden im Folgenden zwei Möglichkeiten vorgestellt, die dauerhaft günstige Reibbedingungen im Pufferkontakt gewährleisten können.

### 9.1 Gleitplatten

Die Verwendung von Puffern, mit Kunststoffplatten an der Stirnfläche stellt eine Variante dar, um geringe Reibung im Pufferkontakt zu gewährleisten. Diese Kunststoffplatten, auch Gleitplatten genannt, garantieren aufgrund ihrer Eigenschaften sehr niedrige Reibungskoeffizienten. In den folgenden Abbildungen sind zwei Varianten von Gleitplatten dargestellt. Solche Platten werden zum Beispiel von der „BLS“ aus der Schweiz eingesetzt.



**Abbildung 28: Exemplarische Gleitplatte über die gesamte Stirnfläche von Seitenpuffern einer Lokomotive [TU Berlin]**



**Abbildung 29: Exemplarische Gleitplatten integriert in die Pufferfläche [TU Berlin]**

Je nach System müssen die Puffer zusätzlich geschmiert werden und die Gleitplatten dienen dann als Rückfallebene. Es gibt aber auch Systeme bei welchen die Stirnflächen der Puffer nicht mehr geschmiert werden müssen.



## 9.2 Automatische Schmiervorrichtungen

Eine weitere Möglichkeit der Schmierung ist der Einsatz von automatischen Schmiervorrichtungen. Das Unternehmen „Schwab-Verkehrstechnik“, heute „Faiveley“ hat dafür ein System entwickelt, welches die Stirnflächen der Puffer in regelmäßigen Intervallen automatisch schmiert. Nach einmaliger Schmierung werden die Stirnflächen der Seitenpuffer vollautomatisch mit Schmierfett versorgt. In der Abbildung 30 ist dieses System vereinfacht im eingebauten Zustand dargestellt. Wie in der Grafik zu erkennen ist, ist die Vorrichtung direkt am Seitenpuffer mithilfe von Manschetten oder ähnlichen montiert. Die Schmierung erfolgt punktuell an der Stirnfläche des Seitenpuffers an der die Vorrichtung montiert ist. Gemäß Herstellerangaben müssen pro Güterwagen nur zwei statt vier Seitenpuffer mit der Schmiereinrichtung ausgerüstet werden. Warum nicht jeder Seitenpuffer ausgerüstet werden muss ist nicht bekannt. Fakt ist aber, dass eine Schmieranlage pro Pufferkontakt genügt und somit zwei Seitenpuffer pro Schmiersystem versorgt werden. Es muss folglich darauf geachtet werden, dass regelmäßig Seitenpuffer mit Schmieranlagen und ohne in Kontakt sind. [SCV13]

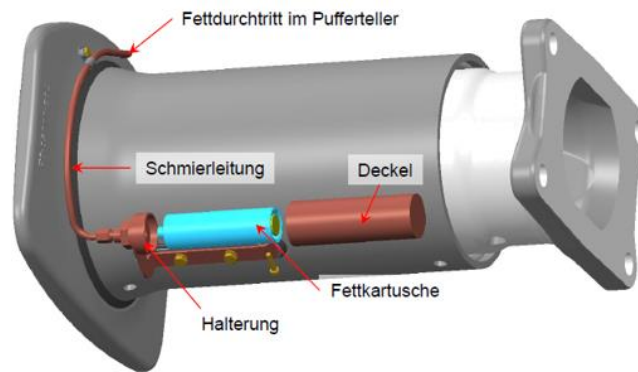


**Abbildung 30: Das automatische Pufferschmiersystem von „Faiveley“ im Einbauzustand in Seitenansicht (links), Frontansicht des geschmierten Seitenpuffers (rechts) [SCV13]**

Das Schmiersystem besteht im Wesentlichen:

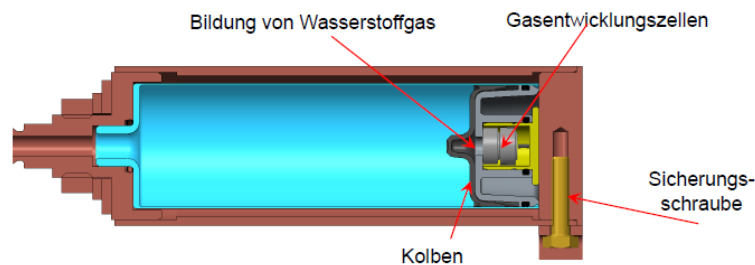
- aus einer Fettkartusche mit integriertem Initiator,
- aus der Schmierleitung durch der das Fett an die Stirnfläche gelangt,
- sowie aus den Halterungen, welche die Montage des Systems ermöglichen [FAI15]

In der folgenden Abbildung ist das Schmiersystem nochmals schematisch dargestellt.



**Abbildung 31: Schematische Darstellung der automatischen Pufferschmereinrichtung von "Faiveley" in schematischer Darstellung [FAI15]**

Die Schmierung erfolgt in regelmäßigen Zeitintervallen. Die Initiierung des Schmiervorganges erfolgt durch die Bildung von Wasserstoffgas in der Fettkartusche, welche das Fett aus der Kartusche verdrängt. In der Abbildung 32 ist die Fettkartusche schematisch dargestellt und das Funktionsprinzip, der Initiierung des Schmiervorganges, bildlich erklärt. In der Abbildung 33 ist eine reale Fettkartusche im ausgebauten Zustand dargestellt. Diese muss alle 12 Monate ausgetauscht werden. Das Austauschdatum ist an der Kartusche ablesbar. Es muss lediglich die Kartusche samt Initiator ausgetauscht werden. [FAI15]



**Abbildung 32: Fettkartusche mit Übersicht zur Initiierung des Schmiervorganges [FAI15]**



**Abbildung 33: Schmierkartusche für eine automatische Pufferschmierung im ausgebauten Zustand [SCV13]**

### 9.3 Vor- und Nachteile

Der Vorteil dieses Systems ist die nachgewiesene Verringerung des Verschleißes in der Stirnfläche der Seitenpuffer. Durch die optimierten Reibeigenschaften nehmen die Querkräfte im Bogen und somit auch das Entgleisungsrisiko ab. Eine Reduktion des Radverschleißes, wie es ebenfalls vom Hersteller angegeben ist, ist wahrscheinlich. Ein weiterer Vorteil dieses System ist, dass es gemäß Herstellerangaben bereits bei namenhaften Herstellern im Einsatz und somit erprobt ist.

Nachteilig ist, dass das System zusätzlichen Instandhaltungsaufwand durch den Wechsel der Fettkartusche verursacht. Ebenso gilt es zu überprüfen, ob es genügt nur die Hälfte der Seitenpuffer automatisch zu schmieren.

Die Position der der Fettkartusche ist zudem ungünstig gewählt. Da das Rangierpersonal im Berner Raum schon wenig Platz zur Verfügung hat und es ist ebenso bekannt, dass das Personal die Seitenpuffer begeht. Exakt dort sind die Schmiereinrichtungen montiert.

### 9.4 Wirtschaftlichkeitsannahmen


Im Segment der Automatischen Pufferschmierung gibt es einerseits Komponenten, die eine automatische Schmierung der Pufferleiter ermöglichen sowie Gleitplatten. Die automatische Pufferschmierung erfolgt über eine montierte Fettkartusche. Diese wird ein Mal pro Jahr gewechselt. SCI Verkehr schätzt die Kosten für diese Technik auf 140 Euro pro Schmiereinrichtung. Bei den Gleitplatten wird Kunststoffeinsatz im Pufferkopf befestigt, der die Einfettung des Puffers überflüssig macht.

- Schmierung per Hand (Referenzfall)
  - Betrachtung erfolgt pro Wagen (4 Puffer)
  - 6x Schmierung pro Jahr à 16 Min. = 96 min
  - Annahme: Stundenlohn von 50 Euro
    - Gesamtkosten in 20 Jahren = 32 h x 50 Euro = 1.600 Euro/Wagen
    - Gesamtkosten in 25 Jahren = 40 h x 50 Euro = 2.000 Euro/Wagen
    - Gesamtkosten in 30 Jahren = 48 h x 50 Euro = 2.400 Euro/Wagen
- Automatische Pufferschmierung (Faiveley)
  - Betrachtung erfolgt pro Wagen (Achtung: nur 2 Puffer müssen automatisch geschmiert werden)
  - Kosten pro Schmiereinrichtung 140 Euro = 280 Euro

- Kosten pro Fettkartusche pro Jahr 30 Euro = 60 Euro
  - Gesamtkosten in 20 Jahren = 1.480 Euro/Wagen
  - Gesamtkosten in 25 Jahren = 1.780 Euro/Wagen
  - Gesamtkosten in 30 Jahren = 2.080 Euro/Wagen
- Gleitplatten:
  - Gleitplatten sind teurer als normale Puffer
  - Aufwandsreduzierung bzgl. der Pufferschmierung...
  - ... aber unterschiedlicher Verschleiß (dank unterschiedlicher Materialien) sorgen dafür, dass die gesamte Komplexität nicht abnimmt


Im Fall der Automatischen Pufferschmierung wird die Pufferhülle nicht berücksichtigt, da dies wesentlich seltener angewandt wird und im Rahmen der Wartung oder ähnlich erfolgt. Ein weiterer wichtiger Aspekt beim Kostenvergleich ist die erwartete Lebensdauer einer Pufferschmiereinrichtung. Hierfür fehlen allerdings bisher Erfahrungswerte. Im obigen Beispiel wird eine Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren angenommen. Die Kostenberechnungen basieren auf einer Präsentation von Faiveley.

**Tabelle 10: Vorteile und Risiken der Automatischen Pufferschmiereinrichtung**

Vorteile	Risiken	Wirtschaftlichkeitsbewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung des Aufwands von Wagenmeistern</li> <li>• Fehlervermeidung und verbesserter betrieblicher Ablauf</li> <li>• Niedrigere Betriebs- und Instandhaltungskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pufferschmierung ist keine zeitaufwendige Aufgabe des Wagenmeisters</li> <li>• Zusätzliche Kosten durch notwendige Kartuschenwechsel und die Instandhaltung der Schmiereinrichtung</li> <li>• Starke Verschmutzung der Puffer durch stetiges Fetten</li> </ul>	

Die automatische Pufferschmierung bietet Einsparungspotenziale, da sie die Aufgaben der Wagenmeister reduziert. Obwohl diese Reduzierung keine signifikante Ersparnis für die einzelnen Wagen erzielt (zwischen 80 und 100 Euro pro Jahr), angenommen Personalkosten zwischen 50 und 60 Euro pro Stunde und Aufwand von 96 Minuten pro Jahr), gewinnt sie durch die hohe Anzahl von Wagen und Jahren an Relevanz. Darüber hinaus sind die anfänglichen Investitionskosten für die Schmiereinrichtung relativ niedrig. Eine automatische Pufferschmierung trägt auch zur Reduktion der Störmeldungen bei und reduziert damit die Kosten für Zugausfall bzw. -verspätung, Personalkosten für die Behebung von Störungen sowie Kosten möglicher Entgleisungen. Andererseits könnten Schmiereinrichtungen zusätzliche Kosten durch notwendige Wechsel von Kartuschen und die Instandhaltung der Schmiereinrichtung verursachen. Die Wirtschaftlichkeit von automatischen Pufferschmierungen soll im Detail weiter geprüft werden.

**Tabelle 11: Vorteile und Risiken der Gleitplatten**

Vorteile	Risiken	Wirtschaftlichkeitsbewertung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung des Aufwands von Wagenmeistern</li> <li>• Niedrigere Betriebs- und Instandhaltungskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterschiedlicher Verschleiß der Gleitplatten sorgt für komplexere IH</li> <li>• Nach Informationen von Betreibern und Leasingunternehmen kommt es häufig zum Verlust von Gleitplatten im Betrieb</li> </ul>	

Gleitplatten werden prinzipiell nur für spezielle Anwendungen genutzt wie beispielsweise sehr enge Gleisbögen, vor allem in der industriellen Infrastruktur. Damit sind Gleitplatten nur unter bestimmten Voraussetzungen sinnvoll und haben aufgrund der komplexeren Instandhaltung und des schnellen Verlustes wesentliche Nachteile. In diesem Fall ist die Reduzierung des Aufwands der Wagenmeister nur marginal, was gegen die serienmäßige Einführung dieser Innovation spricht.

## 10 Strom- und Datenbusleitung

In diesem Abschnitt wird das Thema Strom- und Datenbusleitung für Güterwagen mit dem Ziel, eine konkrete Empfehlung für zukünftige Anwendungen abzugeben, behandelt. Im Anschluss an die Stromversorgung werden die Anforderungen und Eigenschaften von ausgewählten Datenbussystemen vorgestellt.

### 10.1 Stromleitung

Zunächst wird die Motivation, Güterwagen mit einer Stromversorgung auszurüsten benannt. Danach werden verfügbare Steckverbindungen aus dem Nutzfahrzeug- und Bahnsektor aufgeführt. Anschließend werden die Anforderungen an eine Stromleitung hinsichtlich der Wahl der Versorgungsspannung und den Leistungsanforderungen für zukünftige Anwendungen untersucht. Auf der Basis dieser ersten Untersuchung werden mögliche Kombinationen aufgelistet.

#### 10.1.1 Motivation

Die Motivation, eine Stromversorgung auf Güterwagen vorzusehen, liegt darin, eine vollumfängliche Digitalisierung des Güterwagens zu ermöglichen.

Heute verfügbare Telematik- und Sensoriklösungen basieren auf Grund der bisher nicht vorhandenen Energieversorgung entweder auf einer Versorgung per Batterie oder per Radsatzlagergenerator. Da die Batterie-Lösung so ausgelegt sein muss/sollte, dass ein Batterietausch nur während der planmäßigen Instandhaltungsarbeiten (teilweise nur alle sechs Jahre) erforderlich wird, ist hier die verfügbare Energiemenge pro Zeiteinheit stark begrenzt. Damit sind bei den Telematik- und Sensorikanwendungen Limitierungen gegeben. So können etwa energieintensive Positionsbestimmungen per GPS nur wenige Male pro Tag durchgeführt werden. Untersuchungen mit großer Abtastrate, etwa zur Erkennung von Radsatzlagerschäden können gar nicht durchgeführt werden, weil sie zu energieintensiv sind. Bei der Verwendung von Radsatzlagergeneratoren ist von einem höheren Instandhaltungsaufwand des Wagens auszugehen. Außerdem werden bei einem Radsatztausch entweder auch ein Lagertausch oder das Vorhalten von entsprechenden Radsätzen mit Generator in allen Werkstätten erforderlich. Eine kabelbasierte Stromversorgung ermöglicht es, große Energiemengen auch für zukünftige Entwicklungen zur Verfügung zu stellen. Damit sind vollkommen neue Anwendungen der Telematik und Sensorik auf dem Güterwagen denkbar. Aber auch über die Telematik und Sensorik hinaus sind Anwendungen möglich. So kann etwa eine elektropneumatische Bremse (ep-Bremse) mit Energie versorgt werden und Aktuatoren für Feststellbremse und Bremsstellungswechsel sind denkbar. Auch würden Beleuchtungen am Güterwagen (z.B. statt Zugschlussscheiben) oder auch Displays für das Rangierpersonal ermöglicht.

Damit kann eine leistungsfähige Stromversorgung auf Güterwagen als sogenannter „Türöffner“ für zahlreiche Anwendungen der Digitalisierung und Automatisierung dienen.

### 10.1.2 Verfügbare Steckverbindungen

Die Steckverbindungen für die Stromleitung (und idealer Weise auch gleichzeitig für die Datenleitung) zur Versorgung der Güterwagen müssen verschiedenen Anforderungen genügen. Diese Anforderungen sind insbesondere:

- Robuste Ausführung für Beanspruchungen im Betrieb, sowohl während der Zugfahrt (Schwingen des Kabels, Zusatzbelastungen durch Eis und Schnee), als auch beim Rangieren der Wagen (grobe Behandlung, lose hängende Stecker etc.) → „Bahntauglichkeit“
- Hohe Schutzklasse gegen Witterungseinflüsse und Verschmutzung
- Hohe Anzahl von Kupplungsvorgängen ohne funktionseinschränkenden Verschleiß
- Schnelle und zuverlässige Ent-/Kuppelbarkeit
- Vorhandensein ausreichend vieler und ausreichend dimensionierter Leiter

Diese Anforderungen finden sich zum einen in genau dieser Weise bei Verbindungen für Reisezugwagen und zum anderen in vermutlich ähnlicher Weise für Anwendungen im LKW-Bereich. Anwendungen aus anderen Industriebereichen, die die obigen Anforderungen so oder in ähnlicher Weise haben, sind den Autoren nicht bekannt. Daher findet sich auf der folgenden Seite eine vergleichende Übersicht der Steckverbindungen aus dem LKW- und Bahnbereich. Die dort angegebenen Spannungen und Leiterquerschnitte sollen in der Leistungsuntersuchung im nächsten Abschnitt verwendet werden.

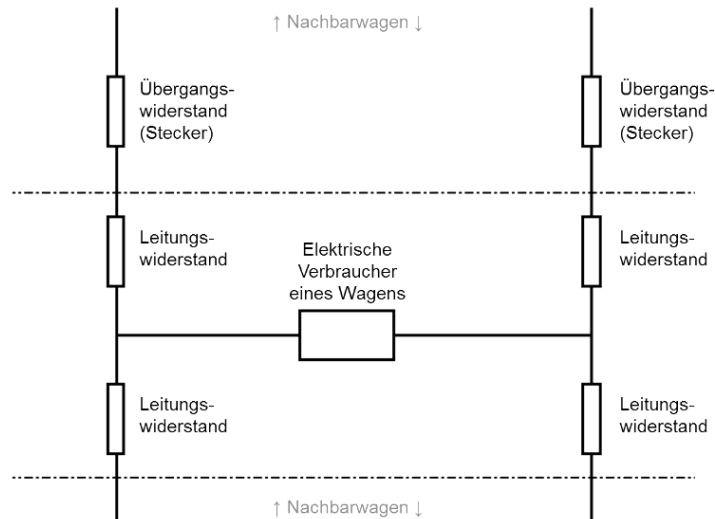
Tabelle 12: Übersicht über Lkw und Bahn Kabel und deren Kompositionen (weißer Hintergrund=LKW, grauer Hintergrund Eisenbahn)

Norm	Kurzbeschreibung	Steck- zyklen	Pole	Spannung	Aderquerschnitte (in der Verb.)
ISO 7638-1	7-polige Steckverbindungen zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern - für Bremssysteme und Bremsausrüstung von Fahrzeugen mit 24 V Nennspannung	10000	7	24 V	4mm <sup>2</sup> (Leitungen 1,4) 1,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 2,3,5,6,7)
ISO 7638-2	7-polige Steckverbindungen zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern - für Bremssysteme und Bremsausrüstung von Fahrzeugen mit 12 V Nennspannung	10000	7	12 V	4mm <sup>2</sup> (Leitungen 1,4) 1,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 2,3,5,6,7)
ISO 11446-1	13-polige Steckverbindungen zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern - für Fahrzeuge mit 12-V-Bordnetz-Nennspannung	5000	13	12 V	2,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 3,9-11,13) 1,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 1,2,4-8) Nicht belegt: Leitung 12
ISO 11446-2	13-polige Steckverbindungen zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern - für Fahrzeuge mit 12-V-Bordnetz-Nennspannung (vorgesehen für Wasserdurchfahrten)	5000	13	12 V	2,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 3,9-11,13) 1,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 1,2,4-8) Nicht belegt: Leitung 12
ISO 12098	15-polige Steckverbindungen zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern - für Fahrzeuge mit 24-V-Bordnetz-Nennspannung	5000	15	24 V	2,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 4,9,13) 1,5mm <sup>2</sup> (Leitungen 1-3,5-8,10-12)
ISO 25981	7-polige Steckverbindungen zwischen Zugfahrzeugen und Anhängern - für elektronisch überwachte Ladesysteme mit 12 V oder 24 V Nennspannung	10000	7	12 V / 24 V	6mm <sup>2</sup> (Leitungen 1-4) 1mm <sup>2</sup> (Leitungen 5-7)
UIC 558	Stecker für Fernsteuer- und Informationsleitung	10000	18	2 V, 24 V, 60 V <sup>4</sup>	0,75-1 mm <sup>2</sup>
UIC 541-5	UIC-Standard-Steckverbindung für die ep-Bremse (NBÜ)	10000	9	250 V	1-4: 7mm <sup>2</sup> ; A,B: 4mm <sup>2</sup> D,X,Y: 3mm <sup>2</sup>
UIC 541-6	UIC-Standard-Steckverbindung für die ep-Bremse (NBA)	10000	9	1000 V	7mm <sup>2</sup> (Leitungen 1-4) 4mm <sup>2</sup> (Leitungen A,B) 3mm <sup>2</sup> (Leitungen D,X,Y)

<sup>4</sup> 2 V (Adern 1,2), 24 V (Adern 3-15), Bemessungsspannung ohne PE (IEC 60038): 60 V

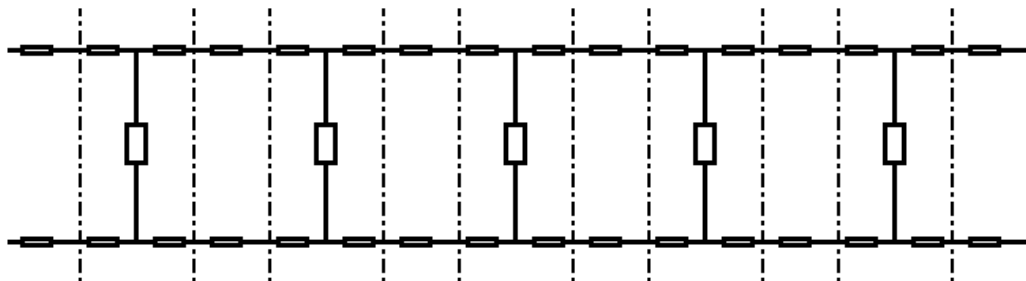


Zur Untersuchung der elektrischen Leistung, die bei gegebener Versorgungsspannung (Nennwert) und gegebenem Leitungsquerschnitt pro Wagen bezogen werden kann, wurde ein Excel-basiertes Rechentool erstellt. In diesem Tool ist die elektrische Topologie des Zuges nachgebildet. Abbildung 34 zeigt den Aufbau eines einzelnen Wagens.



**Abbildung 34: Elektrische Topologie eines Wagens**

Diese Wagentopologie kann zu einem beliebig langen Zug aneinandergereiht werden. Dies ist in Abbildung 35 für fünf Wagen exemplarisch gezeigt.



**Abbildung 35: Aneinanderreihung von Wagentopologien zu einem Zug**

Sämtliche elektrische Parameter dieser Topologie können variiert werden. Im Rahmen der Untersuchung wurden aber lediglich die folgenden Parameter variiert:

**Tabelle 13: Varies Parameter**

Größe	Formelzeichen	Einheit	Variationen
Versorgungsspannung	U	V	5; 12; 24; 48; 230
Leitungsquerschnitt	A	mm <sup>2</sup>	1,5; 2,5; 4; 6; 10; 26*; 50*; 100*
Wagenanzahl	N	-	25; 50
Leistung pro Wagen	P	W	kontinuierlich

\* nur für Niederspannungsvariante mit 48 V

Nicht variiert wurden die folgenden Parameter:

**Tabelle 14: Nicht variierte Parameter**

Größe	Formelzeichen	Einheit	Wert
Wagenlänge	$l$	m	15
Übergangswiderstand	$R_{\dot{U}}$	$\Omega$	0,001
Spezifischer Widerstand	$\rho_L$	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,0175

Die Wagenlänge von 15 m wurde so festgelegt, dass 25 Wagen einer Wagenzuglänge von 375 m entsprechen und ein 50-Wagen-Zug folglich 750 m lang ist. Durch die Leistungsaufnahme der Wagen ergibt sich ein Stromfluss durch die Leiter. Der Stromfluss sorgt wiederum für Spannungsabfälle an jedem einzelnen Widerstand im elektrischen Netzwerk. Dadurch sinkt die Versorgungsspannung für die Verbraucher im Wagen mit steigender Zuglänge immer weiter ab. Die Verbraucher wurden so ausgelegt, dass sie unabhängig von der realen Versorgungsspannung immer die gleiche Leistungsaufnahme haben. Das bedeutet, dass Verbraucher weiter hinten im Zug auf Grund der niedrigeren Spannung einen höheren Strom benötigen, um weiterhin ihre Nennleistung zu erreichen. Der höhere Stromfluss sorgt allerdings wieder für größere Spannungsabfälle an den Widerständen, usw. Für die Ermittlung der maximalen Leistungsaufnahme pro Wagen wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- Die reale Versorgungsspannung pro Verbraucher muss mindestens noch der halben Nennspannung entsprechen, damit der Verbraucher ordnungsgemäß arbeiten kann.
- Die Strombelastung in den Leitern darf die Werte gemäß VDE 0298 T4 08/03 nicht überschreiten.
- Alle Rechnungen wurden ausschließlich für Gleichstrom ausgeführt. Der Einfluss von Kapazitäten und Induktivitäten im Fall von Wechselspannung wurde nicht berücksichtigt.

Bei der Auswahl der untersuchten Leiterquerschnitte wurden Werte gewählt, die in bestehenden Steckverbindungen aus dem LKW- und Bahnbereich verfügbar sind (vgl. voriger Abschnitt). Die Untersuchung zeigt, dass Leistungsaufnahmen pro Wagen über 10 W beim 25-Wagen-Zug lediglich mit einer 48 V-Versorgung oder mehr und Leitungsquerschnitten von 2,5 mm<sup>2</sup> oder mehr möglich sind. Zum Vergleich: Der Hersteller KES gibt auf seiner Website die Leistungen seines Radsatzlagergenerators (für die Versorgung von ep-Bremse/Gleitschutz) mit 68 W und 87 W an. Exemplarische Leistungsaufnahmen von Telematikanwendungen sind in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Übersicht über Leistungsbedarf und elektrische Anforderung ausgewählter Telematikprodukte

Verbraucher/Erzeuger	Max. Leistungsaufnahme/-abgabe	Betriebsspannung	Betriebsstrom
GPS/GSM-Bahnantenne (aJour Telematics von eureka)	2 W	3,3– 5,0 V DC	50 mA
GPS-Receiver (0,1 Hz ... 10 Hz Tracking mit SERCAM von ECD)		3,2 V	8 ... 30 mA
Achslagergenerator (WaggonTracker ADV von PJM)	max. 50 – 90 W *)	10 – 36 V DC	400 mA (@ 12 V DC)
Achslagergenerator (LLZ V3 von Franz Kaminski Waggonbau)	~30 W *)		
Achslagergenerator (KES)	*)	17 - 29 V DC	4,0/3,0 A
Telematikeinheit (CarLoc AT von FELA Management)	3 W (10 W mit Akku)	8 – 58 V DC	
Grundlast Beschleunigungsmessung mit MEMS-Oszillator (Werte aus Forschungsprojekt)	Ca. 15 µW		
Grundlast für zusätzliches Funknetz (Werte aus Forschungsprojekt)	40 µW		

\*) Leistungsabgabe

Im Fall des 50-Wagen-Zuges liegt die maximale Leistungsaufnahme pro Wagen bei einer Versorgung mit 48 V erst bei Leitungsquerschnitten von über 10 mm<sup>2</sup> oberhalb von 10 W. Bei kleineren Spannungen liegt die maximale Leistung pro Wagen im Fall des 50-Wagen-Zuges bei etwa 2 W, im Fall des 25-Wagen-Zuges knapp unter 10 W. Um größere Leistungen pro Wagen erreichen zu können, sind entweder höhere Spannungen oder höhere Leiterquerschnitte erforderlich. Daher wurden sowohl die Versorgung mit 230 V als auch die Erhöhung der Querschnitte bei einer Versorgungsspannung von 48 V detaillierter untersucht.

Bei einer Versorgung mit 230 V können selbst mit dem kleinen Leitungsquerschnitt von 1,5 mm<sup>2</sup> auch bei 50 Wagen noch Leistungen deutlich oberhalb von 10 W erreicht werden. Damit können mehrere aktuelle Sensorik- und Telematikanwendungen versorgt werden. Außerdem stehen Leistungsreserven für zukünftige Ausrüstungen und Anwendungen zur Verfügung. Auch die Versorgung einer ep-Bremssteuerung ist bei einer Versorgung mit 230 V und größeren Leitungsquerschnitten möglich. Ein Energiespeicher auf den Wagen ist für die Stillstandszeiten des Wagens vorzusehen. Allerdings ist zu beachten, dass sowohl für die Montage als auch für die Instandhaltung von elektrischen Komponenten mit einer Spannung von 230 V entsprechendes Fachpersonal in den Werkstätten vorhanden sein muss.

Wie oben bereits erwähnt, sind Spannungen unter 48 V bei den betrachteten Leitungsquerschnitten gängiger Steckverbindungen nicht zur Versorgung eines langen Zuges mit Leistungen von 10 W pro Wagen oder mehr geeignet. Daher wird an dieser Stelle nur die Versorgung mit 48 V weiter betrachtet. Der Vorteil einer Kleinspannungsversorgung, zu der eine Versorgung mit 48 V zählt, liegt darin, dass in den Werkstätten aller Voraussicht

nach kein elektrotechnisch ausgebildetes Fachpersonal für Montage und Installation vorhanden sein muss. Auch sind Schutzvorkehrungen gegen elektrischen Schlag bei dieser Spannung deutlich einfacher resp. gar nicht erforderlich. Nachteil sind die deutlich höheren erforderlichen Leiterquerschnitte und damit auch die höheren Kosten der Kabel.

Der benötigte Kabelquerschnitt hängt maßgeblich von der gewünschten verfügbaren Leistung pro Wagen ab. Da für Stillstandszeiten des Wagens in jedem Fall ein Energiespeicher vorgesehen werden sollte, könnte dieser auch dazu dienen, kurzzeitige Leistungsspitzen zu puffern, sodass nicht zwangsläufig der Kabelquerschnitt auf die Spitzenleistung ausgelegt werden muss. Reine Telematikanwendungen ließen sich somit über vertretbare Leitungsquerschnitte bis etwa 25 mm<sup>2</sup> auch im Fall des 50-Wagen-Zuges versorgen. Für die Versorgung einer ep-Bremse etwa, wo von Leistungen im Bereich von 70 W bis 90 W ausgegangen wird (s.o.), wären jedoch sehr große Leiterquerschnitte erforderlich.

Alle Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellt. In diesen Tabellen sind Querschnitte mit einem Sternchen (\*) gekennzeichnet. Dies ist ein Vorgriff auf die Ausführungen im nächsten Abschnitt, die dort näher erläutert werden.

**Tabelle 16: Maximale Leistungsaufnahme pro Wagen bei einem 25-Wagen-Zug**

Wagenleistung in W		Nennspannung in V				
		5	12	24	48	230
Querschnitt in mm <sup>2</sup>	1.5	0.1	0.4	1.5	6	125
	2.5	0.1	0.6	2.5	10	184
	4	0.2	1.0	4.0	16	258
	6	0.2	1.4	5.9	24	344
	10	0.4	2.4	9.7	39	489
	26	-	-	-	95	-
	50*	-	-	-	154	-
	50	-	-	-	169	-
	100*	-	-	-	180	-
	100	-	-	-	291	-

\* bei Verwendung der ep-Verbindung

**Tabelle 17: Maximale Leistungsaufnahme pro Wagen bei einem 50-Wagen-Zug**

Wagenleistung in W		Nennspannung in V				
		5	12	24	48	230
Querschnitt in mm <sup>2</sup>	1.5	0.0	0.1	0.4	2	34
	2.5	0.0	0.2	0.6	3	57
	4	0.0	0.3	1.0	4	91
	6	0.1	0.3	1.4	6	134
	10	0.1	0.6	2.4	9	203
	26	-	-	-	23	-
	50*	-	-	-	42	-
	50	-	-	-	42	-
	100*	-	-	-	71	-
	100	-	-	-	73	-

\* bei Verwendung der ep-Verbindung

### 10.1.3 Auswahl geeigneter Kabel

Die Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt zeigen, dass die Energieversorgung eines Güterzugs mit Spannungen von weniger als 48 V nicht die gewünschten Leistungen pro Wagen ermöglicht. Damit scheiden alle in

Tabelle 12 angegebenen Steckverbindungen für LKW aus. Dies liegt zum einen am nicht passenden Spannungsniveau von zumeist 24 V, wobei hier im Rahmen einer gesonderten Untersuchung geprüft werden könnte, ob bzw. mit welchem Zusatzaufwand auch eine Eignung für 48 V gegeben ist. Zum anderen sind aber die dort angegebenen Leiterquerschnitte kleiner als der in Tabelle 16 und Tabelle 17 identifizierte Bereich. Da jeweils nur zwei bis fünf Leiter den größten Querschnitt aufweisen und dieser auch höchstens 6 mm<sup>2</sup> beträgt, erscheint auch die Parallelisierung von Leitern nicht ausreichend, um genügend Leistung auf den Wagen zur Verfügung zu stellen. Damit scheinen Steckverbindungen aus dem LKW-Bereich für die Anwendung auf dem Güterzug nicht ohne umfangreichere Modifikationen geeignet zu sein.

Bemessungsspannung und Leiterquerschnitte der Informations- und Steuerleitung (UIC-Kabel) gemäß UIC Merkblatt 558 erfüllen ebenfalls weder die Anforderungen an die Spannung noch an die verfügbaren Leiterquerschnitte in vollem Umfang. Damit entfällt auch diese Lösung. Diese Schnittstelle ist serienmäßig an Lokomotiven vorhanden.

Die einzige verbleibende Steckverbindung aus

Tabelle 12 ist das UIC-ep-Kabel gemäß der UIC Merkblätter 541-5/6. Diese Lösung ist grundsätzlich sowohl bei Nutzung der 230 V-Variante als auch bei Nutzung der Kleinspannungsvariante mit 48 V einsetzbar. Da diese Verbindung Standard im Regionalreiseverkehr ist, kann die Bahntauglichkeit als gegeben angesehen werden. Weiterhin werden Elektrolokomotiven gemäß Herstellerangaben heute standardmäßig mit Steckdosen nach UIC 541-5/6 ausgestattet. Damit wäre für diese Lösung lokomotivseitig bereits die benötigte Schnittstelle vorhanden, wobei im Fall von 48 V eine andere Spannungsversorgung vorgesehen werden müsste.

#### **230 V**

Im Fall der 230 V-Versorgung sind die Leiterquerschnitte ohne Weiteres ausreichend dimensioniert. Auch die Versorgung einer ep-Bremse ist möglich. Weiterhin ist auch die sicherheitsrelevante Ansteuerung dieser Bremse mit dieser Verbindung möglich. Auch eine Datenübertragung über ein separates Aderpaar ist bei dieser Steckverbindung vorgesehen. Damit können alle im Abschnitt 10.2 genannten Bussysteme zur Datenübertragung mit Ausnahme des Ethernets genutzt werden.

## 48 V

Im Fall der 48 V-Versorgung sind die Leiterquerschnitte der Steckverbindung nach UIC 541-5/6 voraussichtlich nur mit Modifikationen geeignet. Während die Steckverbindung vier Pole à 7 mm<sup>2</sup> (1 – 4; Steuerung /Versorgung ep-Ventile), zwei Pole à 4 mm<sup>2</sup> (A,B; Energieversorgung allgemein) und drei Pole à 3 mm<sup>2</sup> (D, X, Y; Datenbus + NBÜ) hat, haben die Verbindungskabel an den Wagenenden und auf dem Fahrzeug andere Querschnitte: Vier Leiter à 10 mm<sup>2</sup> (1 – 4), zwei Leiter à 6 mm<sup>2</sup> (A, B) und drei Leiter à 0,75/2,5 mm<sup>2</sup> (X, Y, D). Soll die ep-Funktionalität genutzt werden, können für die Energieversorgung der Wagen nur die beiden Leiter mit 6 mm<sup>2</sup> Querschnitt genutzt werden. Damit können bei 25 Wagen jeweils 24 W und bei 50 Wagen jeweils 6 W bezogen werden (vgl. Tabelle 16 und Tabelle 17). Wird die ep-Funktionalität nicht genutzt bzw. über die Datenleitung (X, Y) gesteuert, können sowohl die Leiter 1 bis 4 als auch die Leiter A und B für die Energieversorgung genutzt werden. In diesem Fall ergibt sich in Summe ein Querschnitt von 26 mm<sup>2</sup>. Damit können 95 W je Wagen im 25-Wagen-Zug bezogen werden und 23 W bei 50 Wagen. Soll mehr Leistung pro Wagen bezogen werden, müssen bei der 48 V-Versorgung die Querschnitte weiter erhöht werden. In diesem Fall wäre es zum einen denkbar, vollständig neue Steckverbindungen mit entsprechenden Querschnitten zu definieren. Zum anderen könnten aber auch weiterhin für die mechanische Steckverbindung Stecker und Buchsen gemäß UIC Merkblätter 541-5/6 genutzt werden, aber größer dimensionierte Kabel verwendet werden. Damit wäre aber das ganze System auf die Strombelastbarkeit der Steckverbindung begrenzt. Diese Fälle sind Tabelle 16 und Tabelle 17 mit einem Sternchen (\*) gekennzeichnet. Wie auch im Fall der 230 V-Versorgung können mit den Leitern X und Y alle könnten alle in Tabelle 18 des Abschnitts 10.2.2 genannten Bussysteme zur Datenübertragung mit Ausnahme des Ethernets genutzt werden.

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass die Neuentwicklung einer Streckverbindung natürlich in jeder Spannungs-Querschnitts-Kombination möglich ist. Insbesondere ließe sich auch eine Datenübertragung per Ethernet mit einer Neuentwicklung realisieren.

## 10.2 Datenbus-Systeme

Das Themengebiet Datenbus befasst sich mit den Möglichkeiten einer digitalen Datenübertragung sowohl innerhalb der einzelnen Wagen als auch über den gesamten Zugverband. Anwendungsfälle sind die Vereinfachung betrieblicher Prozesse (Wagenliste, Bremsprobe, Feststellung der Zugintegrität → Voraussetzung für ETCS Level 3), die Steuerung von Aktuatorik (Elektropneumatische Bremse, Bremsstellungswechsel, Zugschlusslicht), die Zusammenführung aller Telematikdaten im Zug an einer zentralen Stelle sowie die schnelle und zuverlässige Übermittlung sicherheitsrelevanter Wageninformationen (Heißläufer, Entgleisung). Weiterhin sind auch Funktionalitäten bei der Mehrfachtraktionssteuerung in überlangen Güterzügen zur Kapazitätssteigerung auf Korridoren (Train coupling and sharing mit zwei 740 m-Zügen) denkbar.

## 10.2.1 Forschungsprojekte zu Bussystemen auf Güterwagen

Der Einsatz von digitalen Bussystemen zur Datenübertragung im Güterverkehr wurde in mehreren Forschungsprojekten erprobt. Das Projekt „INTELFRET“ und „FEBIS“ werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

### ***INTELFRET***

EU-Forschungsprojekt „Intelligent Freight Train“ (INTELFRET) von August 1997 bis Juni 1999 unter Federführung des ehemaligen European Rail Research Institute (ERRI) in Zusammenarbeit mit bekannten Firmen und Institutionen, wie z.B. Mannesmann Rexroth Pneumatik GmbH, Knorr-Bremse, SAB WABCO GmbH und dem Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik der Technischen Universität Braunschweig (IfRA).

Ziel war die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs gegenüber dem Straßengütertransport durch die Analyse, Spezifikation und Realisierungskonzeption eines Systems mit folgenden Funktionalitäten zur Steigerung der Leistung, der Transportqualität, der Bereitstellung von Ladungs- und Wageninformationen und der Erhöhung der Verfügbarkeit und Sicherheit des Verkehrsträgers.

### ***FEBIS***

EU-Forschungsprojekt „Freight Electronic Brake and Information System“ (FEBIS) von Frühjahr 1999 bis 2001 der Deutschen Bahn AG zusammen mit der Französischen Staatsbahn SNCF und weiteren Industriepartnern.

Ziel war die Entwicklung eines funkbasierten Kommunikationssystems im Güterzug mit der Bezeichnung FEBIS zur Ermöglichung eines Datenaustausches zwischen allen Fahrzeugen im Zugverband und damit verteilter elektronischer Systeme im Güterzug, z.B. zur Realisierung der elektronisch gesteuerten Bremse. Die beiden zentralen Komponenten des FEBIS-Kommunikationssystems waren die elektrische Energieversorgung und das Datenkommunikationssystem zum Informationsaustausch zwischen den elektronischen Systemen im Zug und ggf. mit der Außenwelt.

## 10.2.2 Zug- und Fahrzeugbussysteme allgemein

Für die Datenkommunikation muss zwischen Fahrzeugbus und Zugbus unterschieden werden. Innerhalb eines Fahrzeugs (Güterwagen) bleibt die Zusammensetzung der Busteilnehmer stets konstant. In der Regel verwaltet ein zentrales Steuergerät die anderen Busteilnehmer wie Sensoren und Aktuatoren. Änderungen am Aufbau sind im laufenden Betrieb nicht zu erwarten. Das Hinzufügen oder Entfernen von Busteilnehmern erfolgt nur bei Umbaumaßnahmen in der Werkstatt. Das Einzelfahrzeug bildet also ein geschlossenes System.

Anders sieht es auf Zugbusebene aus. Durch das variable Kuppeln und Entkuppeln im Betrieb ändert sich die Anzahl, Reihenfolge und Zusammenstellung der Busteilnehmer häufig. Ein Zugbussystem muss daher in der Lage sein, auf solche dynamischen Veränderungen reagieren zu können; es muss „zugtaufefähig“ sein.

In der Praxis hat sich ein hierarchisch aufgebautes System zweier Feldbusse bewährt, die zusammen ein Train Communication Network TCN bilden. Diese Architektur und ihre Detailanforderungen sind in der DIN EN 61375 genormt. Das UIC-Merkblatt 556 fordert als Datenrate für den Fahrzeugbus mindestens 1,5 MBit/s.

### **MVB (Multifunction Vehicle Bus)**

Der MVB (Multifunction Vehicle Bus) ist ein Feldbus für den Einsatz innerhalb eines Fahrzeuges oder einer Gruppe fest gekuppelter Fahrzeuge. Die Datenrate liegt bei 1,5 MBit/s. Als Übertragungsmedium kommt entweder ein zweiadriges, verdrehtes Kabel oder ein optisches Faserkabel zum Einsatz. MVB wurde vorwiegend in Fahrzeuge der Hersteller Siemens und Bombardier verbaut, kommt bei Neuentwicklungen aber nur noch selten zum Einsatz. Aufgrund des auf den Spezialfall Schienenfahrzeuge beschränkten Einsatzgebiets sind MVB-Komponenten nur von wenigen Herstellern und zu hohen Preisen verfügbar.

### **CCN (CANopen Consist Network)**

Bei CCN handelt es sich um ein Fahrzeug-Bussystem (Consist Network) mit den gleichen physischen Anforderungen wie MVB, allerdings basierend auf dem CANOpen-Protokoll. Der Vorteil dieses Systems gegenüber MVB ist die deutlich größere Verfügbarkeit von CANOpen-fähigen Industriekomponenten.

### **Ethernet**

Bei Fahrzeugneuentwicklungen (u.a. ICE 4) wird zunehmend Ethernet-Technik zur digitalen Datenübertragung genutzt. Vorteile sind hier ebenfalls ein großes Angebot an Industrie-Standardkomponenten, nutzbare Synergieeffekte aus der Entwicklungsdynamik der Industrielwelt, die Verfügbarkeit flexibler, standardisierter Protokolle, Geräte und Baugruppen und die einfache Einbindung von Teilnehmern und Priorisierung von Daten. Auf Transportebene kommen Standardtransportprotokolle wie TCP/IP bzw. UDP/IP zum Einsatz, eine Bündelung und Verzweigung kann daher über (industrietaugliche) Ethernet-Switches erfolgen. Nachteilig gegenüber den „klassischen“ Systemen WTB/MVB/CAN sind die teilweise höheren Kosten für Buskomponenten sowie die geringere Verfügbarkeit von kompatibler Sensorik (im Vergleich zu CAN). Weiterhin existiert für ethernetbasierte Datenkommunikation in Schienenfahrzeugen noch kein UIC-Standard, Anforderungen an Fahrzeug- und Zugbus sind jedoch in EN 61375-3-4 (ECN – Ethernet Consist Network) und EN 61375-3-5 (ETB – s Ethernet Train Backbone) genormt. Weiterhin nachteilig sind die höheren Anforderungen an die Verkabelung (4x Twisted Pair statt 1x)



### LON (Local Operating Network)

Ursprünglich aus der Gebäudeautomatisierung stammend, wurde der LON-Bus auch im Bahnbereich erfolgreich erprobt. Er kommt u.a. in dem ep-Bremssystem EP60 des Herstellers Knorr-Bremse für den US-amerikanischen Markt zum Einsatz.

Im Unterschied zum TCN-Konzept existiert keine Trennung zwischen Zug- und Fahrzeugebene, sondern alle Komponenten des Systems können direkt auf einer Ebene miteinander kommunizieren. Als LONWORKS® ist er Teil des Standards IEEE P1473.1 (RailTransit Communication Protocol), als Übertragungsmedium wird hierbei die Energieversorgungsleitung genutzt. Nachteilig ist die geringe Datenrate von lediglich 3,5 kBit/s. Alternativ kann über ein Twisted-Pair-Kabel eine Übertragungsrate von 78 kBit/s erzielt werden.

In der folgenden Tabelle sind die technischen Parameter aller Bussysteme aufgelistet.

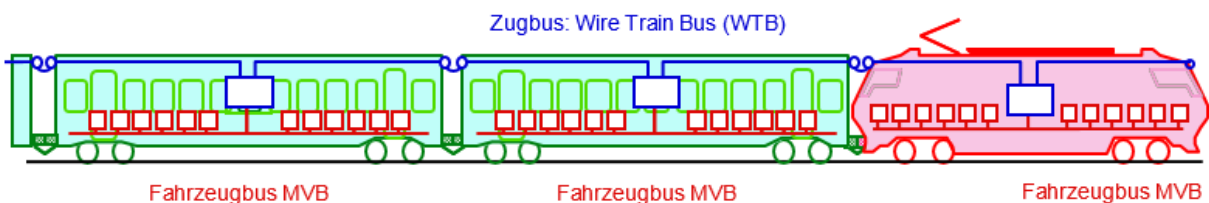
**Tabelle 18: Technische Parameter für ausgewählte Fahrzeug- und Zugbussysteme**

Bustyp	Name	Pole	Spannung	Anzahl Knoten pro Segment	Anforderungen
Zugbus	WTB	2	0...+3,5V	32 (256)	verdrilltes Adernpaar, Impedanz 120 Ohm
Fahrzeugbus	MVB	2	-7...+12V	110	verdrilltes Adernpaar
Fahrzeugbus	CAN(open)	2	-7...+12V	110	verdrilltes Adernpaar, Impedanz 120 Ohm
Zugbus, Fahrzeugbus	LON	2	---	2 <sup>48</sup>	Energieversorgungsleitung oder verdrilltes Adernpaar
Zugbus, Fahrzeugbus	Ethernet	8	-2,5...+2,5V	1024	vier verdrillte Adernpaare

### 10.2.3 Train Communication Network Anwendungsbeispiel

In diesem Abschnitt werden zunächst Anwendungsbeispiele für Fahrzeug- und Zugbussysteme aus dem Personenverkehr genannt.

Im Personenverkehr verbreitet ist ein System aus dem sogenannte „Wire Train Bus“ (WTB) als Zugbus und dem „Multifunction Vehicle Bus“ (MVB) als Fahrzeugbus, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 36: Beispiel eines Zugkommunikationsnetzwerkes mit MVB und WTB [Zuber-Kirrmann © Bombardier Transportation 2002]**

Für den Zugbus WTB wird auf physischer Ebene eine digitale RS-485 Übertragung mit 1 Mbit/s Datenrate verwendet, als Datenleitung kommt also ein geschirmtes und verdrilltes Aderpaar zum Einsatz, das am Wagenübergang über den UIC-Stecker geführt wird.

Zur Herstellung der Zugtaufefähigkeit ist der WTB physisch nicht durchgehend verlegt, sondern wird an jedem Knoten (Fahrzeug) durch das Steuergerät geschleift. So können Wagenreihung und Zugzusammensetzung detektiert werden. Laut Spezifikation verfügt jeder Knoten zusätzlich über eine Überbrückungsmöglichkeit (z.B. Relais), die im Fall eines deaktivierten/ausgefallenen Steuergeräts die Durchgängigkeit sicherstellt.

Klassischerweise ist die physische RS-485-Schnittstelle auf maximal 32 Busteilnehmer/Knoten begrenzt. Es existieren jedoch Transceiverbausteine, die diese Limitierung umgehen können, so dass maximal Netzwerke mit bis zu 256 Teilnehmern aufgebaut werden können. Im WTB-Knoten erfolgt über ein geeignetes Gateway eine Umsetzung zwischen Zug- und Fahrzeugbus. WTB und MVB werden in vielen Personenzügen eingesetzt. Komponenten sind lieferbar, allerdings speziell für MVB nur von wenigen Herstellern und nicht preisgünstig.

#### 10.2.4 Empfehlung für ein Güterwagenbussystem

Aus den im vorherigen Kapitel genannten Gründen wird daher eine Kombination aus dem zugtaufefähigen WTB für den Zugbus und dem kostengünstigen CAN-Bus als Fahrzeugbus empfohlen. Gateways zwischen WTB und CAN sind von verschiedenen Herstellern verfügbar.

Auf Fahrzeugebene bietet CAN den Vorteil, dass insbesondere aus dem Automobil- und Industrieautomatisierungsbereich bereits sehr viele fertige Produkte, Sensoren und Aktuatoren mit CAN-Schnittstelle verfügbar sind. Neuentwicklungen in diesem Bereich sind daher für das Projekt nicht notwendig, es kann auf bestehende, marktreife Komponenten zurückgegriffen werden.

### 10.3 Wirtschaftlichkeitsannahmen

Momentan werden Güterwagen im Regelbetrieb nicht mit Strom- oder Datenbusleitungen ausgestattet. Dies ist eine historische Entwicklung, da für den Güterverkehr aufgrund der Flexibilitätsanforderungen der Wagenreihung sowie Rangiermöglichkeiten bis dato mechanische Lösungen bevorzugt wurden. Für den Erfolg des Digitalisierungsprozesses im Schienengüterverkehr ist dieser Schritt allerdings erforderlich. Von der Strom- und Datenbusleitung sind viele Komponenten und Lösungen abhängig, die die Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs in Deutschland erheblich steigern könnten, beispielweise:

- Ep-Bremse inkl. automatischer Bremsprobe
- Telematik und Sensorik inkl. aller Innovationen (im Kapitel 8 diskutiert)
- Aufladung von Batterien für Telematik-Anwendungen
- Beleuchtung an Wagen

Der Einführung von Strom- und Datenbusleitungen stehen wesentliche Kosten gegenüber. Die Gesamtkosten für eine solche Ausstattung (Verbindungskabel zwischen den Güterwagen sowie Kabel und Buchsen) betragen 1.400 Euro pro Wagen (ep-Kabel/ UIC 541-5) bzw. 500 Euro pro Wagen (UIC 558, weniger geeignet). Diese Lösungsbeispiele sind aktuell im Schienenpersonenverkehr im Einsatz, aber Güterwagen stellen unterschiedliche Anforderungen bzgl. Anwendungen und Zuglänge. Die Entwicklung einer spezifischen Lösung für den Schienengüterverkehr könnte diese Kosten weiter erhöhen.

Autarke Energieversorgungsmöglichkeiten wie Achsgeneratoren oder Batteriezellen stellen alternative Lösungen dar, die kostengünstiger sein könnten. Diese Technologien wurden beim Technologie-Screening nicht betrachtet, denn sie stellen auch technische Herausforderungen, wie beispielweise ihre Zuverlässigkeit, Aufwand und Regelmäßigkeit von Batteriewechseln sowie erhebliche Änderungen in den betrieblichen Abläufen von Schienenverkehrsbetreibern.

Strom- und Datenbusleitungen sind allerdings Voraussetzungen für mehrere Funktionen eines innovativen Güterwagens. Die Wirtschaftlichkeit der Einführung von einer solchen Verkabelung muss mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der anderen Innovationen zusammengerechnet werden.

## Literaturverzeichnis

- [AMS16] Amsted Rail GRIFFIN WHEELS, "Wheel Brochure",  
Url: <https://www.amstedrail.com/sites/default/files/Wheel%20Brochure-Pages-lr.pdf>,  
Letzter Zugriff: 11.11.2016
- [BAH06] Booz, Allen, Hamilton "ECP Brake System for Freight Service", Federal Railroad  
Administration, 2006.
- [BMP09] Blank, Robert W., McLaughlin, Bryan, Punwani, S. K. (John) „ Heavy Haul Coal  
Operations in North America with ECP Braking“, 9th International Heavy Haul  
Conference, 2009.
- [BOG10] Bogacz, Roman: Extended Abstract on the project titled „Evaluation of Interaction of  
Freight Car Cast and Forged/Rolled Wheels with Rails Currently Used in Europe“,  
Warszawa, October 2010.
- [BUN04] Bundesrepublik Deutschland, Deutsches Patent- und Markenamt, Offenlegungsschrift DE  
102 41 755 A1, 2004.
- [CZO10] Czolbe, Christian „Schallminderungsmaßnahmen an Schienenfahrzeugen – Analyse  
unterschiedlicher Strategien zur Geräuschminderung an Schienenfahrzeugen im  
Innenraum und Außenbereich für Neukonstruktion und Modernisierung“, Aachen, Shaker  
Verlag, 2010.
- [FAI15] Faiveley, "Automatische Pufferschmierung", Vortrag, 2015
- [GHH16] GHH-Bonatrans, „Für leise Züge“,  
Url: <http://www.ghh-bonatrans.com/de/produkte-und-service/schallabsorber/>, Letzter  
Zugriff: 28.11.2016
- [HEWI02] Hecht, Markus, Wiemers, Mark, Bessere Lärmisolation und –absorption (bei gleichzeitiger  
Auskleidung mit Absorbieren) als bei Radsatzschürzen, TU-Berlin 27/2002
- [HEWI99] Hecht, Markus, Wiemers, Mark, „Rollgeräuschuntersuchung für verschiedene  
Radbauarten“, EI-Eisenbahningenieur Ausgabe 7/99, Seite 49-53
- [JOH05] Johannsen, K. (2005): "Der Einfluss der Oberflächenimpedanz auf das Abstrahlverhalten  
eines Schürze-Niedrigst-Schallschirm-Systems. Berlin.
- [KES16] KES GmbH, "Das hybride Bremssystem EDS300",  
Url: <https://kesgmbh.com/das-hybride-bremssysteme-eds-300.html>, Letzter  
Zugriff:12.11.2016
- [KKC16] KK Composites GmbH, „Aerodynamische Fahrzeugverkleidung für Tankfahrzeug“, Url:  
[http://www.kkcomposites.com/referenzen/referenzprojekte/aerodynamische-  
fahrzeugverkleidung-fuer-tankfahrzeug/](http://www.kkcomposites.com/referenzen/referenzprojekte/aerodynamische-fahrzeugverkleidung-fuer-tankfahrzeug/), Letzter Zugriff: 21.11.2016
- [KLO12] Klotz, Christian, „Schalltechnische Strukturoptimierung von Eisenbahnradsätzen“,  
Dissertation Dresden 2012

- [LUC16] LucchiniRS, "Freight wagons – Freiset®, safety and LCC in one wheelset",  
Url: [http://www.lucchinirs.it/eng/?page\\_id=2006](http://www.lucchinirs.it/eng/?page_id=2006), Letzter Zugriff: 28.11.2016
- [MAH15] Mahlkow, Adrian, Entwicklung einer Radsatzschürze, Bachelorarbeit, TU-Berlin 2015
- [MIN07] Minde, Frank, „Grundlagen der Eisenbahnbremstechnik“, Vortrag Trainess Grdl. 2007,  
Url: [https://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids\\_lehre/SFZ/Vortrag\\_Trainees\\_Grdl\\_2007.pdf](https://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids_lehre/SFZ/Vortrag_Trainees_Grdl_2007.pdf), Letzter Zugriff: 11.11.2016
- [NYA16] New York Air Brake: EP-60 The world's most proven ECP technology  
Url:  
[http://www.nyab.com/media/banner/documents/downloadsservices/products\\_1/ep60\\_1/ep60.pdf](http://www.nyab.com/media/banner/documents/downloadsservices/products_1/ep60_1/ep60.pdf), Letzter Zugriff: 18.11.2016
- [RAI14] Railway Gazette: „Rio Tinto ready to test automated operation“  
Url:<http://www.railwaygazette.com/news/freight/single-view/view/rio-tinto-ready-to-test-automated-operation.html>  
Letzter Zugriff: 15.11.2016
- [RAI07] Railway Gazette: „ECP braking to Richards Bay“  
Url:<http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/ecp-braking-to-richards-bay.html>  
Letzter Zugriff: 15.11.2016
- [SCH02] Scholdan, Detlef; Mertz, Christine; Tandetzki, Hans: „Güterwagendrehgestell mit verminderter Lärmemission“, Patent DE 102 41 755 A1 BRD, 10.09.2002
- [SHO13] Shoeib, Ramy; Hecht, Markus: "Energieeinsparung durch aerodynamische Optimierung von Schüttgutwagen", ZEVrail Glas. Ann. 137, 2013, Ausgabe 6-7
- [SCV13] Schwab Verkehrstechnik AG, „Begutachtung der Wirkungsweise der automatischen Pufferschmierung von Schwab Verkehrstechnik AG in Dortmund am 30.10.2013“, Letzter Zugriff: 28.11.2016
- [SUV16] Schrey & Veit GmbH, "Products and solutions for Railways and Machines",  
Url: <http://sundv.biz/rail.aspx>
- [VAN08] Vantuono, W.C., "Stop, in the name of progress", railwayage.com 04/2008; Url:  
[http://www.nyab.com/media/nyab\\_1/news/2008/ECP\\_Railway\\_Age\\_04-08.pdf](http://www.nyab.com/media/nyab_1/news/2008/ECP_Railway_Age_04-08.pdf), Letzter Zugriff: 11.11.2016
- [WAB16] WABCO OptiFlow, Url: <http://www.wabco-optiflow.com/home/>, Letzter Zugriff: 17.11.2016
- [WST15] The Wall Street Journal: „New Rules Are Big Brake for Two Rail Suppliers“  
Url: <http://www.wsj.com/articles/new-rules-are-big-brake-for-two-rail-suppliers-1430523524>  
Letzter Zugriff: 15.11.2016
- [ZIN09] Zingelmann, Jochen; Glasner, Gerd: "Absorptionsvorrichtung auf schwingenden Oberflächen, insbesondere bei Schienenfahrzeuge und Schienenstrecken“, Patent EP 2 332 802 A1 Europa, 10.12.2009

[ZIN16] Zingelmann, Jochen: fernmündliches Gespräch

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Potentielle geometrische Parameter zur Reduzierung der Lärmemission der Radscheibe.....	7
Abbildung 2: Wellenstegrad in verschiedenen Ansichten [KLO12].....	8
Abbildung 3: Radscheiben mit Geradem Steg von „Amsted Rail“ in „One-Wear Plus“ und „Multi-Wear“ Ausführung aus Stahlguss [AMS16].....	9
Abbildung 4: Übersicht über Nutzeneffekte des Einsatzes der „ep-Bremse“ durch die Verkürzung der Reaktionszeit.....	16
Abbildung 5: Energiekosteneinsparpotenzial pro Wagen und Jahr bei 35 t mittlerer Wagenmasse (leicht) mit Markierung des zu erwartenden Bereiches .....	19
Abbildung 6: Energiekosteneinsparpotenzial pro Wagen und Jahr bei 55 t mittlerer Wagenmasse (mittelschwer) mit Markierung des zu erwartenden Bereiches .....	19
Abbildung 7: Energiekosteneinsparpotenzial pro Wagen und Jahr bei 75 t mittlerer Wagenmasse (schwer) mit Markierung des zu erwartenden Bereiches .....	20
Abbildung 8: Verteilung der Bremsleistung für einen 740 m langen, 3300 t schweren Güterzug in Bremsstellung G mit rein pneumatischer Bremsung bei einer Betriebsbremsung von 100 km/h bis in den Stillstand.....	21
Abbildung 9: Verteilung der Bremsleistung für einen 740 m langen, 3300 t schweren Güterzug mit elektropneumatischer Bremsung bei einer Betriebsbremsung von 100 km/h bis in den Stillstand .....	22
Abbildung 10: Schallschutzbeschichteter Radsatz [ZIN09] .....	27
Abbildung 10: Drehpfanne [BUN04].....	27
Abbildung 11: Radial-Radschallabsorber des Bochumer Vereins [FEH11].....	30
Abbildung 12: Radial-Radschallabsorber des Bochumer Vereins am Schienenrad mit Nut zur Befestigung [FEH11] .....	30
Abbildung 13: Radial-Radschallabsorber der Schrey & Veit GmbH mit Haltevorrichtung am Schienenrad [SUV16].....	31
Abbildung 14: Axial-Radschallabsorber des Bochumer Vereins [FEH11] .....	31
Abbildung 15: Axial-Radschallabsorber von GHH-Bonatrans am Schienenrad [GHH16] .....	31
Abbildung 16: Radkappenschallabsorber des Bochumer Vereins, vorletzte Entwicklungsstufe [FEH11] 32	

Abbildung 17: Radkappenschallabsorber des Bochumer Vereins am Güterwagen [FEH11].....	32
Abbildung 18: Test einer Lärmschürze mit Befestigung am Wagenkasten in der akustischen effektivsten Kombination mit einer niedrigen Schallschutzwand und leiser, präparierter SBB-Lok BR 460 [TU Berlin] .....	38
Abbildung 19: Test einer Lärmschürze bei der DB befestigt am Wagenkasten mit einer niedrigen Schallschutzwand [TU Berlin].....	38
Abbildung 20: Lärmschürzen am Low Noise Train mit seitlichen Öffnungen zur Einsehbarkeit im Wintertest [MAH15] .....	38
Abbildung 21: Beispiel von Radsatzschürzen für Güterwagen aus dem Projekt Low Noise Train seitens ÖBB und SBB [HEWI02].....	39
Abbildung 22: Exemplarische Darstellung von Leitbleichen an einem Lkw [KKC16] .....	41
Abbildung 23: Aerodynamische Optimierung eines Lkws durch Leitbleche und Seitenverkleidungen [WAB16].....	41
Abbildung 24: Modellversuch zur Verringerung des Fahrwiderstandes durch aerodynamische Gitter, links großer Wirbel ohne Gitter, rechts sehr kleine Wirbel mit festem Gitter [SOH13].....	43
Abbildung 25: Moderner Autotransportwagen von Waggonbau Niesky mit seitlichen Gitter zum Schutz vor Vandalismus aufgenommen auf der Innotrans 2016 .....	43
Abbildung 26: Vapitikupplung an finnischer Rangierlok mit Willisonkupplung und Seitenpuffer, bereit für Kupplung mit SA-3-Kupplungen ausgestatteten Wagen, Aufnahme 2010 [TU Berlin].....	47
Abbildung 27: Exemplarische Gleitplatte über die gesamte Stirnfläche von Seitenpuffern einer Lokomotive [TU Berlin] .....	55
Abbildung 28: Exemplarische Gleitplatten integriert in die Pufferfläche [TU Berlin] .....	55
Abbildung 29: Das automatische Pufferschmiersystem von „Faiveley“ im Einbauzustand in Seitenansicht (links), Frontansicht des geschmierten Seitenpuffers (rechts) [SCV13].....	56
Abbildung 30: Schematische Darstellung der automatischen Pufferschmiereinrichtung von "Faiveley" in schematischer Darstellung [FAI15] .....	57
Abbildung 31: Fettkartusche mit Übersicht zur Initiierung des Schmiervorganges [FAI15].....	57
Abbildung 32: Schmierkartusche für eine automatische Pufferschmierung im ausgebauten Zustand [SCV13] .....	57
Abbildung 33: Elektrische Topologie eines Wagens .....	64



Abbildung 34: Aneinanderreihung von Wagentopologien zu einem Zug .....64

Abbildung 35: Beispiel eines Zugkommunikationsnetzwerkes mit MVB und WTB [Zuber-Kirrmann  
© Bombardier Transportation 2002] .....72

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über untersuchte Fahrzeuge und deren Radform im Rahmen einer Lärmemissionsmessung bei der Berliner S-Bahn vom Fachgebiet Schienenfahrzeuge 1999 bei $v=50$ km/h in 7,5 m Abstand auf Schottergleis [HEWI99] .....	8
Tabelle 2: Auf dem Prüfstand ermittelter durchschnittlicher Schienenverschleiß in Abhängigkeit der Oberflächenhärte der Radscheibe nach [BOG10] .....	10
Tabelle 3: Vorteile und Risiken von Stahlgussrädern mit geradem / leicht parabelförmigem Steg .....	11
Tabelle 4: Übersicht über ausgewählte Bremssysteme und deren benötigten Versorgungs-/Steuerleitungen: .....	13
Tabelle 5: Vorteile und Risiken einer ep-Bremse.....	26
Tabelle 6: Übersicht über Radschallabsorbertechnologien, deren Hersteller und Eignung für Klotz- und Scheibenbremsen .....	34
Tabelle 7: Use Cases für eine zustandsorientierte Instandhaltung inkl. Herstellern für Sensorik, Stand der Technik sowie geschätzten Kosten .....	51
Tabelle 8: Vorteile und Risiken von Telematik- und Sensorik-Technologien.....	53
Tabelle 9: Bewertung von Telematik- und Sensorik-Technologien nach Komponentenkategorien .....	53
Tabelle 10: Vorteile und Risiken der Automatischen Pufferschmiereinrichtung .....	59
Tabelle 11: Vorteile und Risiken der Gleitplatten .....	60
Tabelle 12: Übersicht über Lkw und Bahn Kabel und deren Kompositionen (weißer Hintergrund=LKW, grauer Hintergrund Eisenbahn) .....	63
Tabelle 13: Variierte Parameter .....	64
Tabelle 14: Nicht variierte Parameter.....	65
Tabelle 15: Übersicht über Leistungsbedarf und elektrische Anforderung ausgewählter Telematikprodukte .....	66
Tabelle 16: Maximale Leistungsaufnahme pro Wagen bei einem 25-Wagen-Zug .....	67
Tabelle 17: Maximale Leistungsaufnahme pro Wagen bei einem 50-Wagen-Zug .....	67
Tabelle 18: Technische Parameter für ausgewählte Fahrzeug- und Zugbussysteme.....	72