Technische Universität Berlin

TU Berlin □ FG Schienenfahrzeuge □ Sekr. SG 14 □ Salzufer 17-19, D-10587 Berlin

FAKULTÄT V
VERKEHRS- UND
MASCHINENSYSTEME

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

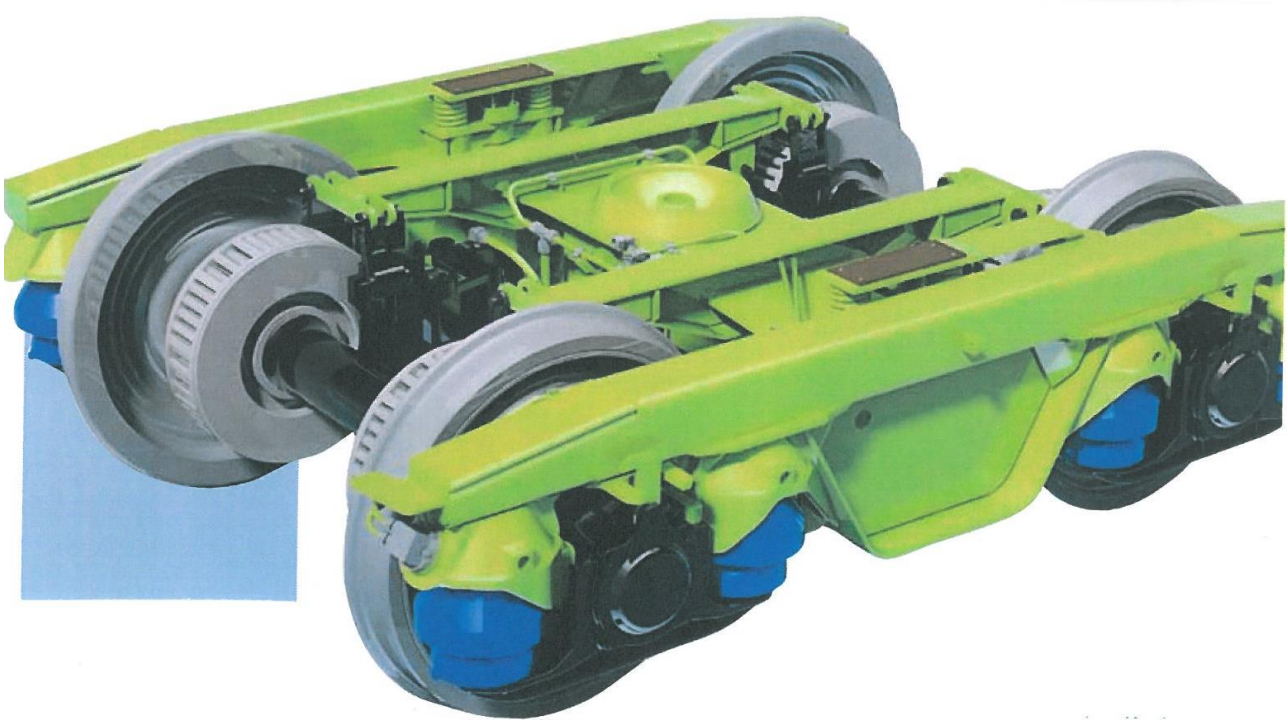
Tel.: +49 (0)30 314 25150
Fax: +49 (0)30 314 22529
e-mail: markus.Hecht@tu-berlin.de
www.schienenfzg.tu-berlin.de/

02..05.2016

Erstellt im Auftrag von
Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V. (NEE)

Bericht Nr. 10/2016

Beitrag des Schienengüterverkehrs zur Erreichung der Klimaschutzziele



Radialeinstellendes Drehgestell DRRS 25 LD, Waggonbau Niesky

Inhalt Seite

Abkürzungen 3
1. Zusammenfassung 4
2. Klimadiskussion 7
3. Bedeutung des Verkehrsträgers, tkm oder Umsatzanteil? 10
4. Energieverbrauch Schiene und Straße 17
5. Streckenkapazität 31
5.1 Taktfahrplan 31
5.2 Umwegverkehre 33
6. Erhöhung der Energieeffizienz des Verkehrsträgers Schiene 36
6.1 Elektrifizierung und Energierückspeisung 36
6.2 Hybridlokomotiven 41
6.3 Aerodynamische Optimierung der Wagen 46
6.4 Radialeinstellende Fahrwerke 48
6.5 Leichtbau 49
7. Innovationspotentiale bei der Infrastruktur 50
7.1 Einfluss der Signaltechnik 49
7.2 Zugsteuerungssysteme 49
7.3 Elektrifzierungseinfluss einschließlich Verwendung grünen Stroms 50
7.4 Rangierbahnhofnutzung 54
7.5 Weichen- und Bahnsteigheizung durch Geothermie 54
8. Zielvorschlag der Studie 55
9. Energieverbrauchsreduktionspotential 56
10. Forschungsempfehlungen 60
11. Rahmenbedingungen 61
12. Schlussbemerkungen 62
Literatur 62

Abkürzungen

a lat. annum, Jahr
AC Wechselstrom
ADL Adaptive Lenkung, netzweites Schweizer Zugleitsystem mit Ziel Streckenleistungsfähigkeits- und Energieverbrauchsoptimierung
AK Automatische Kupplung
BAV Bundesamt für Verkehr, Bern, Schweiz
BMVI Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, Deutschland
BR Baureihe
CH Schweiz
CO_2 Kohlendioxid, Referenzgas für Treibhausgasemission
D Deutschland
DB Deutsche Bahn AG
dB(A) Schalldruck in Dezibel, A bewertet
DC Direct Current, Gleichstrom
DLR Deutsches Forschungszentrum für Luft- und Raumfahrt
DRS Direct Rail Services, Leasing Firma in GB
DWV Durchschnittlicher Wochenverkehr
EASS Energieautarke Sensorsysteme
ECM Entity in Charge of Maintenance
EEG Erneuerbare Energien Gesetz
ETCS European Train Control System, Teil von European Rail Traffic Management Systems
EVU Eisenbahnverkehrsunternehmen
EU Europäische Union
GB Groß Britannien
GWh GigaWattStunden = 10^6 kWh
HVLE Havelländische Eisenbahn, Berlin Spandau
kN KiloNewton, Einheit der Zugkraft, Längskraft im Zug
kV KiloVolt, Einheit der elektr. Spannung
kW KiloWatt, Einheit der Leistung
kWh KiloWattStunden, Einheit der Energie
LEILA LEIchtes und LärmArmes Güterwagendrehgestell
LITRA Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, Bern, Schweiz
Mia. Milliarde = 10^9
MIV Motorisierter Individualverkehr
MW Megawatt = 1000 kW
NEE Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V.
PEF Product Environmental Footprint
Roos Güterwagentyp, Rungenwagen
PZB 90 Punktförmige Zugbeeinflussung 1990, heute in D übliches Zugsicherungssystem
s Sekunde
SA-3 Kupplung, Art der Willisonkupplung, die im russ. Breitspurnetz Standard ist
SBB Schweizerische Bundesbahnen
Snpss Güterwagentyp, Flachwagen langer Bauart
SGV Schienengüterverkehr
tkm Tonnenkilometer
TSI Technische Spezifikation Interoperabilität
TVP2007 Drehgestell Tatravagonka Poprad (Slovakei)
TWh TeraWattStunde = 1 Mia kWh = 10^{12} Wh
Y25 Güterwagendrehgestell von 1946, noch heute Standard in Europa
ZEB Zukünftige Entwicklung Bahninfrastruktur, Langzeitprojekt der Schweiz

1. Zusammenfassung

Der Schienengüterverkehr sollte hinsichtlich seiner geringen Emissionen Vorteile im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern aufweisen können. Allerdings reicht dieser Vorteil nicht aus, um zu prosperieren und zu wachsen. Sektorintern und von den Randbedingungen her muss erreicht werden, dass ein Wachstumspfad im Modal Split beschritten werden kann.

Ohne signifikantes Wachstum des Schienengüterverkehrs wird der Beitrag des Güterverkehrs zur Klimastabilisierung ungenügend sein. Es wird hier ein Weg aufgezeigt, wie durch eine Verdoppelung der Verkehrsleistung und Innovationen im Schienengüterverkehr 9,1 Miot CO_2/a eingespart werden können. Dies wird nur mit Wagenladungsverkehr und Ganzzugsverkehr möglich sein und bedeutet gegenüber dem Basisjahr 2014 eine Verdreifachung des Umsatzes der beteiligten Eisenbahnverkehrsunternehmen.

Viele Entscheider der versendenden Industrie halten den Schienengüterverkehr heute für kompliziert und unattraktiv und damit für nicht wirklich unterstützenswert. Die vorliegende Studie zeigt Änderungsschritte auf, die es sowohl aus dem Sektor als auch von den Randbedingungen her zu beeinflussen gilt, um eine grundlegende Situationsverbesserung zu erzielen.

Substantielle Verbesserungen der Energieeffizienz der Eisenbahn und auch der Steigerung der Marktanteile können nicht mit einer Einzelmaßnahme erreicht werden, sondern erfordern ein Bündel von Maßnahmen. Insbesondere die logistischen Anforderungen von Industrie und Handel sind in den letzten Jahren stark gestiegen. Die Bahnen tun sich schwer, diese Anforderungen zu erfüllen. Jedoch ist das möglich und notwendig, auch um auf den Güterstruktureffekt zu reagieren. Schnellere zuverlässigeTransportabläufe mit kürzeren Umläufen sind auf jeden Fall vorteilhaft. Die nachfolgenden Vorschläge werden auf Basis der europäischen Technischen Spezifikationen Interoperabilität TSI und nicht auf Basis deutscher Traditionen erstellt. Im Konfliktfall wird die Maßnahme zu Gunsten der europäischen Vorgehensweise empfohlen, wie es nach europäischem Recht auch sein sollte. Nicht immer kann der Nutzen im Einzelnen quantifiziert werden. Anhand von Beispielen werden vor allem Verbesserungen im Bereich über 10% genannt.

Wegen der Vielzahl der Maßnahmen werden diese nur kurz gestreift angesprochen und müssen in detaillierteren Projekten weiter erarbeitet werden.

Zum Schluss wird der realistisch mögliche Nutzen abgeschätzt. Es zeigt sich, dass der Schienenverkehr einen erheblichen Beitrag zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele der Bundesregierung leisten könnte, obwohl er bisher nicht im Fokus ist, siehe [http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/maßnahmen-im-ueberblick.html]. Da sich die erhofften Erfolge der Elektromobilität auf der Straße bezüglich der Umweltrelevanz nicht werden erreichen lassen, muss die Schiene als eine im Hinblick auf die Zielerreichung sicher verfügbare und sehr risikoarme Alternative endlich viel stärker als bisher genutzt werden. Allerdings ist das wegen der vielen Schnittstellen, Bild 1, kein Selbstläufer, sondern benötigt steuernde Rahmenbedingungen, z.B. attraktivere Trassenpreise, die auch kurze Züge zulassen, Innovationshilfen und Unterstützung im Netzzugang, z.B. durch Taktfahrplan, Hybridlokomotiven, direkter, umwegfreier Transport, Gleisanschlussförderung, aber auch interne Änderungen z.B. im Rangierprozess.

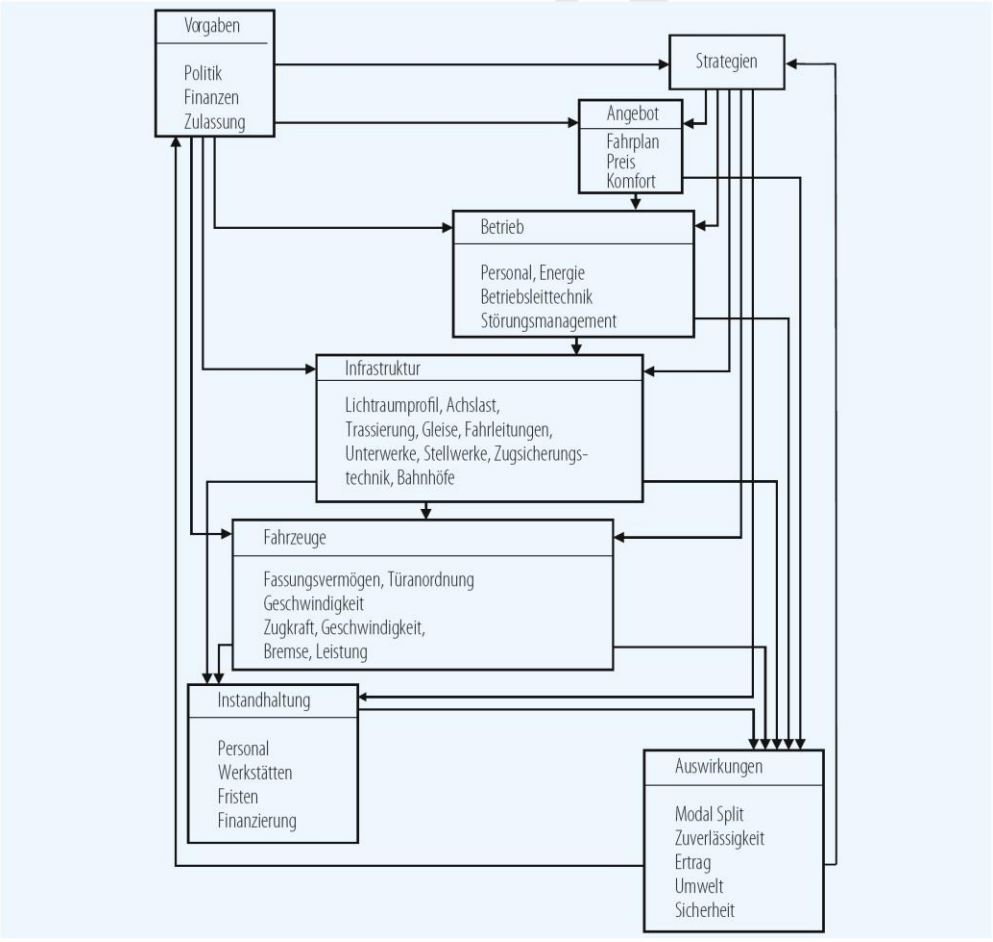


Bild 1
Schienenverkehr – ein Verkehrssystem mit vielen Schnittstellen [1]

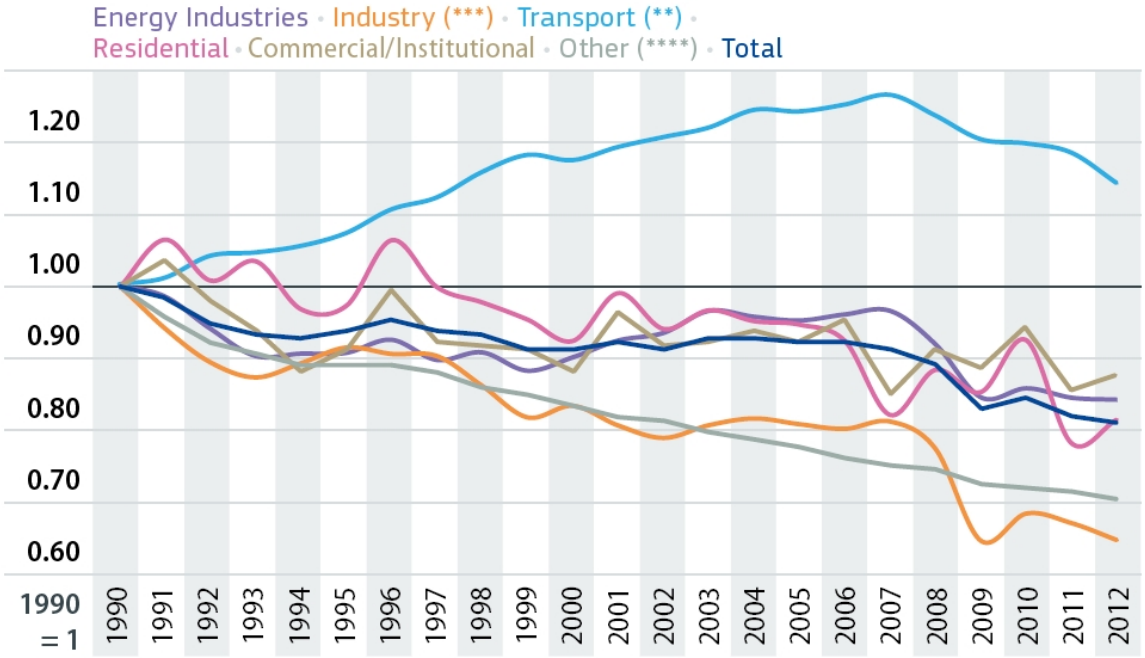
Der Schienengüterverkehr hat somit den Nachteil des großen Abstimmungsbedarfs, aber wie noch gezeigt werden wird, gewaltige Nutzenpotentiale, die auch intern im Sektor noch zu wenig erkannt und forciert werden.
Zusammengefasst ist die gewichtete Reihenfolge der notwendigen Aktionen:

1. Hoher Auslastungsgrad (= direkte Verkehre)
2. Nutzbremsung (= Rückspeisung der Bremsenergie ins Netz (setzt Elektrifizierung voraus, resp. E-loks oder Hybridloks))
3. Fahrwiderstandsverringerung durch radial einstellende Achsen und Luftwiderstandsoptimierung
4. Leichtbau

Die ersten beiden Aktionen sind die ganz wesentlichen, die heute erst sehr rudimentär angewendet werden.
Gegen Schluss wird gezeigt werden, dass mit den aufgezeigten Maßnahmen im Güterverkehr auf Schiene und Straße ca. 3,5 Mia. l Dieselkraftstoff eingespart werden können. Das entspricht einer Minderung um 9,1 Mio. t/a CO_2 oder ca. 4,3 % der heutigen Treibhausgasemissionen des gesamten Verkehrs bzw. rund 20 % des Güterverkehrs in Deutschland.

2. Klimadiskussion

Klima kann nicht kleinräumig betrachtet werden, sondern ist ein weltweites Thema. Deshalb sind die UN Klimakonferenzen die maßgebenden Veranstaltungen. Die **UN-Klimakonferenz in Paris 2015** (englisch *United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties*, kurz ***COP 21***) fand als *21.* UN-Klima-konferenz und gleichzeitig *11. Treffen zum* Kyoto-Protokoll (englisch *11th Meeting of the Parties to the 1997 Kyoto Protocol*, kurz ***CMP 11***) vom 30. November bis 12. Dezember 2015 in Paris (Frankreich) statt. Von der Versammlung wurde ein Klimaabkommen beschlossen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C, im Vergleich zu vorindustriellen Levels vorsieht. Dies wird das Paris-Abkommen genannt. Um das gesteckte 1,5°-Ziel erreichen zu können, müssen die Treib-hausgasemissionen weltweit zwischen 2045 und 2060 auf Null zurückgefahren werden. Dieses Ziel sind somit schärfer als die bisherigen EU-Vorgaben, die eine Reduktion der Treibhausgasemission von -80% für das Jahr 2050 gegenüber dem Zustand von 1990 vorgesehen hatten, mit Zwischenzielen -40% in 2030 und -60% in 2040.

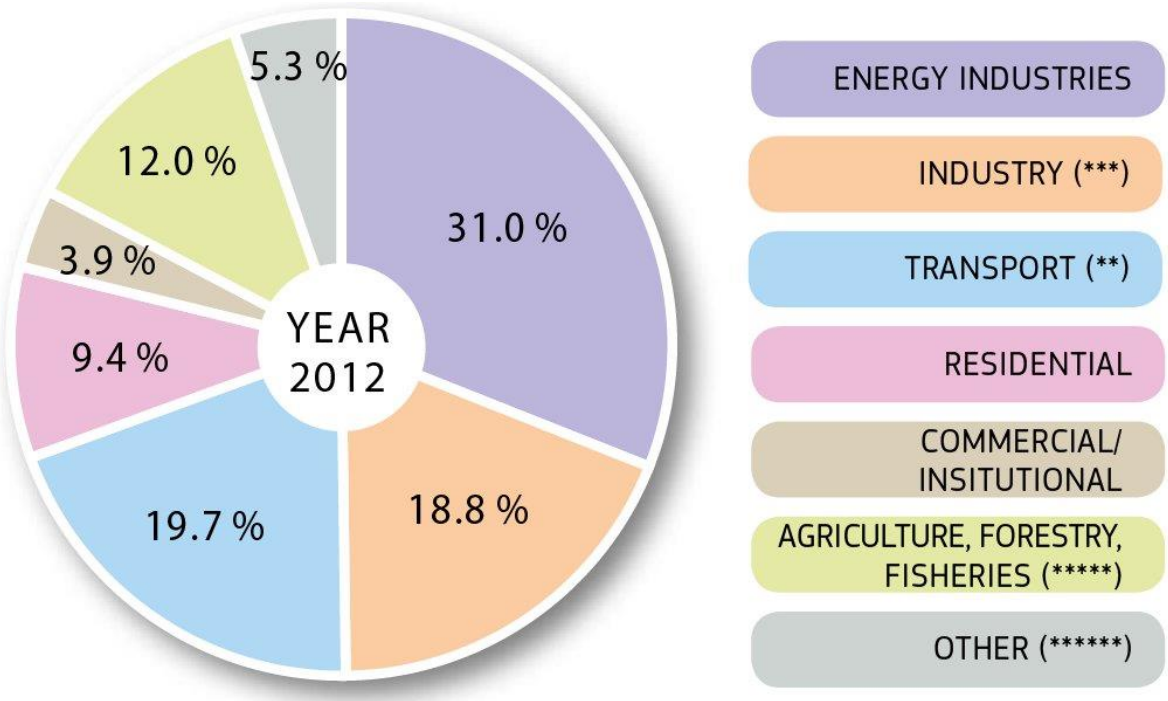


Notes: (*) Excluding LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) emissions and International Bunkers; (**) Excluding International Bunkers (international traffic departing from the EU); (***) Emissions from Manufacturing and Construction and Industrial Processes; (****) Emissions from Fuel Combustion in Agriculture/Forestry/ Fisheries, Other (not specified elsewhere), Fugitive Emissions from Fuels, Solvent and Other Product Use, Agriculture, Waste, Other.

Bild 2

Treibhausgasemission in der EU nach Sektoren [2]

Bis 2007 ist die Treibhausgasemission des Verkehrs über 25% gegenüber 1990 angestiegen und fällt erst langsam ab. Allerdings ist sie noch immer größer als 1990.
Der Anteil des Verkehrs an der Gesamtemission ist mit fast 20% sehr bedeutsam, Bild 3, und wächst immer noch, da die anderen Bereiche, vor allem Energieindustrie, Industrie und Haushalt ihre Emissionen wesentlich schneller reduzieren als der Verkehr, Bild 2.



Notes: (*) Excluding LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) emissions and International Bunkers; (**) Excluding International Bunkers (international traffic departing from the EU); (***) Emissions from Manufacturing and Construction and Industrial Processes; (*****) Emissions from Fuel Combustion and other Emissions from Agriculture; (******) Emissions from Fuel Combustion in Other (not specified elsewhere), Fugitive Emissions from Fuels, Solvent and Other Product Use, Waste, Other.

Bild 3
Anteil der Bereiche an der Treibhausgasemission in Europa [2]

Für Deutschland ist die Situation für den Verkehr als Ganzes eher ungünstig, Bild 4
Die Emissionen des Verkehrs wachsen wieder und weisen keine nennenswerte Minderung seit 1990 auf. Das Ziel der Bundesregierung, bis 2020 -40% zu erreichen, ist für den Verkehr ohne Chance. Der Schienenverkehr (Güter- und Personenverkehr) ist die einzige Alternative für die Erreichung der Klimaziele anstelle der im Scheitern begriffenen Elektromobilitätsinitiative.

Vorbildlich sind die politischen und technischen Maßnahmen in Indien. Mit zwei bereits im Bau befindlichen elektrifizierten Frachtkorridoren (genannt DFC, Dedicated Freight Corridors) wird eine Verfünffachung der Verkehrsleistung der Schiene angestrebt und damit soll eine Reduktion der Treibhausgasemission um bis zu 80% auf den indischen Hauptverkehrsrelationen (auch Mumbai - Delhi) in den nächsten 30 Jahren erreicht werden. [3].

In Deutschland dagegen wird der Schienengüterverkehr nur allgemein und pauschal als wichtiges Element in der Klimadebatte genannt. Konkret werden jedoch keine oder negative Anreize gesetzt, sodass der deutsche Incumbent (mit Namen seit 1.1.2016 DB-Cargo) auf der Aufsichtsratssitzung am 15.12.2015 eine Reduktion seiner Verkehrsleistung um 10% angekündigt hat. Allerdings ist nicht ausgeschlossen, dass die Reduktion noch größer werden dürfte. Verschlechterung der politischen Rahmenbedingungen wie Verringerung der LKW-Maut, Dieselpreisrückgang, Trassenpreiserhöhung und EEG-Umlage nur für die Schiene führt gegenüber 2010 zu einem um 5,5% für die Schiene schlechteren Erzeugerpreisindex im Vergleich zur Straße [Allianz pro Schiene Januar 2016].

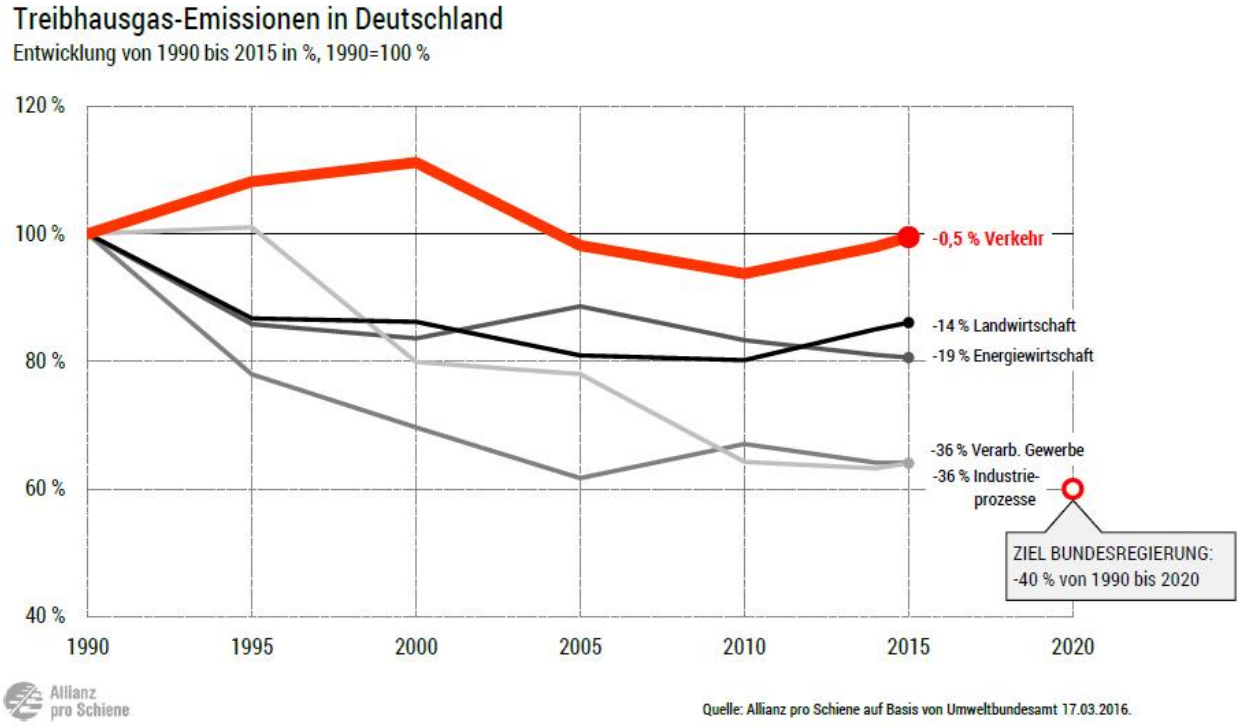


Bild 4
Treibhausgasemissionen in Deutschland

3. Bedeutung des Verkehrsträgers, tkm oder Umsatzanteil?

Im Schienengüterverkehr hat sich seit langem die Verkehrsleistung in der Einheit Tonnenkilometer (tkm) als Vergleichsmaßstab etabliert. Der Marktanteil der Schiene liegt so gesehen bei rund 17 Prozent. Da auf der Schiene in großem Umfang spezifisch schwere, jedoch vergleichsweise geringwertige Waren transportiert werden, ergibt ein Vergleich der Verkehrsträger für den Schienengüterverkehr deutlich den geringsten Warenwert pro Tonne für alle Verkehrsträger, Bild 5. Vor allem gegenüber der Straße fällt auf, dass der Warenwert der Straße 2,4-fach dem der Schiene ist.

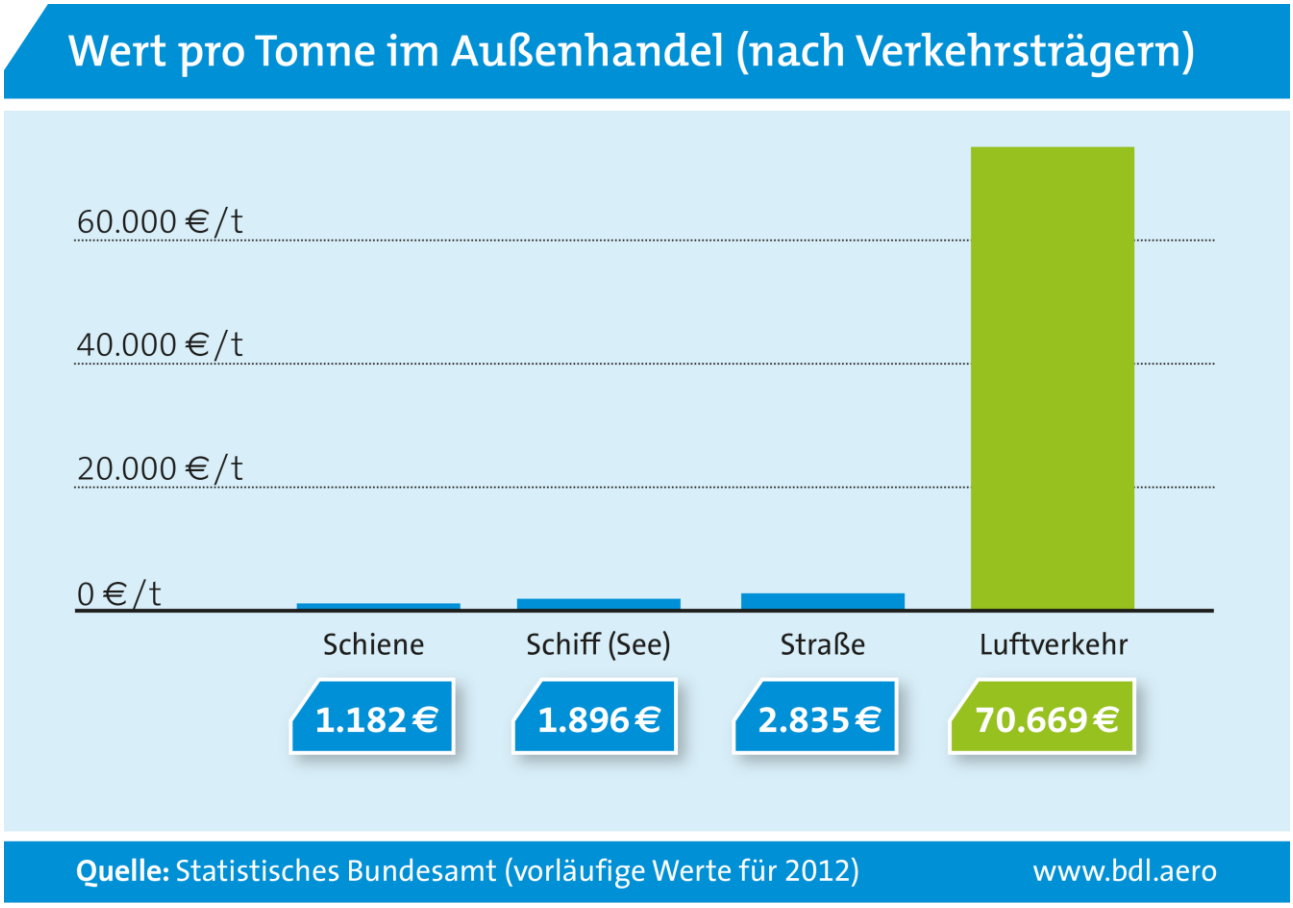


Bild 5
Wert pro Tonne im Außenhandel (BDL= Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft)

Dies impliziert einen eher geringen Umsatz je Tonnenkilometer.

Die Logistik in D setzte im Jahr 230 Mia € um [Claudia Steen, Toll Collect, Vortrag Eisenbahnwesenseminar TU-Berlin 17.11.2014]. DB Schenker Rail Deutschland hatte damals einen Umsatz von 3,1 Mia € (Quelle Wikipedia), die Privatbahnen hatten 2012 einen Anteil von 30% in tkm, der Umsatz wird auf 1,2 Mia € geschätzt, die Bahnen haben somit 4,3/230 = 1,9% Marktanteil am Logistikumsatz in Deutschland. Dies spiegelt die tatsächliche Bedeutung des Bahnanteils wieder, was auch der wesentliche Grund für das geringe allgemeine Interesse sein wird, siehe Aussagen Krüger in Kapitel 4, obwohl der Anteil an der Verkehrsleistung in Tonnenkilometern mit 17% nicht klein ist, Bild 6.

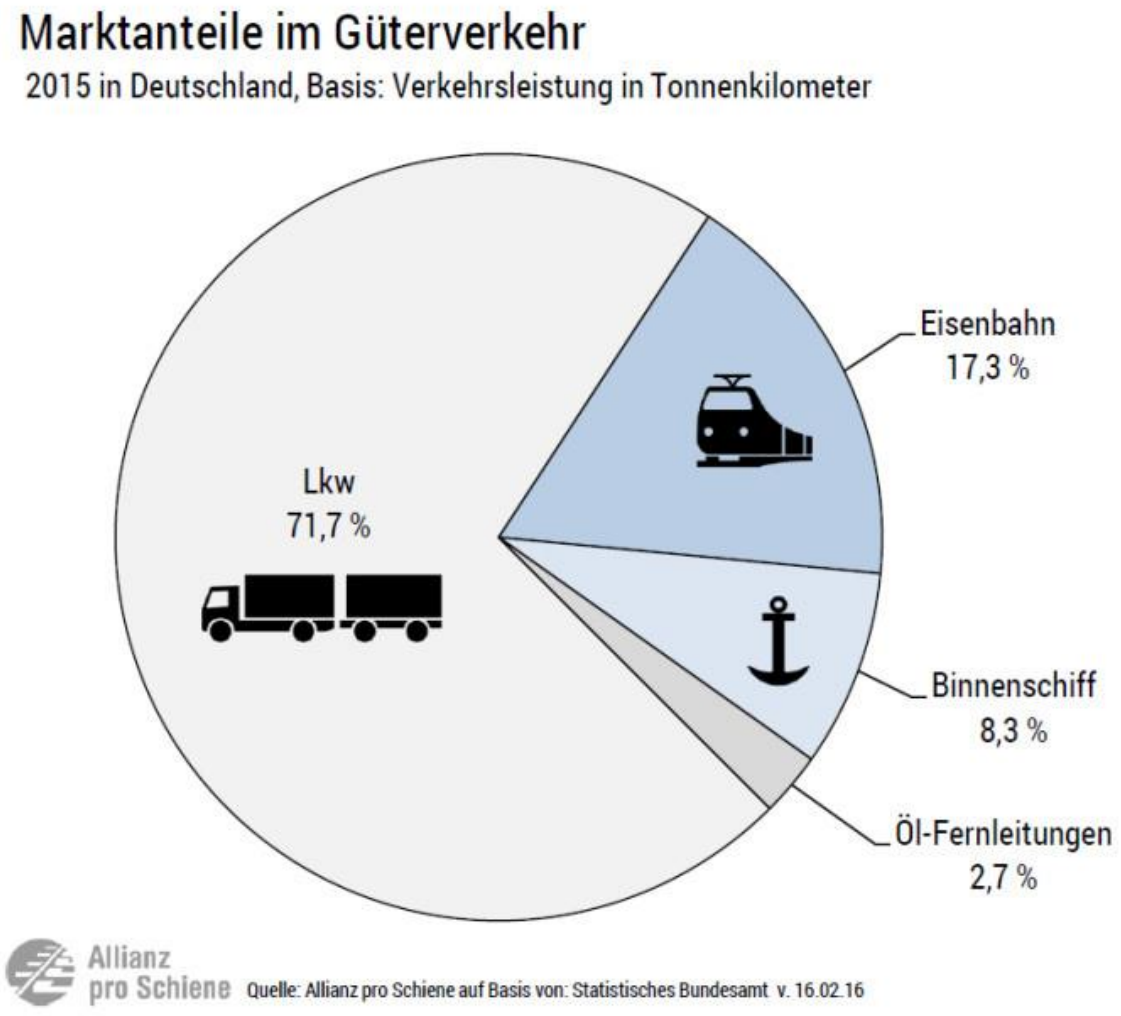


Bild 6
Übliche Marktanteilsdarstellung 17,3 % der tkm bei nur 1,9 % Umsatzanteil am Logistikmarkt

Mittel- und langfristig werden viele sogenannte bahnaffine Güter, insbesondere Kohle, Erze und Metalle, Papierrollen und Öl unvermeidbar rückläufig sein. Es zeigt sich bei Lebensmitteln, Bekleidung, Maschinen, Möbeln und Post ein verschwindend geringer Marktanteil der Eisenbahn, Bild 7. Einzig der Fahrzeugtransport bildet eine Ausnahme. Die Situation in D ist ganz im Gegensatz zur Schweiz, wo der größte Kunde der SBB-Cargo die Lebensmittelkette Migros ist und die Nummer 2 der Schweizer Lebensmittelbranche COOP sogar ein eigenes, deutlich wachsendes und stark öffentlich beworbenes EVU namens Railcare betreibt.

Erfolgreiche Bemühungen um höherwertige Güter sind somit nötig, nicht nur um den Marktanteilsschwund zu vermeiden, sondern auch um Wachstum und Ertragsverbesserung zu ermöglichen und so einen substantiellen Beitrag zur Minderung des CO_2-Ausstoßes leisten zu können. Dafür muss aber auch die Qualität, Schnelligkeit, Pünktlichkeit und Schadanfälligkeit verbessert werden.

Güterbeförderung

Beförderungsleistung im Inland nach Verkehrsträgern und Güterabteilungen 2014 (NST -2007)

Güterabteilung	Einheit	Eisenbahn	Binnen-schifffahrt	Straßenverkehr inländischer Lastkraftwagen[1]
[1] Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), Flensburg. / = Keine Angaben, da Zahlenwert nicht sicher genug. - = Nichts vorhanden.				
Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei	Millionen Tonnenkilometer	1 486	7 031	21 403
Kohle, rohes Erdöl und Erdgas	Millionen Tonnenkilometer	7 209	7 921	871
Erze, Steine und Erden, Bergbauerzeugnisse	Millionen Tonnenkilometer	12 447	9 753	28 048

Beförderungsleistung im Inland
nach Verkehrsträgern und Güterabteilungen 2014 (NST -2007)

Güterabteilung	Einheit	Eisenbahn	Binnen-schifffahrt	Straßenverkehr inländischer Lastkraftwagen[1]
Nahrungs- und Genussmittel	Millionen Tonnenkilometer	1 182	2 985	52 079
Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren	Millionen Tonnenkilometer	11	8	1 924
Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse	Millionen Tonnenkilometer	4 907	836	21 051
Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	Millionen Tonnenkilometer	10 443	9 755	9 011
Chemische Erzeugnisse	Millionen Tonnenkilometer	9 500	6 852	24 736
Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips und so weiter)	Millionen Tonnenkilometer	2 479	1 046	26 598
Metalle und Metallerzeugnisse	Millionen Tonnenkilometer	12 311	3 956	22 836
Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte et ceterra	Millionen Tonnenkilometer	447	257	9 054
Fahrzeuge	Millionen Tonnenkilometer	5 592	385	13 787
Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte et ceterra	Millionen Tonnenkilometer	38	144	3 353
Sekundärrohstoffe, Abfälle	Millionen Tonnenkilometer	2 543	3 669	18 944
Post, Pakete	Millionen Tonnenkilometer	-	-	7 909
Geräte und Material für die Güterbeförderung	Millionen Tonnenkilometer	1 644	481	8 582
Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter	Millionen Tonnenkilometer	21	2	7 158
Sammelgut	Millionen Tonnenkilometer	1 310	-	32 212

Beförderungsleistung im Inland nach Verkehrsträgern und Güterabteilungen 2014 (NST -2007)				
Güterabteilung	Einheit	Eisenbahn	Binnen-schifffahrt	Straßenverkehr inländischer Lastkraftwagen[1]
Gutart unbekannt	Millionen Tonnenkilometer	38 554	4 011	586
Sonstige Güter anderweitig nicht genannt	Millionen Tonnenkilometer	504	1	/
Insgesamt	**Millionen Tonnenkilometer**	**112 629**	**59 093**	**310 142**

DESTATIS Statistisches Bundesamt 2016

Bild 7

Aufteilung der verschiedenen Transportgüter auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Schiff in Deutschland

Nach Litra (Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, Bern 2015) wurden in Deutschland folgende Gutmengen (in 1000 t gemessen) befördert:
Schiene 373 738 Straße 2 938 702 Luft 4 231 Binnenschiff 226 864
d.h. die Luft-Transportmenge ist 0,14% der der Straße. Leider konnte der Umsatzanteil der Luftfracht nicht in Erfahrung gebracht werden. Viele ehemalige bahnaffine Güter wie Blumen, Obst oder Post werden heute per Luftfracht – und teilweise über deutlich längere Strecken - befördert.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) der deutschen Bundesregierung hat am 4.6.2012 in seinem Umweltgutachten in Abschnitt 285 folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen zum Güterverkehr allgemein veröffentlicht, die deutliche Verbesserungen für die Schiene bedeuten würden, aber bisher nicht umgesetzt werden:

„Der Güterverkehr, dominiert vom Gütertransport auf der Straße, trägt bereits heute mit 7 % des gesamten THG (Treibhausgas-Ausstoßes in Deutschland erheblich zur Klimabelastung bei. Angesichts der prognostizierten Wachstumsraten des Güterver-

kehrs ist zu erwarten, dass dieser Anteil in Zukunft weiter ansteigen wird. Um das langfristig – bis 2050 – angestrebte Ziel einer weitestgehenden Dekarbonisierung des gesamten Wirtschaftssystems zu erreichen, muss auch der Güterverkehr seine Klimabilanz substanziell verbessern. Dazu ist es erforderlich, die Entwicklung auf vier verschiedenen Ebenen grundlegend zu verändern. Es bedarf
– einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Verkehrsleistungswachstum,
– einer Verbesserung der Energieeffizienz und CO_2-Intensität sämtlicher Verkehrsmodi,
– einer Stärkung des Anteils besonders energieeffizienter Verkehrsträger im Modal Split und
– einer weitgehenden Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energieträger.
Um diese Veränderungen zu erreichen, ist eine Kombination verschiedener ordnungsrechtlicher, planerischer und fiskalischer Maßnahmen und Instrumente mit unterschiedlichen Zeithorizonten notwendig.“
Das sind sicher richtige, aber abstrakte Forderungen des SRU, die die hier vorliegende Studie konkretisiert.

Ebenso äußert sich das Bundesumweltministerium aktuell zum Schienengüterverkehr http://www.bmub.bund.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/gueterverkehr/

„2014 lag die Güterverkehrsleistung bei knapp 655 Milliarden Tonnenkilometern. Weiteres kontinuierliches Wachstum wird prognostiziert. Die aktuelle Verflechtungsprognose des Bundesverkehrsministeriums geht von einem weiteren Zuwachs von 38 Prozent bis 2030 aus, bis 2050 könnte sich die Transportleistung gegenüber 2015 sogar verdoppeln.

Im Inlandsverkehr haben allein Straßengüter- und Luftfrachtverkehr seit den 1960er Jahren hinzugewonnen, während Binnenschiff und Eisenbahn an Bedeutung verloren. Heute werden etwa 72 Prozent aller inländischen Transporte auf der Straße erbracht. Dies ist insbesondere aus klimapolitischer Sicht problematisch. Der Straßengüter- und Luftfrachtverkehr sind nach wie vor zu mehr als 90 Prozent von fossilen Energien abhängig. Der Straßengüterverkehr allein ist für etwa 25 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen des Verkehrs verantwortlich. Aufgrund der wachsenden Transportleistung wurden bisherige Effizienzgewinne hinsichtlich der

Treibhausgasemissionen immer wieder kompensiert. Daher sind neue Ansätze im Hinblick auf die anspruchsvollen Klimaschutzziele Deutschlands dringend erforderlich. Das Bundesumweltministerium setzt insbesondere auf die Verlagerung von Verkehren auf die energieeffizientere Schiene und mittelfristig auf die neue Energieträgerbasis Elektrizität für den verbleibenden Straßengüterverkehr."

Sehr hervorzuheben ist somit, dass primär die Verlagerung auf die Schiene gefordert wird und die Elektrifizierung der Straße nur für den verbleibenden Restverkehr.

Für die Verlagerung von der Straße auf die Schiene gibt es in dem Dokument leider keine Vorgehensweise, wie das erreicht werden soll und wie das umgesetzt werden soll. Dagegen wurde die Straßenelektrifizierung von der Industrie aufgenommen und exemplarisch realisiert. So wurde diese Maßnahme Straßenelektrifizierung in der Öffentlichkeit fälschlicherweise als die hauptsächlich empfohlene aufgefasst.

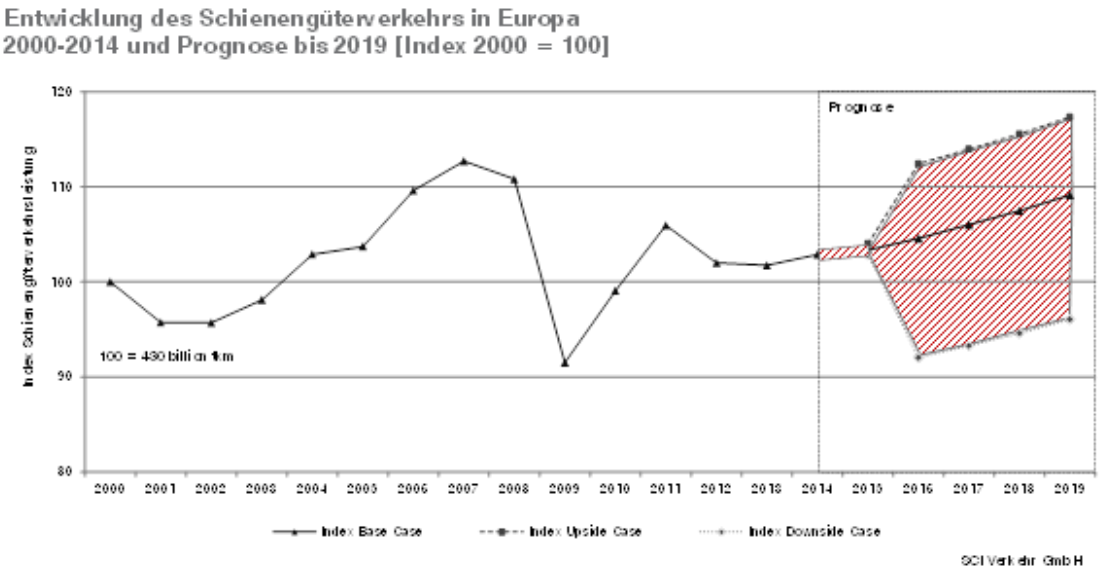


Bild 8

Entwicklung des Schienengüterverkehrs in Europa mit Prognose bis 2019 [SCI-Verkehr 2015]

Bild 8 zeigt für die Prognose des Schienengüterverkehrs den Wunsch und die Hoffnung des leichten Zuwachses, aber auch durch das breitere Feld unterhalb des Mittwertes eine nicht unwahrscheinliche Verringerung der Verkehrsleistung in Zukunft. Von alleine unter den heutigen Randbedingungen wird kein Wachstum eintreten.

4. Energieverbrauch Schiene und Straße

Schienenverkehr ist schon heute energieeffizienter als Straßenverkehr. Bei Lastwagen ist mit einem Energieverbrauch zwischen 0,18 kWh/tkm voll beladen und 0,27 kWh/tkm teilbeladen zu rechnen [IFEU Programm EcoTransIT 2014], Bild 9. Auf der Schiene liegen die Werte bei 0,08 kWh/tkm voll beladen und 0,12 kWh/tkm schwach beladen für durch Graugussbremsklötze aufgeraute Räder. Mit Kompositbremsklötzen sind die Räder glatter. Die Verbrauchszahlen bestätigen den kleineren Fahrwiderstand aufgrund der Erfahrungen und einfacher Messungen [4], daher werden für Kompositbremsklötze (K und LL-Typen) 0,07 kWh/tkm beladen und 0,11 kWh/tk leer angesetzt. Es ist zu erwarten, dass die Werte noch günstiger sind, was noch nachzuweisen ist.

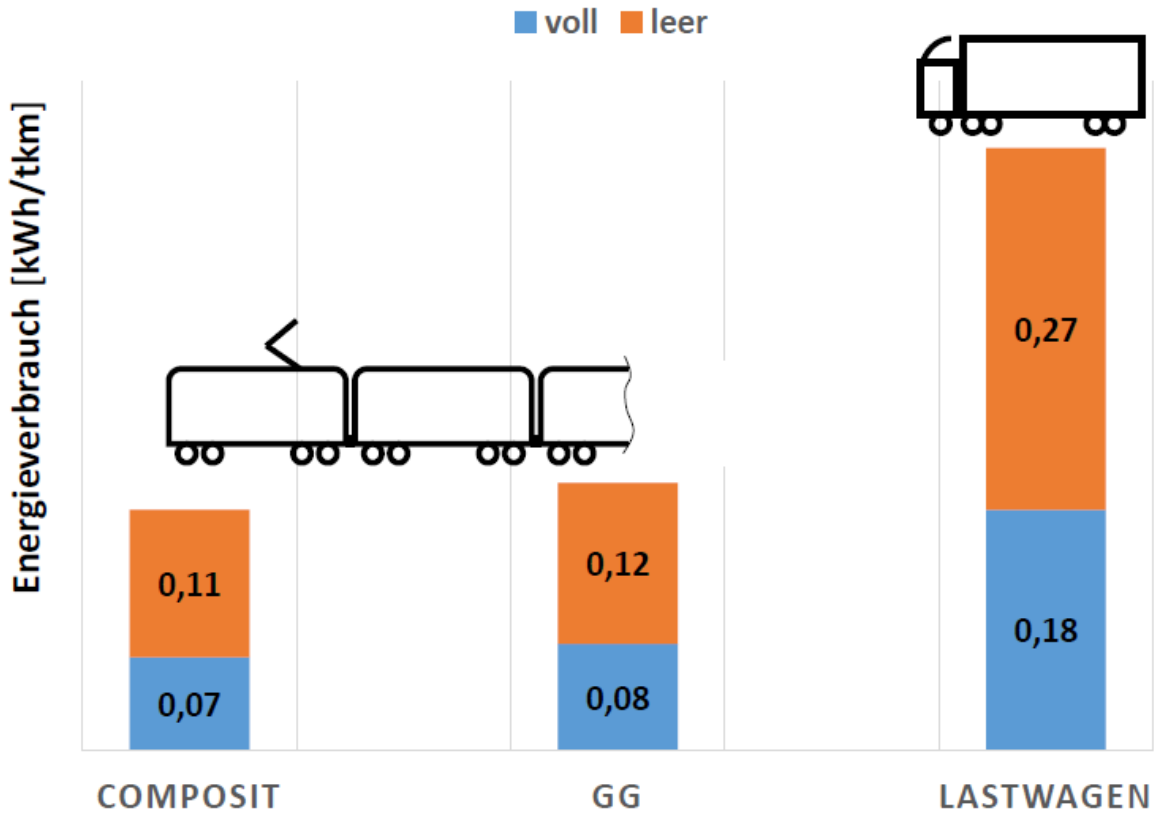
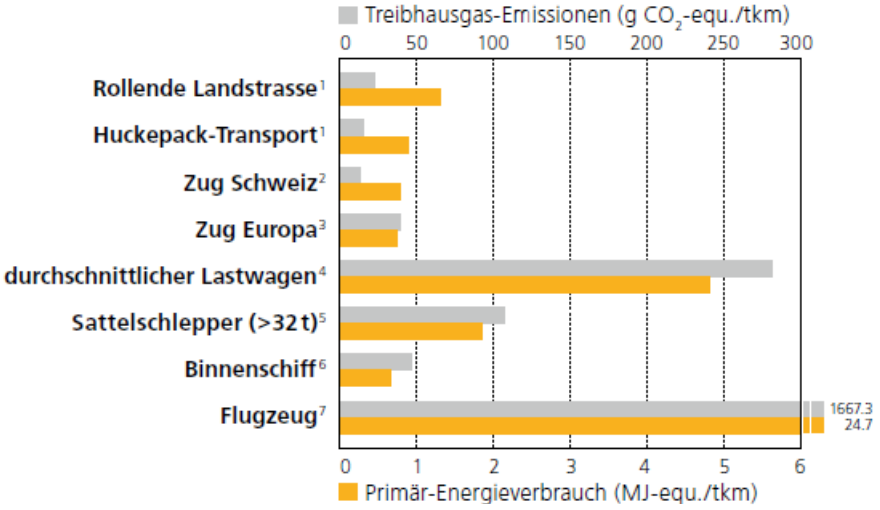


Bild 9
Spezifischer Energieverbrauch Schienengüterverkehr mit glatten Rädern (Komposit gebremst) und rauen Rädern (GG-gebremst) und Lastkraftwagen leer und beladen

Somit kann durch Modal shift, Verlagerung von Straße auf Schiene, der Energieverbrauch pro tkm auf weniger als die Hälfte reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit, um den Rollwiderstand der Schiene zu verringern, sind glatte Schienen. Schon aus Lärmgründen

sollten Riffel und andere Rauigkeiten auf den Schienen durch akustisches Schleifen beseitigt werden, was auch den Energieverbrauch reduziert.



[1] Strommix SBB
[2] Strommix SBB plus Dieselanteil Rangierung
[3] Strommix UCTE & Diesel
[4] Mittel über gesamten Lkw-Flottenbestand
[5] Diesel EURO 5; durchschnittliche Auslastung: 55 %
[6] Rheinschifffahrt
[7] Europa

Quelle: www.mobitool.ch

Bild 10
Treibhausgasemissionen im Güterverkehr für verschiedene Verkehrsträger
Litra (Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, Bern 2015)

Bild 10 zeigt, dass der Energieverbrauch des Zuges in jedem Fall sehr viel kleiner ist als der des Lastwagens, dass aber die CO_2-Emission zusätzlich durch die Verwendung CO_2-armen Stromes weiter erheblich verringert werden kann (vergleiche Zug Schweiz (CO_2-armer Strom) mit Zug Europa (auch mit Kohlestrom und Dieseltraktion)). Umso weniger nachvollziehbar ist es, dass nur der elektrische Schienenverkehr eine Umweltförderabgabe bezahlen muss, die EEG–Umlage, während der Straßengüterverkehr und der Luftverkehr, die beide sehr viel größere Verschmutzer sind, keinen Beitrag zur Energiewende bezahlen müssen. Straßengüterverkehr und Luftverkehr, Bild 10, bemühen sich zwar auch um die Verringerung der Treibhausgasemission, können aber die Eigenschaften der Schiene nie auch nur angenähert erreichen, Bild 11.

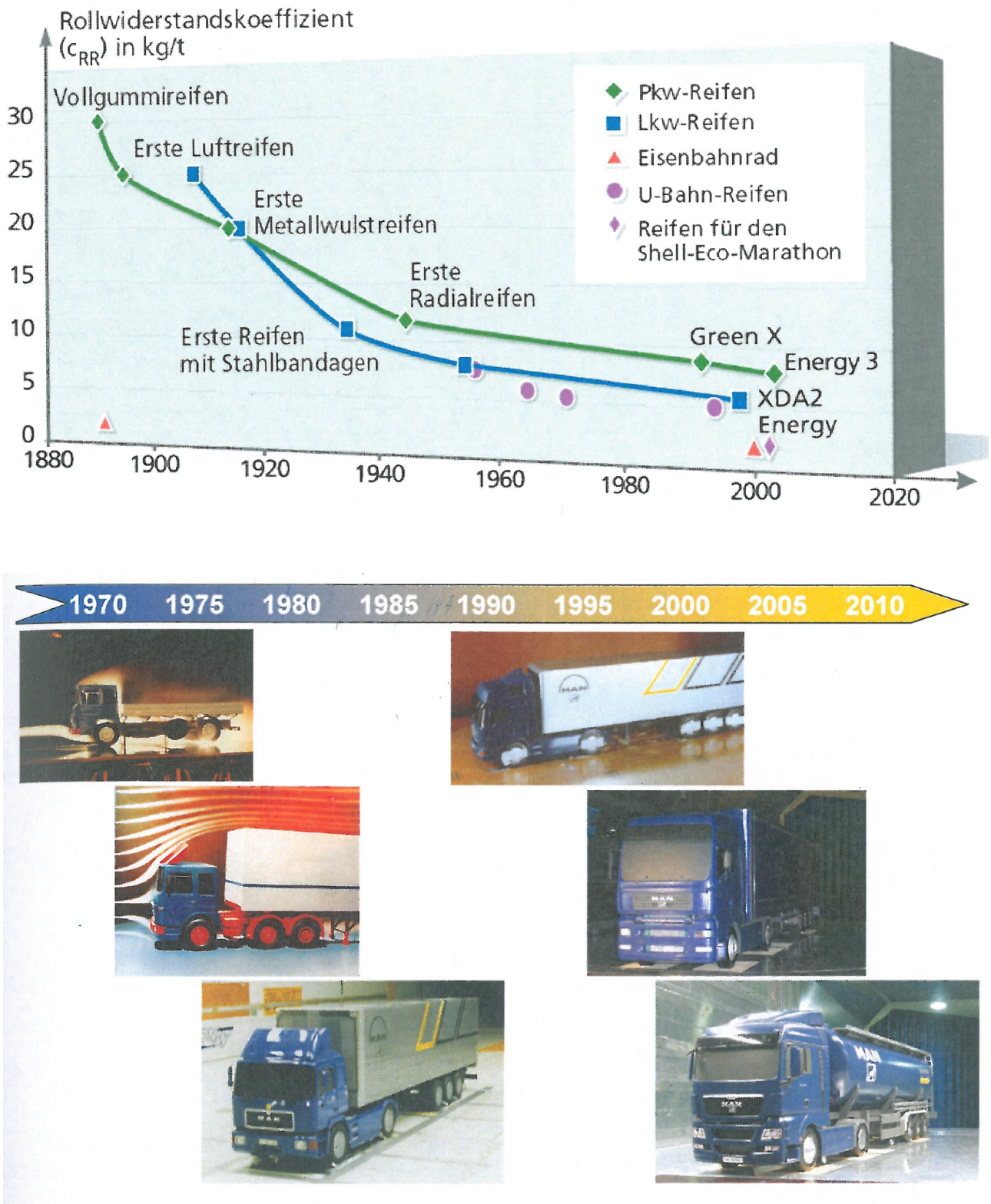


Bild 11

Maßnahmen zur Verminderung des Fahrwiderstands bei LKW [5]

Oben Rollwiderstandsverringerung bei LKW-Rädern

Unten Luftwiderstandsminderung über Windkanalmodelle

Bild 11 oben zeigt die Bemühungen zur Rollwiderstandsminderung auf der Straße. Die Vergleichswerte U-Bahn beziehen sich auf die französischen Pneu Metros, z.B. viele Linien im Metro Netz Paris oder die Metro Lausanne. Die praktische Rollwiderstandsminderung ist wegen der Regen- und Schneetauglichkeit und auch der Fahrbahnbeanspruchbarkeit auf der Straße begrenzt.
Die aerodynamische Optimierung erfolgt kontinuierlich seit den 1970er Jahren in Modellversuchen im Windkanal, Bild 11 unten. Ähnliches ist aber auch mit Güterwagen im Schienenverkehr möglich, siehe Kapitel 6.3.

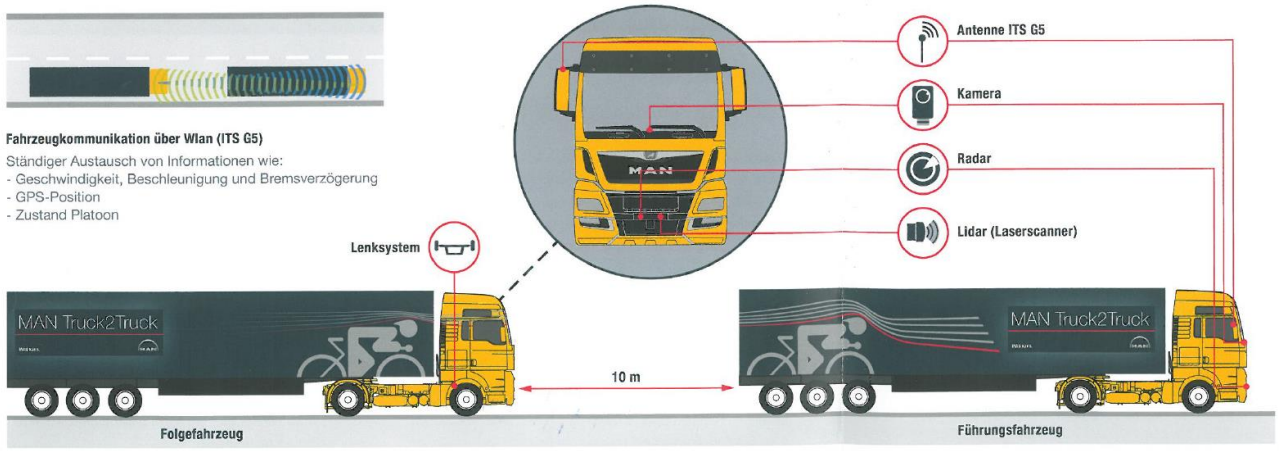
Eine weitere aktuelle Entwicklung auf der Straße ist das Fahren von zwei Lastzügen durch einen Fahrer mit elektronischer Deichsel, das sogenannte Platooning (übersetzt Zugbildung von Militärkonvois), siehe Bild 12 oben.

Hier ein Ausschnitt aus einem Herstellerprospekt, der nachfolgend dann kommentiert wird.

„Unter Platooning versteht man bei MAN Truck & Bus ein in der Entwicklung befindliches Fahrzeug-System für den Straßenverkehr, bei dem mindestens zwei oder mehrere Truck-Trailer-Kombinationen mit Hilfe von technischen Fahrassistenz- und Steuersystemen sowie einer Car-to-Car-Kommunikation in geringem Abstand hintereinander fahren und gleichzeitig die Verkehrssicherheit verbessern können. Durch diese „elektronische Deichsel“ wird das Folgefahrzeug in der Längs- und Querführung automatisiert, sprich es folgt dem führenden Lkw. Der Abstand der einzelnen Sattelzugkombinationen beträgt dabei untereinander unter 15 Meter beziehungsweise etwa eine halbe Sekunde Fahrzeit. Das so erzeugte „Windschatten-Fahren“ ermöglicht eine Kraftstoff-Einsparung je nach Fahrzeugtyp und Konvoilänge von bis zu zehn Prozent für den gesamten Platoon, was eine Reduzierung der CO_2-Emission nach sich zieht. Diese erwünschten Effekte lassen sich am besten bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h erzielen.
[MAN Werbemitteilung 5.4.16]

Der Abstand zwischen den LKW muss aus Sicherheitsgründen sehr groß sein, mindestens 10m, da die Reaktionszeiten des Folgefahrzeugs, der geringere Luftwiderstand des Folgefahrzeugs gegenüber dem Führungsfahrzeug und in die ungünstige Richtung wirkende Toleranzen in den Bremskräften ausgeglichen werden müssen. Dagegen ist der Abstand von Güterwagen in der Größenordnung der zweifachen Pufferlänge, nämlich 2*620 mm = 1240 mm und damit wesentlich geringer, was den aerodynamischen Widerstand im Schienengüterverkehr deutlich stärker als mit „Platooning“ vermindert.

Auch viele Sicherheitsfragen sind noch offen. Insbesondere soll sich der Platoon Konvoi bei den Einfahrten auf Autobahnen jeweils auflösen und anschließend wieder schließen. Dies bedeutet dann auch eine Geschwindigkeitsverringerung im Einfahrtbereich.



E-LKW

Bild 12

Oben

Platooning [MAN Prospekt]

Unten

Siemens E-LKW http://www.siemens.com/press/de/feature/2015/mobility/2015-06-ehighway.php#ii142

Eine weitere Innovation auf der Straße ist der E-LKW, siehe Bild 12 unten. Hybrid-LKW sollen unter Fahrleitung elektrisch auf stark belasteten Autobahnen verkehren und im übrigen Straßennetz als dieselelektrische Fahrzeuge.

Nach [6] wird in einer großtechnischen Anwendung von 4 Mio. €/km Investitionskosten für beide Autobahnspuren ausgegangen. Das ergibt bei der Elektrifizierung der Hälfte des Deutschen Autobahnnetzes von 15000 km einen Finanzbedarf von 26 Mrd. €. Das ist ein sehr großer Betrag, der auf die öffentliche Hand zukommen würde.
Das Stromsystem Gleichstrom 750 V ermöglicht Straßenbahn- oder O-Bustechnologie zu verwenden. Die Zahl der Einspeisestellen wird zwar groß sein, dafür ist die Fahrzeugausrüstung umso billiger. Die LKW werden dieselelektrische Hybridfahrzeuge sein müssen mit Dieselgeneratorantrieb für die fahrleitungslosen Abschnitte und elektromotorischem Antrieb für alle Betriebszustände. Das Mehrgewicht des LKW wird so voraussichtlich zwei Tonnen betragen und die Nutzlast entsprechend reduzieren. Die Mehrkosten des HybridLKW in Großserie werden ca. 25% sein, geschätzt 125.000,- statt 100.000,- €.
Der E-LKW kombiniert den hohen Fahrwiderstand des Lastwagens mit Straßenbahntechnologie. Auch die Straßenbahntechnologie ist eine stark verlustbehafte E-Versorgung mit dem Vorteil eher geringer Investitionskosten auf der Fahrzeugseite. Auch wenn der E-LKW mit grüner Energie verkehren sollte, so ist der Grundsatz des sparsamen Umgangs mit Energie verletzt. Je tkm wird der Energieverbrauch ca. doppelt so groß sein wie mit der Eisenbahn. Exakte Zahlen werden noch nicht kommuniziert.

Für die Modal shift Verschiebung von Straße auf Schiene sind substantielle Verbesserungen auf der Schiene nötig und möglich. Auf Basis der heutigen Zulassungsvorgaben für Eisenbahnen ergeben sich erhebliche Gewichtseinsparmöglichkeiten durch kleinere Längskräfte, kleinere Räder, Leichtbaustähle. Aber auch neue Berechnungsmethoden tragen zu erheblichen Verbesserungen bei. Digitale Informationstechnik lässt die Stillstands- und Ausfallzeiten reduzieren und ermöglicht einen schnelleren und zuverlässigeren Betrieb. Es sind dann kleinere Reserven im Fahrplan nötig und weniger Reservewagen.

Die Verkürzung der Zugbildungszeit ist ganz wesentlich, um die attraktive Eisenbahntransportentfernung zu verkürzen und mehr Güter zu erreichen.

Transportaufkommen 2009 nach Entfernungsstufen der Transporte Tabelle 4

STATISTIK AUSTRIA
Die Informationsmanager

Entfernungsstufe der Transporte bezogen auf Inlandstrecke	Transportaufkommen		
	österreichischer Straßengüter-fahrzeuge	inländischer Eisenbahn-verkehrs-unternehmen	auf der Donau
	in 1.000 Tonnen		
Bis 80 km	273.798	21.828	1.304
81 bis 150 km	28.123	29.914	2.189
151 bis 200 km	10.485	5.733	56
201 bis 250 km	7.692	6.474	466
251 bis 300 km	6.252	8.638	2.725
301 bis 500 km	5.623	18.265	2.583
Über 500 km	1)	2.228	-

Q: Güterverkehrsstatistik. - 1) Werte für "über 500 km" werden aufgrund zu großer Stichprobenfehler bzw. zu geringer Fallzahlen nicht ausgewiesen.

Bild 13
Transportaufkommen am Beispiel Österreichs in Funktion der Entfernung [Statistik Austria 12/2010]

Das Beispiel der obigen Daten zeigt, dass der Anteil der Eisenbahn unter 80 km Entfernung gering ist, aber die Gutmengen sehr groß sind.

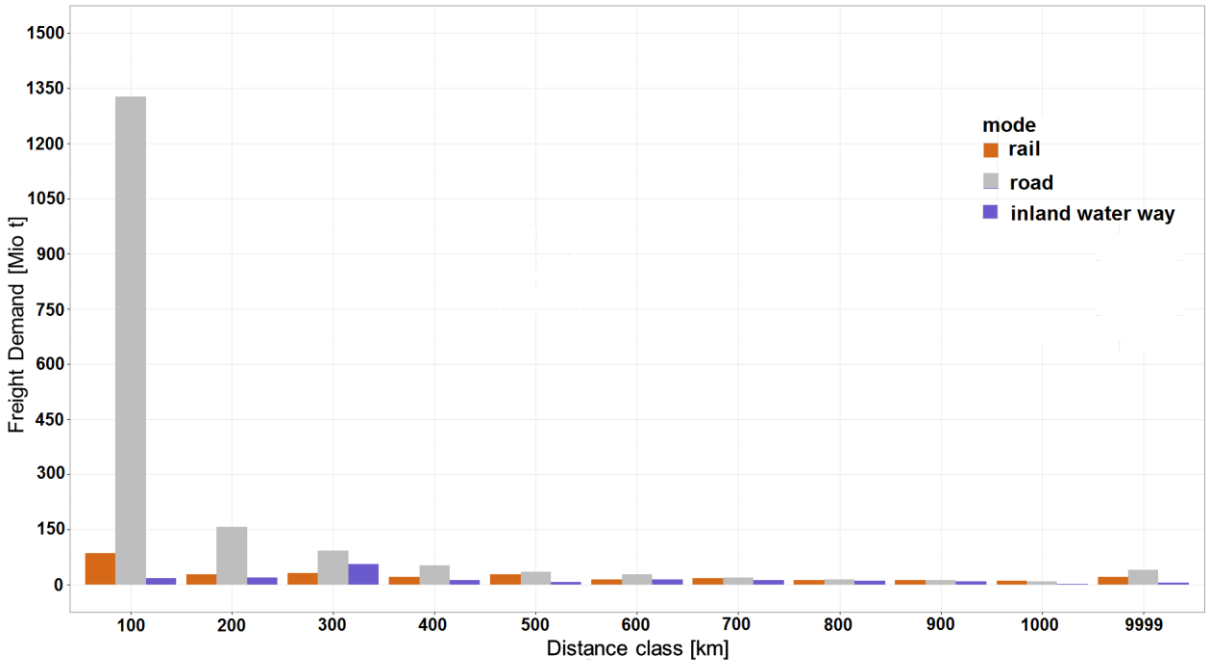


Bild 14
Vergleich der Gutmengen in Funktion der Transportentfernungen der drei Verkehrsträger Schiene Straße und Binnenschiff in Deutschland [Quelle DLR, Institut für Verkehrsforschung Berlin Adlershof 2016]

In Deutschland ist es anders als in Österreich. Hier hat die Schiene auch im Nahbereich die größten Mengen, allerdings bei einem sehr kleinen Marktanteil. Im Bereich 700 bis 1000 km Entfernung sind Schiene und Straße gleich, aber bei noch größerer Entfernung ist die Straße wieder vorne.
Aufgrund der Ergebnisse der Bilder 13 und 14 ist gar nicht verständlich, wenn das EU Weißbuch für Verkehr 2011 den Schienengüterverkehr nur auf Entfernungen oberhalb 300 km verstärken will. Diese große Entfernung würde dem Schienengüterverkehr eine große mögliche Gutmenge entziehen. Kürzere Zugbildungszeiten und schnellere Umläufe, möglichst mehrere am Tag, erschließen große Gutmengen für den Eisenbahnverkehr

Die heutige Performance des Schienengüterverkehrs und die Marktakzeptanz korrespondieren miteinander.
Olaf Krüger, Vorsitzender des Verbands europäischer Schienengüterverkehrsspediteure berichtete auf dem Güterverkehrsforum am 7.7. 15 im BMVI Berlin, dass die Kundenwahrnehmung von steigender Transportdauer, geringerer Pünktlichkeit, rückläufiger Wettbewerbsfähigkeit und keiner ausreichenden politischen Wahrnehmung geprägt ist.

Die Transportdauer schwankt stark, typisch zwischen 7 und 30 km/h im Wagenladungsverkehr und 20 bis 70 km/h im Ganzzugsverkehr.
Im Geschäftsbericht 2014 gab DB-Schenker die Pünktlichkeit (Kriterium mehr als 30 min Verspätung) mit 68 % an. Die mittlere Verspätungsdauer der verspäteten Wagen wurde auf dem Güterverkehrsforum bei BMVI am 7.7.15 mit 23 h genannt.
Die geringe Zuverlässigkeit hat viele Gründe. Einer ist die wagentechnische Untersuchung vor Ausfahrt des Güterzuges aus dem Rangierbahnhof. Wird ein Schaden am Wagen festgestellt, so verzögert sich die Ausfahrt für den ganzen Zug. Wenn mit mobiler Einsatzgruppe repariert wird, u.U. noch länger als wenn der beschädigte Wagen ausgesetzt und in die Wagenwerkstatt gebracht wird. Die Untersuchung vor Ausfahrt des Zuges zu machen, war in Rangierbahnhöfen alter Technik mit Hemmschuhbremsung und ungesicherten Weichen sinnvoll, da damals viele Schäden, sogar viele Entgleisungen, auf dem Rangierbahnhof entstanden. Heute jedoch mit modern ausgestatten Bahnhöfen mit gesicherten Weichen und Zielbremsung über Balkengleisbremsen [7] tritt fast keine Beschädigung mehr auf dem Rangierbahnhof auf.

Es wäre so sehr viel sinnvoller, wenn der Langmacher die wagentechnische Untersuchung in der Einfahrgruppe durchführen könnte. Dadurch könnte die Beeinträchtigung intakter Wagen vermieden werden und die Zuführung des defekten Wagens zur Wagenwerkstatt erfolgte sehr viel früher. Bei der Ausfahrt müsste nur noch eine automatische Bremsprobe vom Führerstand der Lok per Knopfdruck erfolgen, die typischerweise zehn Minuten dauert und auch bei Problemen mit einzelnen Wagen deutlich schneller ist als eine klassische wagentechnische Untersuchung kombiniert mit Bremsprobe.

Ein wesentlicher Grund für die geringe Transportgeschwindigkeit ist die langsame Zugbildung mit wagentechnischer Untersuchung und manueller Bremsprobe. Der Wagenmeister muss durch automatische Systeme ersetzt werden, damit dies schneller, zuverlässiger und auch sicherer mit automatischer Dokumentation geschieht. Im Personenverkehr erfolgte die Abschaffung des Wagenmeisters etwa 1995. Automatische Bremsprobe [8], Bild 15 und 16, automatische Kupplung und Diagnose, Bild 17, sind die einzuführenden neuen Systeme zur Verringerung der Stillstandszeiten.

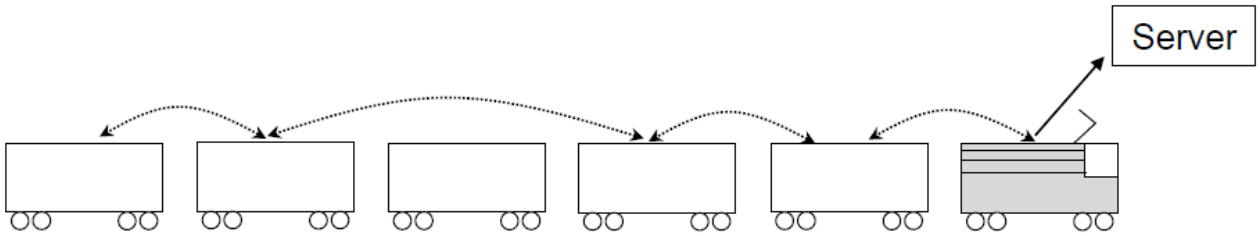


Bild 15
Funkverbindung zwischen Lok und Wagen für die Kommunikation bei der automatischen Bremsprobe

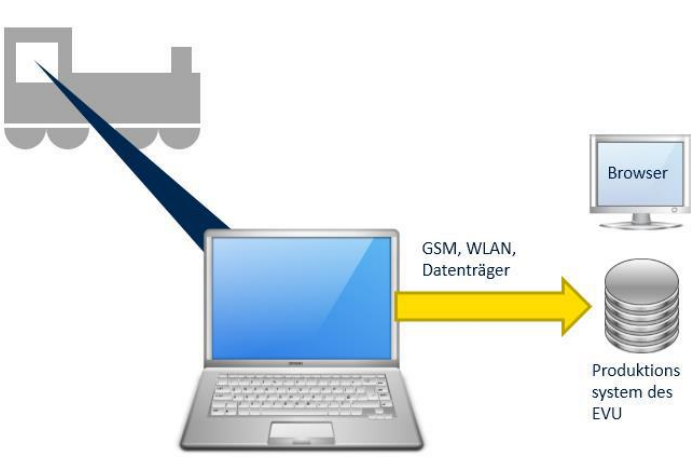


Bild 16
Anwendung der automatischen Bremsprobe an einem Schüttgutzug mit Messung von Bremsleitungsdruck und Bremszylinderdruck, Datenübertragung und automatisierter Auswertung für das Lokpersonal.

Ein weiterer Grund für Verspätungen sind Ausfälle der Wagentechnik, vor allem in Laufwerk und Bremse. Das kann mit Diagnose früher erkannt werden und dann die Reparatur in den Ablauf möglichst zeitsparend, und wenn irgend möglich nicht im Lastlauf, aber auch mit paralleler Ersatzteilorganisation zeitsparend im Leerlauf eingeplant werden. Industrie 4.0 soll nicht nur für die ECM Datenverwaltung, sondern auch für die Verkürzung der Disposition verwendet werden.
Ein komplettes Diagnosesystem ist z.B. das AMRA (Asset Monitoring for Railway Applications) System von Bosch oder das INOX Asset Monitoring von Amsted http://www.amstedrail.com/products-services/ionx-asset-monitoring .

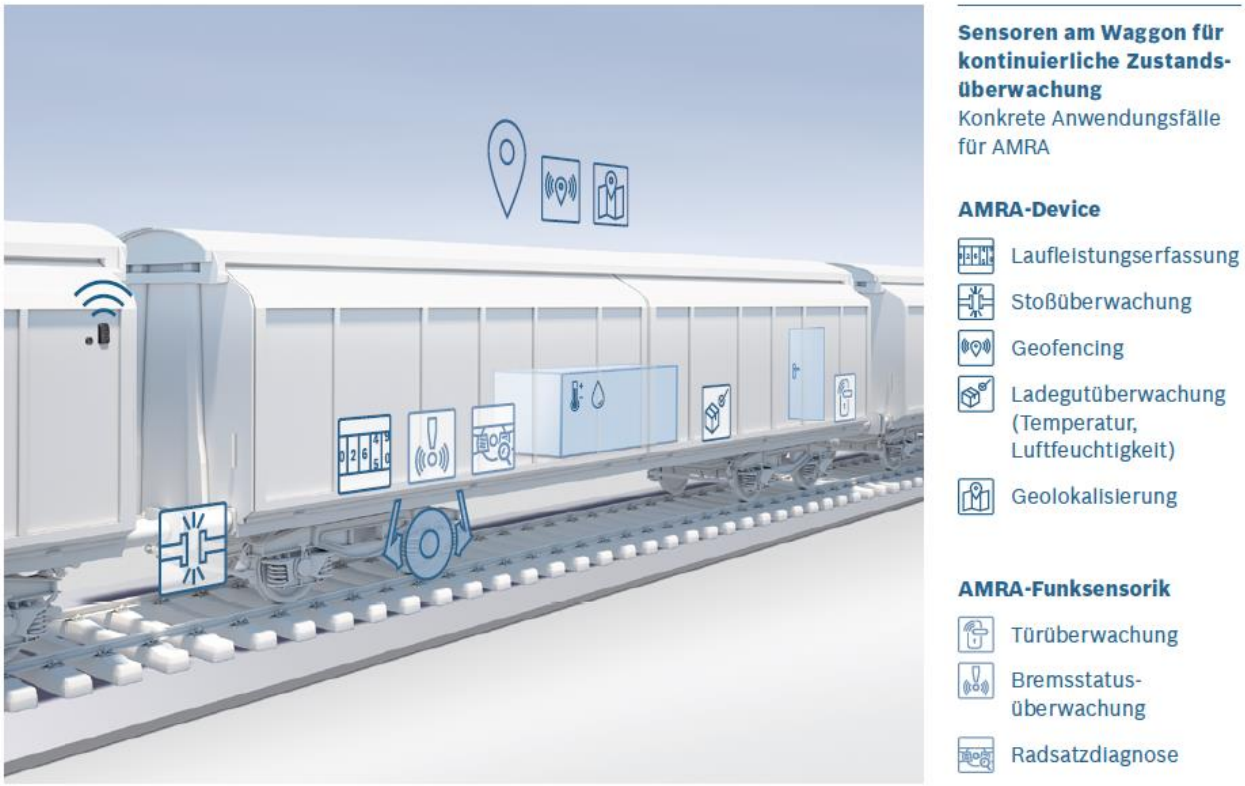


Bild 17
Bosch AMRA System mit Beispielapplikationen

Die Radsatzdiagnose enthält auch eine Flachstellenerfassung. Die Datenführung für ECM kann automatisch erfolgen. Außer der eigentlichen Digitalisierung ist die Energieversorgung auf dem Güterwagen eine Herausforderung. Dies können entweder Batterien leisten, die einen mehrjährigen Einsatz erlauben oder aber durch Energy Harvesting, Energieerzeugung aus Fahrzeugschwingungen.

Mittels piezoelektrischem Energy Harvesting wurde ein Condition Monitoring System für den Einsatz am Güterwagen versorgt, im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekts “Energieautarke Sensorsysteme zur Zustandsüberwachung von Güterwagen (ESZüG)“. In diesem im Februar 2016 abgeschlossenen Projekt wurde unter der Projektträgerschaft des VDI/VDE-IT durch das angetretene Konsortium bestehend aus BASF SE, Cognidata GmbH, The smart system solution GmbH, Invent GmbH, Fraunhofer LBF und dem Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin hierfür ein prototypisches energieautarkes Sensorsystem (EASS) zur Anbringung am Radsatzlager entwickelt, welches gegenwärtig eine Flachstellendetektion und Heißläufererkennung realisieren kann, aber perspektivisch um weitere Funktionalitäten erweiterbar ist [9]. Die Energieversorgung wird durch Energy Harvesting und Wandlung der mechanischen Schwingungs- bzw. Vibrationsenergie in elektrische Energie gewährleistet, wohingegen die Datenübertragung mit Hilfe eines passiven RFID Transceivers erfolgt. Die erzeugten Daten werden schließlich in ein ebenfalls im Rahmen des Projekts entwickeltes Monitoring-Backend zur computergestützten Instandhaltungsplanung (CMMS - Computerized Maintenance Management System) eingespeist [10]. Für die notwendige Auslegung des EASS wurden seitens der Projektpartner u.a. Betriebslasten am Güterwagen messtechnisch aufgezeichnet, Mehrkörpersimulationen zur Untersuchung der Einflüsse der Randbedingungen durchgeführt sowie Laborversuche zur Optimierung der Piezokeramiken und Harvester-Schaltungen realisiert. Im Rahmen der abschließenden Validierungsmessung im ersten Quartal 2016 konnte die zufriedenstellende und korrekte Funktionsweise des gefertigten EASS-Prototypens hinsichtlich Energiekonzept und Messdatengewinnung nachgewiesen werden. Bild 18. Somit konnte die Machbarkeit eines EASS zur Sammlung von Zustandsinformationen am Güterwagen als primäres Projektziel verifiziert werden.

Bild 18
Feldtest der EASS-Prototypen (Energy Harvester mit Sensoren) am Kesselwagen im Rahmen der durchgeführten Validierungsmessung, Januar 2016

Die Mittelpufferkupplung erzeugt wesentliche geringere Querkräfte bei Krümmungswechseln in der Trassierung als Puffer bei Längskraft und hohen Reibwerten zwischen den Puffern. Eine Alternative wäre eine stabile Reibwertabsenkung durch Kunststoffplatten auf den Puffertellern. Aber das wird nur in der Schweiz bei Personenwagen praktiziert.

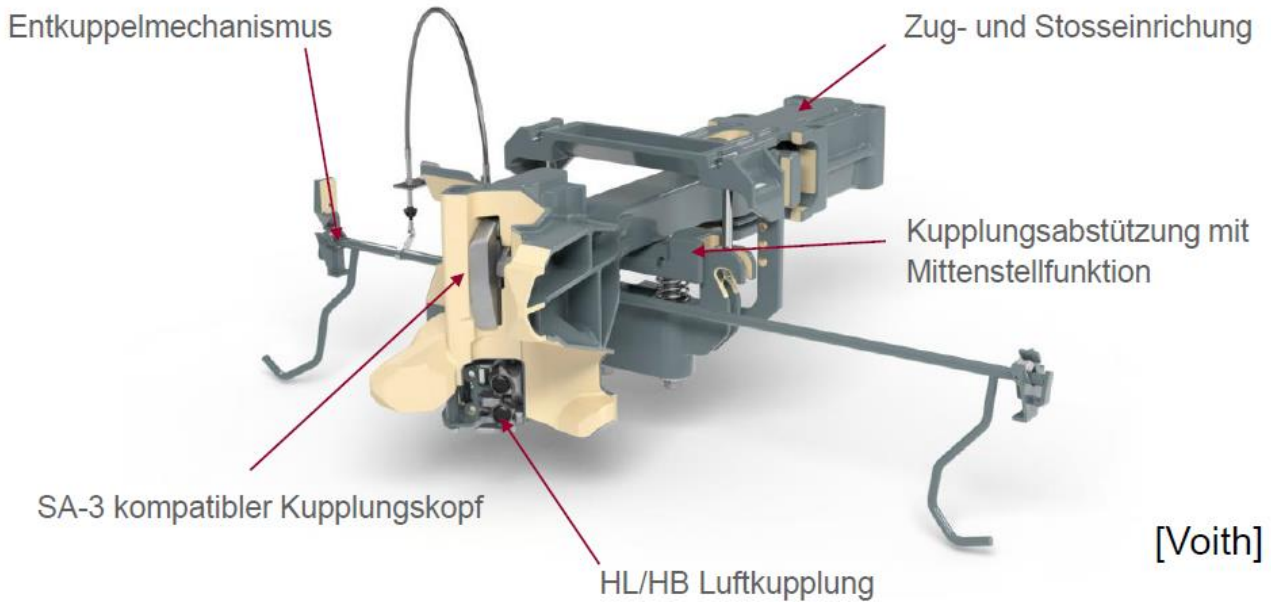


Bild 19
Automatische Kupplung für Güterwagen, kompatibel zur russischen SA3-Kupplung, jedoch mit Luftleitungsverbindung

Die automatische Kupplung für Güterwagen wird heute, 2016, in der Schweiz forciert. Es ist zu erwarten, dass in wenigen Jahren Erfahrungen vorliegen. Es ist deshalb vorerst zu empfehlen, noch wenige Jahre untätig zu bleiben, aber den Markt zu beobachten. Bild 19 zeigt eine moderne automatische Kupplung mit Luftanschluss.

5. Streckenkapazität

5.1 Taktfahrplan

Nicht nur im Schienengüterverkehr sondern auch im Personenverkehr auf der Schiene ist aus Klimagründen eine sehr starke Verkehrszunahme nötig. Der Ausbau der Infrastruktur wird nicht in dem Maße erfolgen können und müssen, wie der Verkehrszuwachs erfolgt. Die Streckenbelegung muss zunehmen, gleichzeitig muss auch die Pünktlichkeit (wieder) deutlich ansteigen. Verbesserte Pünktlichkeit erhöht zudem die Streckenkapazität.

Die probate Methode dies zu erreichen, ist die Einführung eines Taktfahrplans auch im Mischverkehr mit allen Verkehrsarten.
Die Schweiz gilt in Deutschland allgemein als Mutterland des Taktfahrplans, was jedoch in Wirklichkeit die Niederlande sind. Beginn war eine Exkursion der SBB Führungsspitze 1953 nach den Niederlanden mit dem klaren Ergebnis, dass ein Taktfahrplan für die Schweiz unmöglich sei [11]. Dennoch begann damals die Auseinandersetzung mit diesem Thema, was dann 1982 zur Einführung des Taktfahrplans auch in der Schweiz führte. Der Taktfahrplan wird kontinuierlich weiterentwickelt. Insbesondere wird durch Erhöhung der Reisegeschwindigkeit die Produktivität der Fahrzeuge vergrößert, was Finanzmittel für die Knotenausbauten verfügbar macht.
Der Taktfahrplan führt nicht nur zu einer sehr einfachen Benutzung für die Reisenden, sondern zu einer sehr hohen Effizienz der Nutzung der Infrastruktur und insbesondere von Ausbaumaßnahmen, die aufgrund der Fahrplananforderungen geplant werden. Dadurch, dass vor jeder Baumaßnahme bekannt wird, wie der betriebliche Nutzen in dieser sich während der Betriebszeit halbstündlich wiederholt, wird jede Baumaßnahme typisch 20-mal am Tag genutzt, durch Personen- und Güterzüge. Die Kosten der Infrastruktur pro Zugfahrt werden dadurch sehr gering. Obwohl das Schweizer Bahnnetz vor 1890 als Privatbahnnetz gebaut wurde und damit wesentlich bescheidener ausgeführt wurde als die meisten Deutschen Staatsbahnen zu jener Zeit, ist heute die Belegung der Hauptstrecken fast doppelt so groß als in Deutschland, siehe Bild 20.

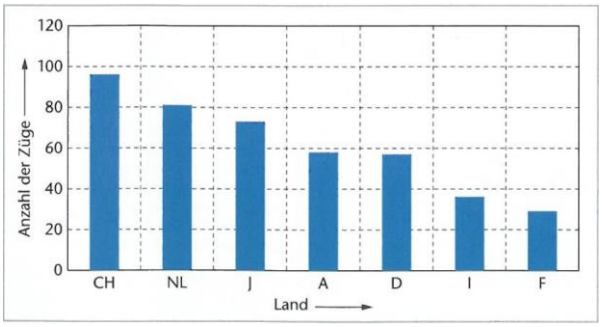


Bild 20
Anzahl Züge auf den Hauptstrecken im Mittel [12],
Reihenfolge Schweiz, Niederlande, Japan, Österreich, Deutschland, Italien, Frankreich

Bis 2025 wird eine weitere Verdichtung des Verkehrs auf bestehenden Hauptstrecken der Schweiz um 60 % geplant. Der gesetzliche Rahmen ist 2012 abgesteckt worden und die nötigen Volksentscheide sind positiv ausgefallen. Das Projekt hat den Namen ZEB: Zukünftige Entwicklung Bahninfrastruktur. Die jährlichen Sachstandsberichte sind unter [13] öffentlich einsehbar.
Der bereits sehr geringe Energieverbrauch soll in der Schweiz um weitere 20% verringert werden.
Die Verdichtung erfolgt insbesondere durch sehr hohe Zuverlässigkeit. Die Pünktlichkeit wird auf die 3 Minuten-Grenze definiert. Das gilt auch für Güterzüge, (In D 30 Min für Güterzüge). Möglich wird das nur durch Anwendung der europäischen Signaltechnik ETCS auf nur 5 neuen Stellwerken für die ganze Schweiz (eines BLS, 4 SBB). Die hohe Zuverlässigkeit ermöglicht dann, die Zeitreserven für die Nutzbremsung zu verwenden. Zudem wird die adaptive Lenkung ADL genutzt, die die Züge nur mittels Nutzbremsung auf die ideale Geschwindigkeit bringt, um Halte im System zu vermeiden. D.h. das automatische Zuglenkungssystem übernimmt die Arbeit des Disponenten, der nie so perfekt das Optimum finden kann wie ein automatisches System. Das ist schneller und zuverlässiger und erhöht auch die Energieeffizienz im Gesamtsystem, ist aber nur mit Komplettausrüstung mit moderner Technik möglich und so in Deutschland nicht kopierbar. Immerhin wird durch das Weichendiagnoseprogramm DIANA erwartet, die Zahl der Weichenstörungen im DB-Netz auf die Hälfte zu reduzieren. http://www.deutsche-bahn.com/de/presse/suche_Medienpakete/10502058/konzernumbau.html
Konkret wird von den SBB und dem BAV (Bundesamt für Verkehr, Bern) zusammen mit der TU München das Konzept verfeinert [14].

Bosch (TU-München) schreibt zu den Ursachen für die Minderung des Energiebedarfs: „Die Ursachen für den aufgrund einer pünktlichen Betriebslage geringen Energiebedarf des Bahnsystems sind mehrschichtig, so insbesondere

- Vermiedene Trassenkonflikte
- Energieeffiziente Fahrweise.

Dominierend ist, dass sich pünktliche Züge gegenseitig weniger beeinflussen. Durch eine pünktlichere Betriebslage verursachen die Züge weniger Trassenkonflikte mit anderen Zügen und der Bahnverkehr wird flüssiger. Trassenkonflikte entstehen, wenn ein verspäteter Zug Blockabschnitte nicht rechtzeitig für folgende Züge frei gibt, sodass für diese zusätzliche, nicht im ursprünglichen Fahrplan vorgesehene, Verzögerungsvorgänge oder Signalhalte, mit sodann anschließenden Beschleunigungsvorgängen, anfallen. Wird der durch einen verspäteten Zug beeinträchtigte Zug über seine Fahrplanreserve hinaus verspätet, entsteht eine sogenannte Sekundärverspätung.“

Bei Pünktlichkeit können die Lokomotivführer-(innen) sanfter und somit energieeffizienter fahren. Bei Verspätungen hingegen müssen die zulässigen Streckengeschwindigkeiten voll ausgenutzt werden, um so bald wie möglich wieder pünktlich zu werden; dazu muss stark beschleunigt und gebremst werden. Bei der stärkeren Bremsung kann aufgrund der kürzeren Dauer des Bremsvorgangs nur entsprechend weniger Energie durch die Rekuperationsbremse rückgespeist werden; dafür wird durch die mechanische Bremse mehr kinetische Energie in Abwärme verwandelt. Dies hat auch die Folge, dass der mechanische Verschleiß an den Bremsen und den Rädern der Güterwagen zunimmt. vernachlässigbar ist der Effekt, dass eine forciertere Beschleunigung höhere Fahrleistungs-, Transformator- und Luftreibungsverluste verursacht.

5.2 Umwegverkehre

Um Wachstum im Schienengüterverkehr zu ermöglichen, muss der Schrumpfungstrend im Wagenladungsverkehr zum Wachstumstrend umgekehrt werden. Der Wagenladungsverkehr ist aus vielerlei Gründen weniger konkurrenzfähig als der Ganzzugsverkehr. Ein wesentlicher Punkt sind die heute praktizierten Umwegverkehre.
Hier ein Beispiel eines Wagens, der von Weil am Rhein nach Friedrichshafen transportiert werden soll, Bild 21. Statt auf dem direkten Weg (Bahnentfernung 185 km, Straßenentfernung wäre mit 191 km hier sogar weiter) wird dieser Transport über die Rangierbahnhöfe

Mannheim und Kornwestheim geleitet und legt so mit 574 km einen 3,1mal so langen Weg als die direkte Verbindung zurück. Der Energievorteil ist dann nicht mehr gegeben und die Fahrgeschwindigkeit kann durch den langen Laufweg und zusätzlich 2 Rangierbahnhofaufenthalte auch nicht mehr konkurrenzfähig sein. Durch solch lange Transportzeiten sinkt auch die Produktivität des Wagens erheblich herab. Diese Routenplanung ist ein mehrparametriges Problem. Die Disposition muss mit modernen Methoden erfolgen, siehe [15]. Auf der Strecke müssen auch Kreuzungs- und Überholungsgleise vorhanden sein. Das Transportaufkommen ist grundsätzlich da, wie am LKW-Verkehr sichtbar ist, aber es muss auch gewonnen werden können, Gleisanschlüsse resp. Verladesysteme müssen akzeptabel vorhanden sein.

Abbildung 2: Routing für die Relation Weil am Rhein–Friedrichshafen[3]

Bild 21

Beispielhafter Umwegverkehr von Weil am Rhein nach Friedrichshafen [15]

Andererseits schränkt die Stauzeit den LKW nur wenig ein. Nach Handelsblatt vom 14.7.15 sind die Staukosten beim LKW nur 35€/h und die Gesamtstaukosten in Deutschland im Reise- und Güterverkehr mit 25 Mia €/a dann doch erheblich http://www.verkehrsrundschau.de/33-milliarden-euro-staukosten-im-jahr-2030-1555305.html.

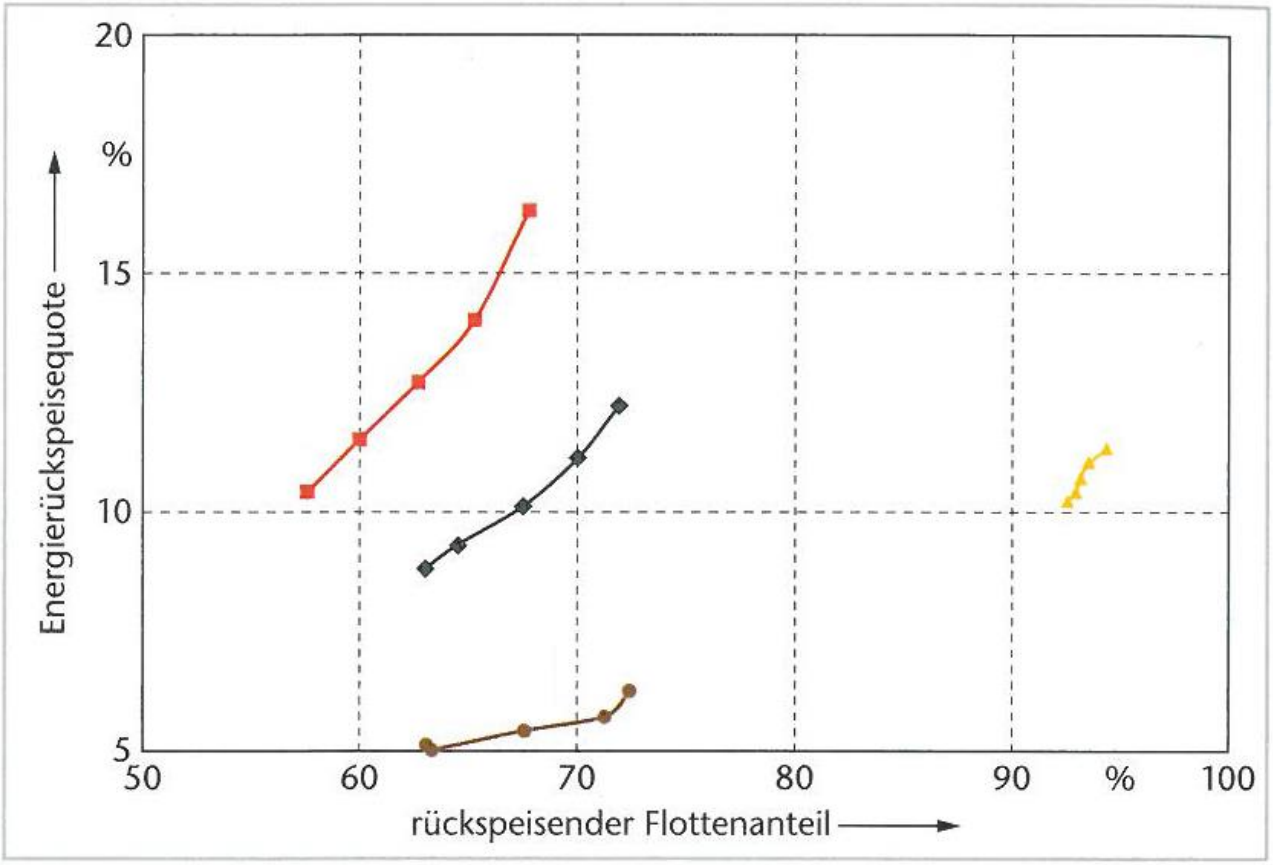
6. Erhöhung der Energieeffizienz des Verkehrsträgers Schiene

6.1 Nutzbremsung

2014 war im Bereich der DB-Netze der Anteil an rückgespeister Bremsenergie (= Rückspeisequote) 14%, der Nettoverbrauch 9,9 TWh (TeraWatt Stunden), der Gesamtbezug somit 11,3 TWh.

Leider sind nur die Daten der DB-EVUs verfügbar. Es ist jedoch eine deutliche Zunahme der Rückspeiseenergie in den letzten Jahren zu erkennen, Bild 22, obwohl die Anzahl der rückspeisefähigen Fahrzeuge im Güter- und Regionalverkehr nur etwa ¾ ist, Bild 23.

Bei den privaten Fahrzeugen ist ein größerer Anteil zu erwarten, da die Flotten neuer sind als bei der DB und bei Umrichterfahrzeugen Rückspeisefähigkeit keine Zusatzkosten verursacht. Die seit ca. 20 Jahren gelieferten Elektrofahrzeuge sind alle rückspeisefähig.



Relation zwischen Flottenanteilen und Rückspeisequoten von 2010 bis 2014.
gelb DB Fernverkehr
rot DB Regio
braun DB Schenker Rail
schwarz DB gesamt

Bild 22

Entwicklung der Rückspeisequoten des DB Verkehrs [16]

Flottenanteile rückspeisefähiger Triebfahrzeuge jeweils am Jahresanfang (*1*) und Rückspeisequoten im Jahresmittel (*2*) der DB-Verkehrsunternehmen in Prozent.
Triebzüge ICE 1 doppelt gezählt, DB Regio mit DC-S-Bahnen

	Fernverkehr		Regio		Schenker		Summe DB	
	1	*2*	*1*	*2*	*1*	*2*	*1*	*2*
2010	92,6	10,2	57,6	10,4	63,1	5,1	63,0	8,8
2011	93,0	10,4	60,0	11,5	63,3	5,0	64,5	9,3
2012	93,2	10,7	62,7	12,7	67,6	5,4	67,5	10,1
2013	93,6	10,8	65,3	4,0	71,3	5,7	70,0	11,1
2014	94,4	11,3	67,8	16,3	72,4	6,2	71,9	12,2
2015	96.1		74.0		74.9		76.7	

Bild 23
DB rückspeisefähige Fahrzeuganteile und Rückspeisequoten [16]

Ein Ansatz dabei ist die verstärkte Nutzung der elektrodynamischen Bremse der Triebfahrzeuge anstelle der Druckluftbremse für Geschwindigkeitsreduktionen, Gefälle- und Anhaltebremsungen. Die Erhöhung der elektrischen Bremskraft kann jedoch nicht ohne Betrachtung weiterer Systemparameter erfolgen. So spielen vor allem bei Güterzügen die durch Bremsvorgänge entstehenden Längsdruckkräfte eine sicherheitskritische Rolle, da über die Pufferreibung Längsdruckkräfte stets mit Querkräften verbunden sind. Verschiedene Möglichkeiten des verstärkten Einsatzes der elektrodynamischen Bremse und deren Auswirkungen auf die Zuglängsdynamik kann heute mit Hilfe der Mehrkörpersimulation gefahrlos und mit sehr wenig Aufwand untersucht werden. Das Ergebnis der Arbeit ist, dass die Höhe der elektrischen Bremskraft bei einer Einfachtraktion vorne am Zug auch unter Berücksichtigung der Vorgänge der pneumatischen Bremse die Höhe des maximalen Längsdruckkraftniveaus im Zug definiert. Die Parameter pneumatische Bremsaufbauzeit, Zuglänge und Längsneigung haben nur einen untergeordneten Einfluss. Die Parameter Kupplungsspiel und Beladungszustand hingegen haben einen deutlicheren Einfluss. Großes Potential wurde bei der Verwendung von verteilter Traktion identifiziert. Die Arbeit zeigt hier, dass die insgesamt wirkende elektrische Bremskraft bei verteilter Traktion mit zwei Triebfahrzeugen auf bis zu 480 kN erhöht werden könnte, ohne dass es zu einer Überschreitung der für vierachsige Wagen kritischen Längsdruckkraft von 240 kN käme Bild 24.

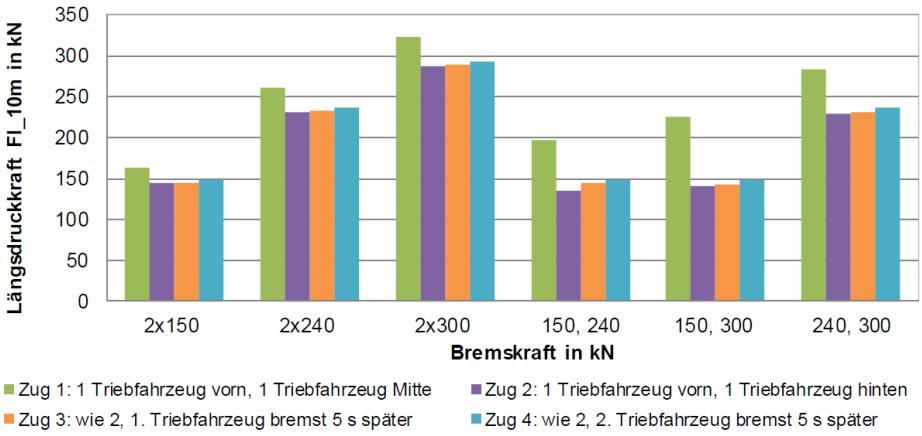


Bild 24
Sich einstellende Längsdruckkräfte für einen Zugverband mit zwei Triebfahrzeugen und 39 Wagen in Abhängigkeit der elektrodynamischen Bremskraft der Triebfahrzeuge [18]

Um die Potentiale der Nutzbremsung und des Streckenausbaus zur Vermeidung von Langsamfahrstellen, sei es durch schlechte Gleise, Kunstbauten oder enge Bogenradien, im Güterverkehr aufzuzeigen, wird eine einfache Fahrzeit- und Energieverbrauchssimulation durchgeführt. Von folgendem Grundfall wird für einen eher schweren Zug, der von einer neueren DB Umrichter Lokomotive, Br 145 über eine Fahrstrecke von 100 km gezogen wird, Fahrzeit und Energieverbrauch berechnet [erstmals veröffentlicht Europ. Schienengipfel, Wien 11.11.2013]

Daten Grundfall:

- Lokgewicht = 82 t
- Gesamtmasse des Zugverbandes = 2000t
- Anfahrzugkraft = 300 kN
- Leistung der Lok = 5600 kW
- Nutzbremskraft = 150kN
- Widerstandsberechnung nach Strahl $f=1‰+2‰\ (V+10/100)^2$

Fall 1 ist der Grundfall ohne Zwischenhalt. Der Zug wird mit voller Zugkraft und Leistung auf 100 km/h beschleunigt und im Vorsignalabstand mit Sicherheit auf 800 m zum Stillstand gebracht. Fall 1 stellt gewissermaßen den Normalfall heute dar, mit Druckluftbremse als Betriebsbremse und schwacher Unterstützung durch die Nutzbremse. Im Fall 2 wird

noch ein weiterer Zwischenhalt, z.B. für eine Zugsüberholung, und 4 Langsamfahrstellen mit Verringerung auf 70 km/h, sei es aufgrund der Trassierung oder schlechtem Gleiszustand, zugefügt.

Bild 25 zeigt den Geschwindigkeits-Wegverlauf für alle teils nachfolgend erläuterten Fälle an.

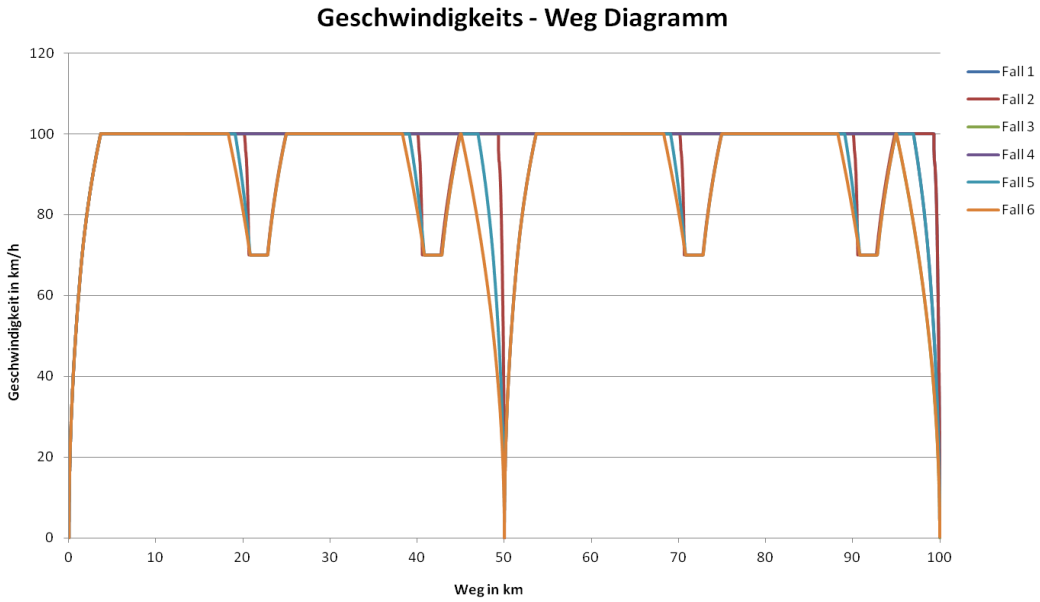


Bild 25
Geschwindigkeits-Wegverlauf für den Mustergüterzug und die 6 Fälle

Konkret gilt für Fall 2

1. Beschleunigung auf V=100 km/h und Beharrung bis s=20 km
2. Bremsen auf V=70 km/h (innerhalb von 800 m)
3. Beharrung bei V=70 km/h über 2 km
4. Beschleunigung auf V=100 km/h und Beharrung bis s=40 km
5. Bremsen auf V=70 km/h (innerhalb von 800 m)
6. Beharrung über 2 km
7. Beschleunigung auf V=100 km/h und Beharrung bis s=44.2 km
8. Bremsen bis zum Stillstand innerhalb von 800 m

Bild 26 zeigt den Energieverbrauch über der Zeit. Sehr gut ist die rückgespeiste Energiemenge bei den jeweiligen Bremssituationen zu erkennen.

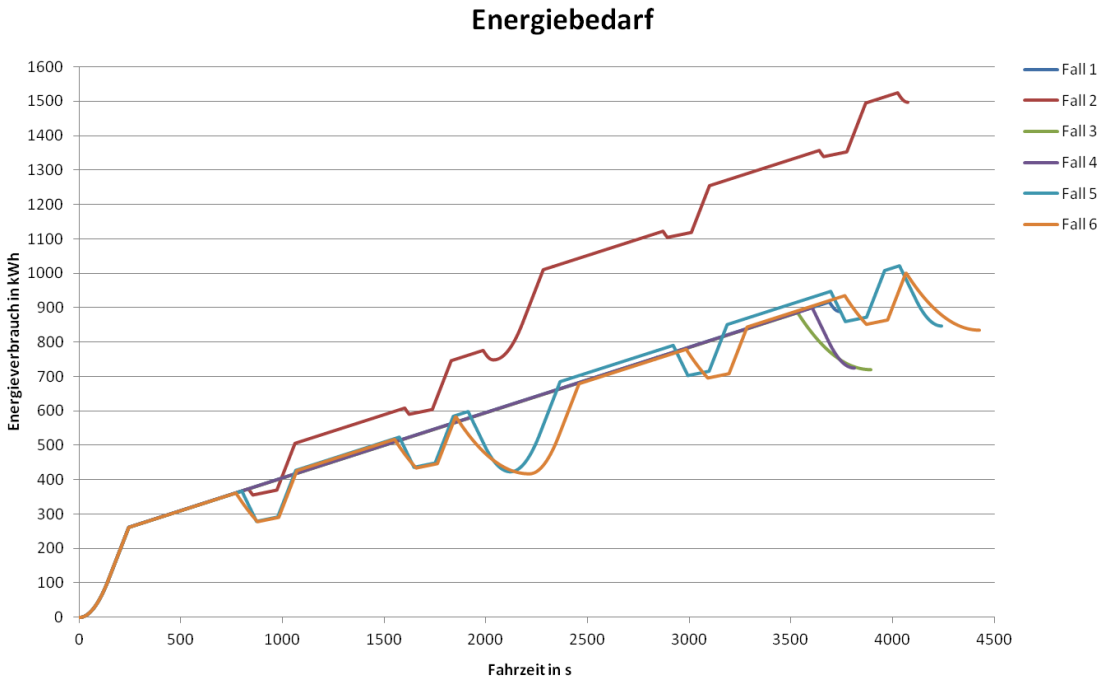


Bild 26
Energiebedarf über der Zeit für den Mustergüterzug über die 6 aufgeführten Fälle

Fallnummer	Fahrzeit	Fahrzeitverlängerung	Energiebedarf	Energiedifferenz
1	3738 s	+ 0.00 %	888 kWh	+ 0.00 %
2	4075 s	+ 9.02 %	1500 kWh	+ 68.90 %
3	3894 s	+ 4.17 %	720kWh	- 18.90 %
4	3811 s	+ 1.95 %	724 kWh	- 18.49 %
5	4239 s	+ 13.4 %	847 kWh	- 4.62 %
6	4428 s	+ 18.46 %	835 kWh	- 5.97 %

Bild 27
Ergebnisdarstellung Fahrzeit- und Energieverbrauch für einen Mustergüterzug über 100 km Distanz für verschiedene Fälle

Fall 2 zeigt, dass Langsamfahrstellen, aufgrund von Trassierung oder schlechtem Gleiszustand, zu großen Verzögerungen führen. Die langsame Geschwindigkeit muss ja nicht nur über die Länge der Ursache (Trassierung oder Gleisprobleme), sondern auch 2-mal die Zuglänge + Sicherheit eingehalten werden, also typisch 1,5 bis 2 km länger. Zudem führen Zwischenhalte zu sehr viel höherem Energieverbrauch, hier + 68,9 %, bei 9,02 % längerer Fahrzeit.
In Fall 4 wird wie in Fall 3 elektrisch gebremst, aber mit der gleichen Bremskraft wie die Zugkraft ist. Die Fahrzeit verlängert sich dadurch nur um 1,95 %, aber der Energiegewinn bleibt gegenüber Fall 2 mit 18,49% nahezu gleich.

Der Fall 5 umfasst die Geschwindigkeitseinbrüche incl. Zwischenhalt wie Fall 2, aber die Bremsung erfolgt allein mit 300 kN elektrisch rekuperativ. In diesem Fall wird die Fahrzeit um 13,4% verlängert und dennoch gegenüber dem Grundfall 4,62% der Energie eingespart.
Fall 6 umfasst die Geschwindigkeitseinbrüche incl. Zwischenhalt wie Fall 2, aber die Bremsung erfolgt allein mit 150 kN elektrisch rekuperativ, also entsprechend der heutigen Situation. Die Fahrzeit wird noch viel länger, +18,46 s und dennoch wird Energie eingespart, nämlich 5,97 %.
Allerdings sind die Fälle 5 und 6 betrieblich kaum praktikabel, wegen der stark vergrößerten Fahrzeit.
In Fall 6 ist der Energieverbrauch im Vergleich zu Fall 1 um 4,62 % sogar noch verringert, aber die Fahrtzeit um 14,6 % unakzeptabel verlängert.

6.2 Hybridlokomotiven

Durch hohe Elektrifizierungsdichte in Europa berühren fast alle Zugläufe elektrifizierte Linien. Umspannen zwischen Diesel- und Elektrotraktion ist sehr teuer, braucht beim Umspannen zwei Loktypen je Zug. Stilllager sind unvermeidbar. Deshalb fahren viele Dieselloks und Dieseltriebwagen energieineffizient unter Fahrdraht.
Ein positives Gegenbeispiel ist die in Bild 28 abgebildete Hybridlok, bestellt 2013 durch das Leasingunternehmen Direct Rail Service DRS in 10 Exemplaren, erwartete Zulassung 2016. Dadurch, dass der Transformator für 50 Hz System fast 60% leichter ist als für 16,7 Hz und die Achslast in GB 25,5 t statt 22,5 t beträgt, sind in GB leicht günstigere Bedingungen für Hybridloks gegeben als in D, trotz des kleineren Lichtraumprofils.
http://www.railcolor.net/index.php?nav=1000006&file=vl_88001_52&action=image

Foto: Q. Vosman

Bi-Mode-Lok für UK In der KW 15 ist im VUZ Velim die erste Zweikraftlok der Reihe 88 eingetroffen. Im September 2013 hat die Beacon Rail Leasing zehn Loks Class 88 bei Vossloh in Valencia bestellt, die an die Direct Rail Services (DRS) vermietet werden. Die Loks können über 25 kV unter Oberleitung fahren (Leistung 4 W) oder mit Diesel (Leistung 700 kW). Die Class 88 basiert in weiten Teilen (Wagenkasten, Frontends, Drehgestelle, Bremsen, Antriebssteuerung) auf der Class 68 (UKlight). RB 25.4.16 (cm)

Quelle: Rail Business (Eurailpress) Ausgabe 17/16, S. 5

Bild 28

Hybridlok für Diesel und 50 Hz 25 kV Fahrleitungsbetrieb in Großbritannien, 25,5 t Achslast, 317 kN Anfahrzugkraft in beiden Moden, 700 kW Dieselleistung, 4 MW elektrisch unter Fahrdraht, max. 160 km/h für Brief- und Paketpostverkehr, Lieferant Stadler Spanien, geschleppt zur Zulassung 13.4.2016

In Deutschland vertreibt Alstom die dreiachsige Hybridlokomotive H3, Bild 29, angetrieben mit 350 kW Dieselmotor, Batterie und insgesamt 700 kW Antriebsleistung.
Bisher sind ca. 15 Stück verkauft. Es wird mit bis zu 50 % weniger Energieverbrauch als bei einer reinen Diesellok geworben. http://www.alstom.com/products-services/product-catalogue/rail-systems/trains/products/h3-locomotive/, obwohl die Lok aus Gründen der vereinfachten Zulassung keine generatorische Bremse hat. Der verringerte Energieverbrauch soll sich aus Vermeiden von Leerlauf des Dieselmotors durch Abschalten und dann Batteriebetrieb und verringertem Rollwiderstand durch radialeinstellende Achsen ergeben. Die Lok wird bisher nur in Werksbahnhöfen durch Industrieunternehmen verwendet, z.B. Audi. Wegen der geringen Leistung ist die Streckenfahrt bereits bei Loküberführungen allein schwierig.

Eine Hybridlok der SBB, Eem 923 mit 1,5 MW elektrischer Leistung, 290 kW Dieselleistung, 150 kN Anfahrzugkraft in beiden Betriebsmoden, Höchstgeschwindigkeit 120 km/h ist in 30 Stück erfolgreich im Betrieb, Bild 30. Sie ersetzt vierachsige Diesellokomotiven mit gleicher Leistung und reduziert den CO_2-Ausstoß um 92% gegenüber dem Diesellokbetrieb. Der Einsatz dieser Betriebsform setzt allerdings elektrifizierte Hauptstrecken voraus, da der Dieselantrieb für Streckenfahrt zu wenig Leistung hat und die Rückspeisung der Bremsenergie auch eine Fahrleitung benötigt. Unterstützt wird der Einsatz kurzer Züge durch ein gewichtsabhängiges Trassenpreissystem, sodass sich die anteilmäßigen Mehrkosten für kurze Züge je t in Grenzen halten. Das ist umso erstaunlicher, da die Zugdichte auf Schweizer Hauptstrecken sehr viel größer als auf deutschen Hauptstrecken ist, siehe Kapitel 4.

Bild 29
Hybridlok Batterie, Diesel-Elektro von Alstom für verschiedene Industrieunternehmen. [Foto Alstom]

Bild 30
SBB Hybridlok Eem 923, Elektrisch 15kV 16,7 Hz, 25 kV 50Hz über Stromabnehmer und Diesel für Streckenzustelldienste, Vmax 120 km/h [17]

Ebenfalls mit der Thematik der Energieeffizienzsteigerung verbunden ist das europäische Forschungsprojekt Swiftly Green. In diesem wurden verschiedenste Ansätze zur Erhöhung der Energieeffizienz und damit auch der Verringerung der Treibhausgasemissionen der Verkehrsträger auf europäischen Korridoren untersucht. Am Fachgebiet Schienenfahrzeuge wurde dabei unter anderem gerechnet, welche Möglichkeiten eine Hybridlok bietet, die den 538 km langen Hauptlauf eines Güterzuges mit elektrischer Traktion mit 7 MW Antriebsleistung bewältigt und für kürzere nicht-elektrifizierte Strecken über einen leistungsstarken Dieselmotor mit 2 MW Antriebsleistung verfügt. Heute werden Zugläufe bei denen am Anfang oder Ende keine Fahrleitung zur Verfügung steht, häufig komplett mit einer Diesellok gefahren, weil das Vorhalten und Umspannen von mindestens zwei Loks unwirtschaftlich ist. Die genannte Hybridlok ist in der Lage, den spezifischen CO_2-Ausstoß auf der exemplarisch betrachteten Relation Röderau - Nüttermoor signifikant zu reduzieren Bild 31. Dies gilt auch dann, wenn der derzeitige Energiemix im Bahnstromnetz berücksichtigt wird. Im Falle ausschließlich grüner Energie im Bahnstromnetz sinkt der spezifische CO_2-Ausstoß auf etwa ein Vierzigstel des Wertes einer modernen diesel-hydraulischen Lok. Dass eine Hybridlok auch wirtschaftliche Vorteile bietet, zeigt Bild 32.

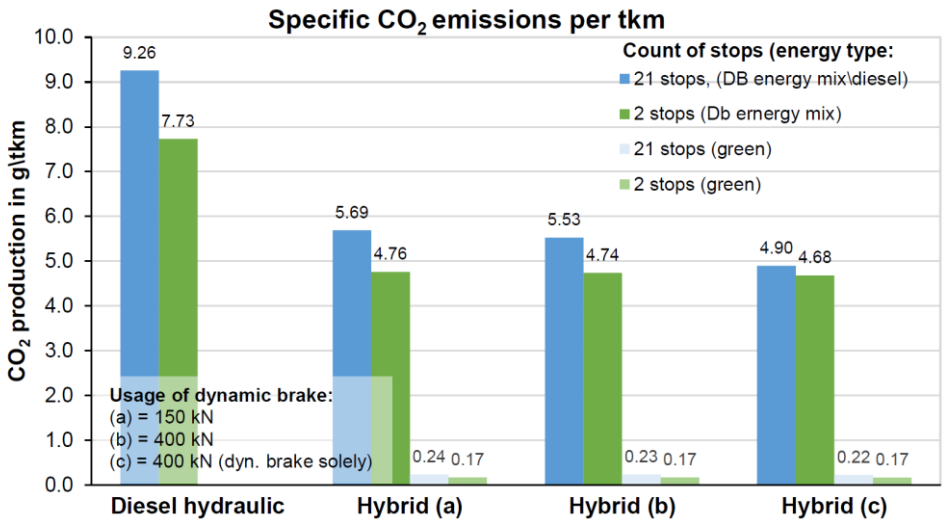


Bild 31

Spezifische CO_2-Emissionen auf der Relation Röderau - Nüttermoor einer dieselhydraulischen Lok und einer Hybridlok in Abhängigkeit der Anzahl der Halte und der elektrodynamischen Bremskraft [19]

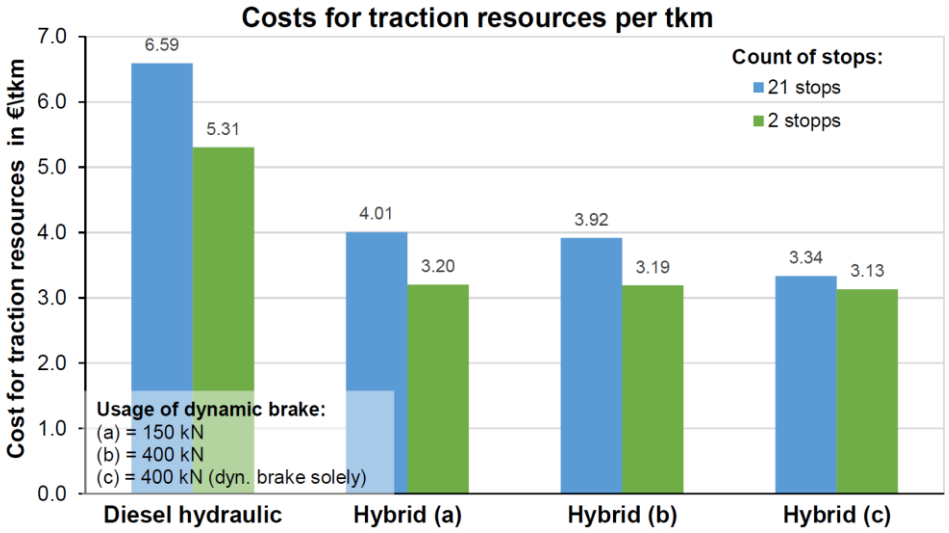


Bild 32

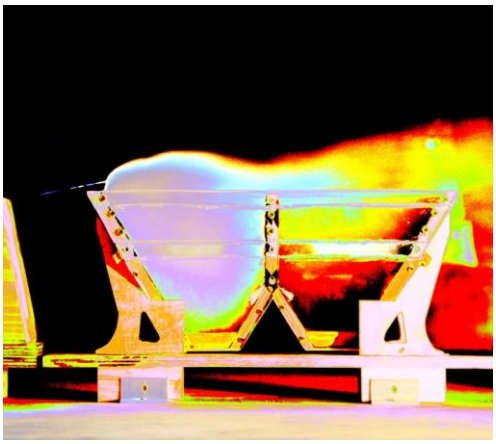
Spezifische Traktionskosten auf der Relation Röderau - Nüttermoor einer dieselhydraulischen Lok und einer Hybridlok in Abhängigkeit der Anzahl der Halte und der elektrodynamischen Bremskraft [19]

Den heutigen Stand der Fahrdrahthybridlokentwicklung für Europa zeigt Bild 33.

Bild 33
Hybridlok EURODual [Stadler Valencia 2016]

6.3 Aerodynamische Optimierung der Wagen

Güterwagen sind oftmals aerodynamisch sehr ungünstig ausgeführt, obwohl sie mindestens 100 km/h schnell fahren können, in Sonderfällen sogar 120 km/h. Bereits Lokführer erkennen, dass leere Wagen oftmals fast gleichen Fahrwiderstand haben wie volle und damit gleich viel Energieverbrauch verursachen, obwohl sie typisch nur 20 bis 25% des beladenen Wagens wiegen. Hier zwei Beispiele:
In Schüttgutwagen bilden sich große Wirbel aus, Bild 34 links, die erheblichen Luftwiderstand verursachen. Bei hohen Geschwindigkeiten kann das vermieden werden durch ein fest installiertes Abdecklochgitter, das kleine Wirbel erzeugt, Bild 34 rechts. Der Gesamtfahrwiderstand und damit der Energieverbrauch verringern sich so um mindestens 20% [20]. Das ist dieselbe Methode, wie sie beim LKW angewendet wurde, Bild 11 oben, nur nutzbringender, aber die Umsetzung steht noch aus.



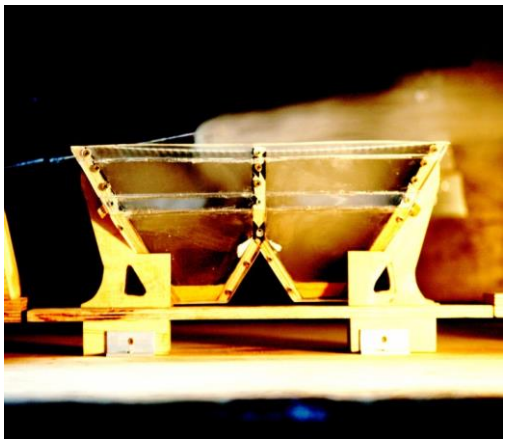


Bild 34

Strömungsvisualisierung mittels Rauchlanze am offenen Schüttgutwagenmodell (links): ein großer Wirbel entsteht und dadurch auch großer Fahrwiderstand, am Modell mit Abdeckgitter auf der Öffnung (rechts): ganz viele ganz kleine Wirbel entstehen und dadurch auch kleiner Fahrwiderstand

Bild 35

Rundholztransporter links Roos von DB Schenker mit geschlossener Stirnwand, rechts VR-Transpoint Typ Snpss mit strömungsgünstiger Stirnwand (Finnland)

Bei Containertragwagen ist das Problem der Luftwirbel ähnlich wie beim Holztransporter oder beim Schüttgutwagen, insbesondere wenn einzelne Positionen unbesetzt sind. Hierfür steht eine Lösung aus.

6.4 Radialeinstellende Fahrwerke

Ein weiteres Thema ist der Fahrwiderstand im Bogen, Bild 36, Fahrtrichtung im Bild nach rechts

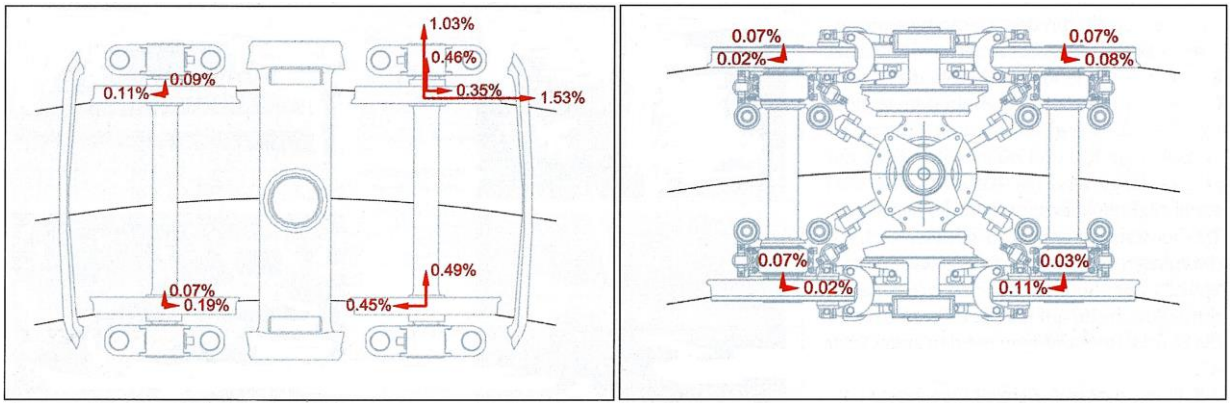


Bild 36
Schlüpfe bei Fahrt im 300 m Bogen, 90 t Kesselwagen, links das starrachsige Y25 Drehgestell, rechts das radialeinstellende LEILA Drehgestell. [21]

Bild 36 links zeigt die Fahrt durch einen engen Bogen mit einem konventionellen Y 25 Drehgestell. Das vorlaufende bogenäussere Rad hat zwei Berührpunkte mit großen Quer- und Längsschlüpfen. Die nachlaufende Achse ist unkritisch. Bei radialleinstellenden Achsen sind alle 4 Räder unkritisch, Bild 36 rechts [21]. Die Energieeinsparung beträgt bis zu 25 % auf kurvenreichen Strecken. Allerdings ist das LEILA Drehgestell wegen Beendigung der Firmentätigkeit des Herstellers nicht am Markt erhältlich.

Heute am Markt erhältlich und im Einsatz ist das DRRS 25 LD von Waggonbau Niesky, siehe Bild 37.
Außer dem Fahrwiderstand verringern sich der Lärm im Bogen und auch der Verschleiß von Rad und Schiene. Leider spielt in Deutschland der Schienenverschleiß bei den Trassenpreisen nur eine geringe Rolle. Da wegen der Lärmabhängigkeitskomponente sowieso die Achsenanzahl neu berücksichtigt werden muss, kann dies auch den Verschleißeinfluss einfließen und so die Energieeffizienz indirekt gefördert werden.
In Deutschland basiert der Trassenpreis bisher im westlichen auf der Zuggattung, egal wie der Zug zusammengesetzt ist. Das gibt Anreize, die bezüglich Energieeffizienz eher ungünstig sind. So wollen die Güterverkehrsunternehmen lange Züge einsetzen, um Trassenpreis/Wagen zu sparen, allerdings wird dann die Fahrzeit für den Regionalverkehr

verlängert und dessen Energieverbrauch vergrößert durch ungünstigen Ausbau der Unterwegsbahnhöfe durch lange Überholgleise.

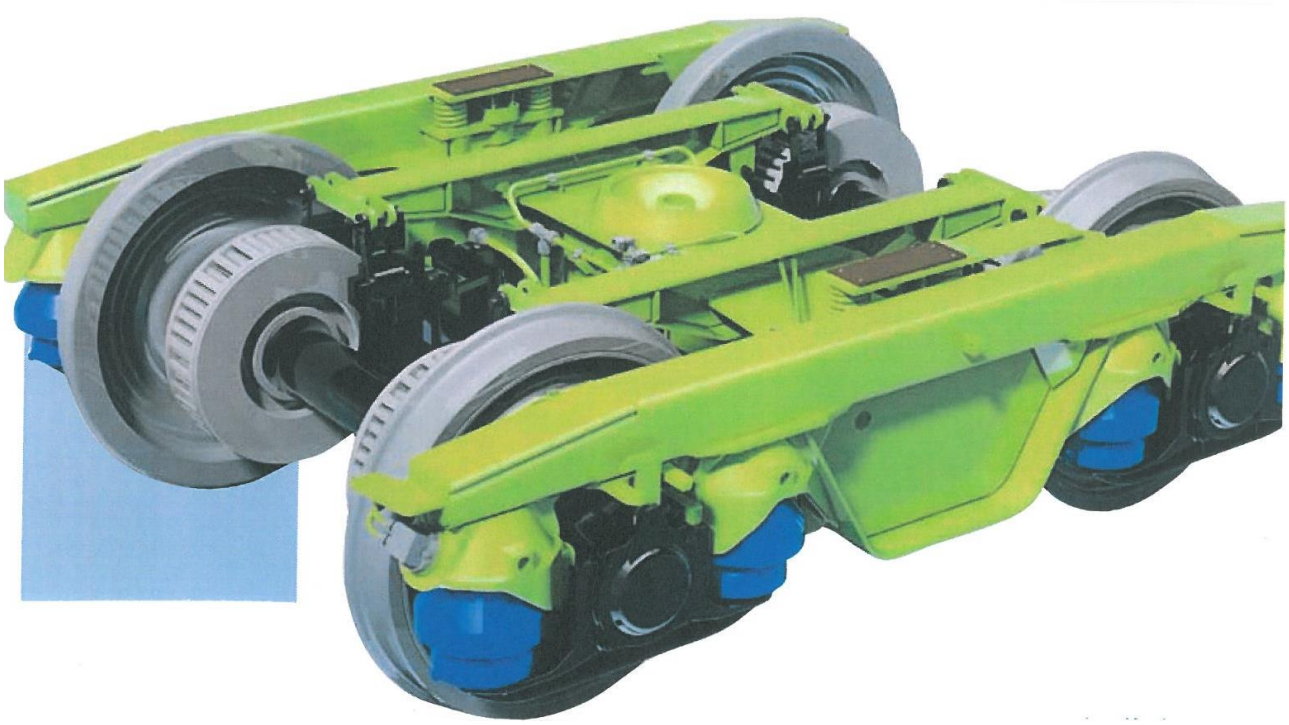


Bild 37
Radialeinstellendes Güterwagendrehgestell DRRS 25 LD

6.5 Leichtbau

Leichtbau spielt im Schienenverkehr für Energieeinsparung wegen der Nutzbremsung eine wesentlich geringere Rolle als bei den anderen Verkehrsarten, darf aber dennoch nicht völlig vernachlässigt werden.

Beispielsweise ist seit über 10 Jahren im Güterwagenbau möglich, die ohne bleibende Verformung ertragbare Längskraft von 2000 kN auf 1200 kN zu reduzieren [22], wodurch je Wagen bis zu 4 t einsparbar sind. Das hat nach Recherche des Autors bisher noch niemand genutzt. Bei Triebfahrzeugen führt eine leichtere Struktur des Wagenkastens und der Drehgestelle auch zu einer Gewichtsverringerung bei der Antriebsanlage, da diese nun auch leichter ausgeführt werden kann. Ein Beispiel ist die Nutzung von innengelagerten Radsätzen bei den Laufdrehgestellen des ICx [23].

7. Innovationspotentiale bei der Infrastruktur

7.1 Einfluss der Signaltechnik

Das Simulationsbeispiel in Kapitel 6.1 zeigt, dass die Bremswege bei regenerativer Bremsung gegenüber Einsatz der Druckluftbremse verlängert werden. Das heutige Signalsystem setzt intensiven Einsatz der Druckluftbremse voraus.
Für Energieeffizienzsteigerung braucht es ein neues Signalsystem und Zugsicherungssystem. Glücklicherweise ist das neue Europäische Signalsystem dazu geeignet, zu dem sich die Bundesregierung sowieso verpflichtet hat, nämlich ETCS Level 2.
Weiteres Nutzen des bisherigen Systems (PZB 90) lässt die Berücksichtigung des Energieaspektes nur unvollständig zu. Die häufig in D geäußerte Aussage, ETCS level 2 bringe keinen Zusatznutzen zu PZB 90 gilt nicht für die Energieeffizienz.

7.2 Zugsteuerungssysteme

Ein zentrales Thema der Energieeinsparung und der Kapazitätsvergrößerung vorhandener Strecken ist die Vermeidung von ungeplanten Signalhalten auf der Strecke.
Das Forschungsprojekt „Free Float“ [24] beschäftigte sich mit der Verbesserung der Zugfahrten in Deutschland unter der Maßgabe möglichst geringer Veränderungen. Ein Benchmarking mit den SBB erfolgte, wurde aber nicht weitergeführt, da in der Schweiz die komplette Signaltechnik erneuert und dabei ein Zuglenkungssystem eingeführt wird, das auf dieser neuen Signaltechnik basiert.
Die Ergebnisse von „Free Float“ sind sehr kleinteilig und halfen vor allem den Beteiligten, eine verbesserte Übersicht über die vielfältige Systemlandschaft in Deutschland zu erhalten. Zudem wurden diverse Betriebssteuerungssysteme und Simulationssysteme weiterentwickelt. Wirklich messbare Ergebnisse sind jedoch schwer zu fassen, aber die Thematik wird weiter bearbeitet, siehe Bild 38.

In der Schweiz wird aufgrund der neuen Stellwerkstechnik ADL (Adaptive Lenkung) eingeführt. Alle Züge werden so beeinflusst, dass sie durch Nutzbremsung oder maximale Fahrgeschwindigkeitsausnutzung so fahren, dass sie andere Züge möglichst wenig behindern und so zu maximaler Streckenleistungsfähigkeit führen. Zudem wird der Energieverbrauch minimiert, siehe auch Kapitel 6.1.

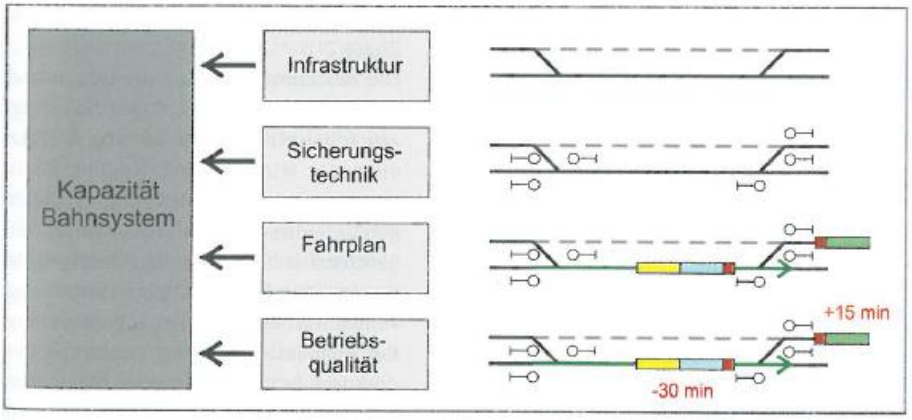


Bild 38
Einflussgrößen auf die Kapazität eines Bahnsystems, Programm RailSys [25]

Maßnahme:
Einführung eines leistungsfähigen Zugsteuerungssystems auf zeitgemäßer Basis

8 Elektrifzierungseinfluß einschließlich Verwendung grünen Stroms

Bremsenergierückgewinnung kann, wie in Kapitel 6.1 erklärt, effizient nur in den Fahrdraht erfolgen, so dass nicht nur die höhere Energieeffizienz des elektrischen Antriebs an sich sondern auch die Rückgewinnung eines Teils der aufgewendeten Energie bei der Bremsung für die verstärkte Elektrifizierung der zur Zeit mit Diesel betriebenen Strecken spricht. In Gleichstromländern erfolgt die Elektrifizierung von Neustrecken mit 25 kV 50 Hz Wechselstrom. Das ist hinsichtlich der Investitionen und des Energieverbrauchs das mit Abstand günstigste Stromsystem. In Deutschland wird am 16,7 Hz System festgehalten, obwohl heute bereits über 54% des 16,7 Hz Bahnstromes aus 50 Hz umgeformt werden, siehe DB Daten&Fakten 2014 [26]. Es werden heute (seit ca. 40 Jahren) aus Kostengründen keine 16,7 Hz Bahnstromgeneratoren mehr gebaut. Auch die Erneuerung von Bahnwasserkraftwerken führt zum Umbau von 16,7 Hz Generatoren zu 50 Hz Generatoren, z.B. Kraftwerk Kammerl in Bayern [27].

Die Umwandlung von 50 Hz in 16,7 Hz erfolgt heute fast ausschließlich mit leistungselektronischen Umrichtern, die bei Volllast einen sehr guten Wirkungsgrad mit 95% haben. Bei Teillast, was der Normalbetrieb ist, ist aber der Wirkungsgrad sehr viel schlechter [28].

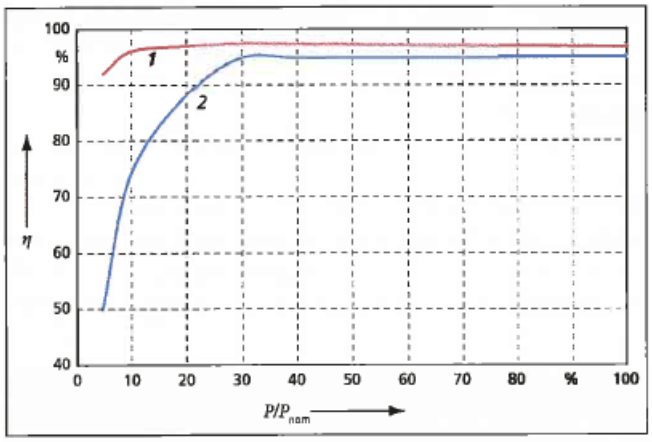


Bild 8: Wirkungsgrade von Halbleiterumrichtern (*1*, nach Herstellerdaten) und von Maschinenumformern (*2*, nach SBB-Messungen) einschließlich beiderseitiger Blockumspanner.

Bild 39
Wirkungsgrade von Umrichtern 50 Hz in 16,7 Hz Strom [28]

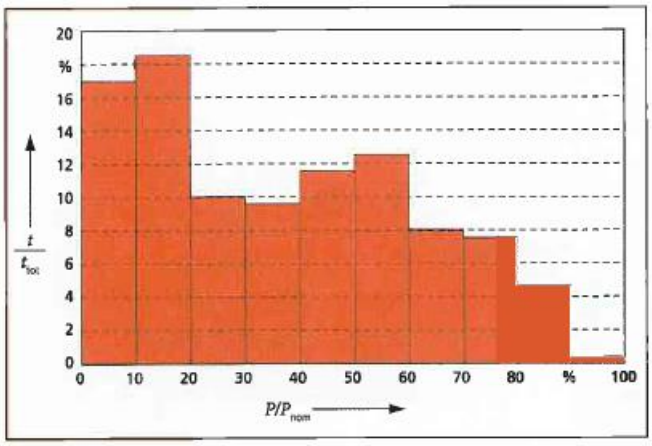


Bild 9: Anteilige Betriebszeiten (Summe 100 %) in Lastbereichen (Basis Stundenmittelwerte) aller SBB-Umformer und -Umrichter in den Betriebsjahren 2007 und 2008, noch ohne Umformer und Umrichter Wimmis.

Bild 40
Sehr schwache Teillast als häufigster Betriebsbereich für Umrichter [28]

Leider wurden nur Daten von den Schweizer Umrichtern gefunden, Bilder 39 und 40. Es ist aber anzunehmen, dass in D die Situation ganz ähnlich ist. Es zeigt sich, dass die Umrichter vor allem im Bereich bis 20% der Nennlast, also im Bereich schlechten Wirkungsgrades betrieben werden.

Die Vermutung liegt nahe, dass bis zu 1 TWh/a Umformer Verluste in D zu veranschlagen sind, mit steigender Tendenz. Das sollte genauer geprüft werden. Wenn die Energieversorgung auf grünen Strom umgestellt wird, werden die Umrichter-Anteile noch zunehmen, da aller grüner Strom aus Wind- und Solarkraft und zunehmend auch aus Wasserkraft zunächst als 50 Hz-Strom erzeugt wird.
Bei DB Energie liegen die erneuerbaren Energien im März 2015 bei einem Anteil von 39,6%. DB-Energie plant 100% erst für 2050, siehe [29].
Es ist aus Sicht des Autors jedoch unrealistisch, das so lange hinauszuschieben.

Es sollte deshalb ernsthaft erwogen werden, dass Neuelektrifizierungen nicht mehr mit 16,7 Hz erfolgen, sondern wie in anderen Europäischen Ländern auch mit 50 Hz. Neben der wesentlich höheren Energieeffizienz ergeben sich weitere Vorteile:
Es braucht keine weiteren Fernleitungen, da die 110 kV 16,7 Hz Leitungsebene wegfällt, mit den ganzen Akzeptanzproblemen, die sich bei 110 kV 16,7 Hz Leitungen ergeben. Die Unterwerke können dann direkt aus dem Landesnetz versorgt werden. Es kann Strom aus einem größeren Angebot als mit 16,7 Hz eingekauft werden. Vorbild kann die einzige Deutsche 50 Hz-Strecke, die Rübelandbahn von Blankenburg nach Kalkwerk Hornberg im Harz sein, auf der heute vor allem Güterschwerlastverkehr mit Kalkzügen fährt.
Auch die Investitionskosten sind wesentlich geringer, sowohl für Wegfall der 110 kV-Leitung, billigerer Unterwerke und sogar Fahrleitungen. Rückfragen bei Lieferanten lassen Minderkosten für Unterwerke und Fahrleitungen von 10% erwarten.
Neue 16,7 Hz- Fahrzeuge können stets auch mit 50 Hz betrieben werden und kosten nicht mehr, Aussage Siemens, Bombardier. Alte 16,7 Hz Fahrzeuge können nicht automatisch uneingeschränkt mit 50 Hz betrieben werden. Aber das ist auch nicht das Thema. Es geht nicht um Umelektrifizierung vorhandener Strecken, sondern um die kostengünstige und energieeffiziente Neuelektrifizierung von bisher mit Diesel betriebenen Strecken.
Der Elektrifizierungsgrad in Deutschland ist mit 58,8 % der Linienlänge der geringste aller 16,7 Hz-Länder. In Österreich liegt er bei 68,0 %, in Schweden bei 71,4 %, in der Schweiz bei 99,3 % und in Norwegen bei 63% [Allianz pro Schiene] und das obwohl die Siedlungsdichte in D wesentlich größer als in Norwegen und Schweden ist.
Die geringe Elektrifizierung in Deutschland wundert umso mehr, wenn die Netzlänge auf die Einwohnerzahl bezogen wird. Deutschland hat deutlich die geringste elektrifizierte Netzlänge je Einwohner D: 41300km/80,9 Mio. E = $5{,}1*10^{-4}$ km/E. Die Schweiz folgt mit

Ch: 5251km/ 8,2 Mio. E = $6,4*10^{-4}$ km/E. Dagegen ist bereits Norwegen noch besser ausgestattet mit 4087km/5,1 Mio. E = $8*10^{-4}$ km/E und Schweden mit 13000km/9,7 Mio. E = $13*10^{-4}$ km/E. Österreich erreicht mit 9740km/8,5 Mio. E = $9,7*10^{-4}$ km/E ebenfalls sehr hohe Werte.
Das erklärt, warum der Elektrifizierungsdruck in allen anderen 16,7 Hz Ländern geringer ist als in D. Aus ökologischen Gründen ist eine weitere Elektrifizierung in Deutschland dringend geboten.

8.1 Rangierbahnhofnutzung

Im Wagenladungsverkehr werden heute oft große Umwege gefahren, da es nur noch wenige große Rangierbahnhöfe gibt, die, da sie sehr leistungsfähig sind, stark ausgelastet werden sollen. So stellt Bruckmann, in [15], beispielhaft einen Güterwagen vor, der von Weil am Rhein nach Ravensburg über die Rangierbahnhöfe Mannheim und Kornwestheim über 574 km transportiert wird, statt über den direkten Schienenweg mit 185 km, also 3,1-mal so viel, siehe Kapitel 5.2.
Die Lösung dazu ist, neue Rangiertechnik mit Wagen mit einer Laufzielbremsung zur Nutzung kleiner Rangierbahnhöfe auszustatten [30]. Es werden dann nicht mehr die aufwendigen Gleisbremsen und Beidrückanlagen der großen Bahnhöfe benötigt, um effizient rangieren zu können.

8.2 Weichenheizung durch Geothermie

Um Zufrieren von Weichen im Winter zu vermeiden wird heute fast ausschließlich mit Frischstrom geheizt. Je nach Witterung geht hierbei sehr viel Energie verloren.
http://www.bine.info/publikationen/publikation/weichenheizung-mit-erdwaerme/
In Deutschland sind allein bei DB-Netz 64000 Weichen ausgerüstet mit einer installierten Gesamtleistung von 900 MW. Tatsächlich verbraucht werden nach obiger Quelle 230 GWh jährlich. Aber der Wert muss je nach Witterung stark streuen. Geothermische Weichen- und Bahnsteigheizung haben ein großes Potential, jedoch hohe Investitionskosten, aber nur kleine Betriebskosten.

9 Zielvorschlag der Studie

Als Zeithorizont für die Umsetzung wird 2030 angesetzt, aufgespalten in 5 Jahre Planung und 10 Jahre Realisierung.

Bezüglich der Energieeffizienzsteigerung wird eine Reduktion des spezifischen Gesamtenergieverbrauchs ausgehend von 2014 im Güterverkehr je tkm um 30 % als erreichbares Ziel vorgesehen.

Im SGV wird die Verdreifachung des Umsatzanteils, von ca. 2% auf ca. 6% als Zielgröße vorgegeben. Die tkm sind wegen des Güterstruktureffektes, Rückgang Massengut und dem starken Zuwachs leichter Produkte, ein für die Zukunft weniger geeignetes Maß, wie in Kapitel 3 ausgeführt. Deshalb wird nur von einer Verdoppelung der tkm ausgegangen.

10 Energieverbrauchsreduktionspotential

Gemäß Verkehr in Zahlen 14/15 [31], Seite 297 ist für 2013 der Energieverbrauch der Eisenbahn 57 PJ, einschließlich Straßen- und U-Bahnen. Dies muss nun für Eisenbahnen und in Diesel- und Elektrotraktion aufgegliedert werden. Nach [31], Seite 298 wird 44 PJ (Peta Joule = 10^{15} J) elektrische Energie verbraucht, bleibt also 13 PJ für Dieselantrieb auf der Eisenbahn. Nach [32] Seite 301 wird 305000 t Dieselkraftstoff und 12,1 Mio. kWh elektrischer Strom verbraucht, Letzteres wieder mit Straßen- und U-Bahnen zusammen. Mit einer Energiedichte von Diesel mit 38,7 MJ/l und einem Volumen von 1,19 l/kg ergibt sich eine Energiemenge von 14 PJ. Die o.g. 13 PJ sind also recht gut getroffen und werden als Wert weiter verwendet. Nach [22] ist der Gesamtenergieverbrauch im DB-Netz 10,2 TWh (TeraWattStunden) (1TWh= 3,6 PJ), also umgerechnet 36,7 PJ. Die rückgespeiste Energie ist hier schon berücksichtigt. Der Gesamtenergieverbrauch Eisenbahn ist somit 36,7+13 PJ = 50 PJ. Leider ist keine Unterscheidung des Energieverbrauchs nach Personen- und Güterverkehr für alle Bahnunternehmen auffindbar.

Obwohl die Dieseltraktion nur noch eine sehr kleine Verkehrsleistung erbringt, Anteil ca. 8% [persönliche Info von Ifeu] ist der Primärenergieverbrauch mit 13/50=26 % sehr groß. Das hat zwei Gründe. Zum einen ist der Umwandlungswirkungsgrad bei thermischen Kraftwerken nicht in o.g. Zahlen zum elektrischen Energieverbrauch enthalten, sondern nur ab Fahrdraht gezählt. Jedoch ist der recht schlechte Wirkungsgrad von Dieseltriebfahrzeugen incl. Motorverlusten von max. ca. 30% enthalten. Zudem verkehren die Dieselfahrzeuge auf schlecht ausgelasteten Strecken und sind somit zusätzlich benachteiligt. Zwischen 1994 und 2010 hat sich der Bahndieselverbrauch auch bereits halbiert. Ursache ist der Übergang von lokbespannten Kurzzügen auf Triebwagenzüge und der Rückgang im Schienengüternahverkehr. Dieser Trend des starken Verbrauchsrückgangs wird sich fortsetzen. Allerdings ist auch zu sehen, dass gerade die stark wachsenden privaten Unternehmen aktuell zunehmend Dieselkraftstoff verbrauchen, siehe Bild 41, blaue Fläche.

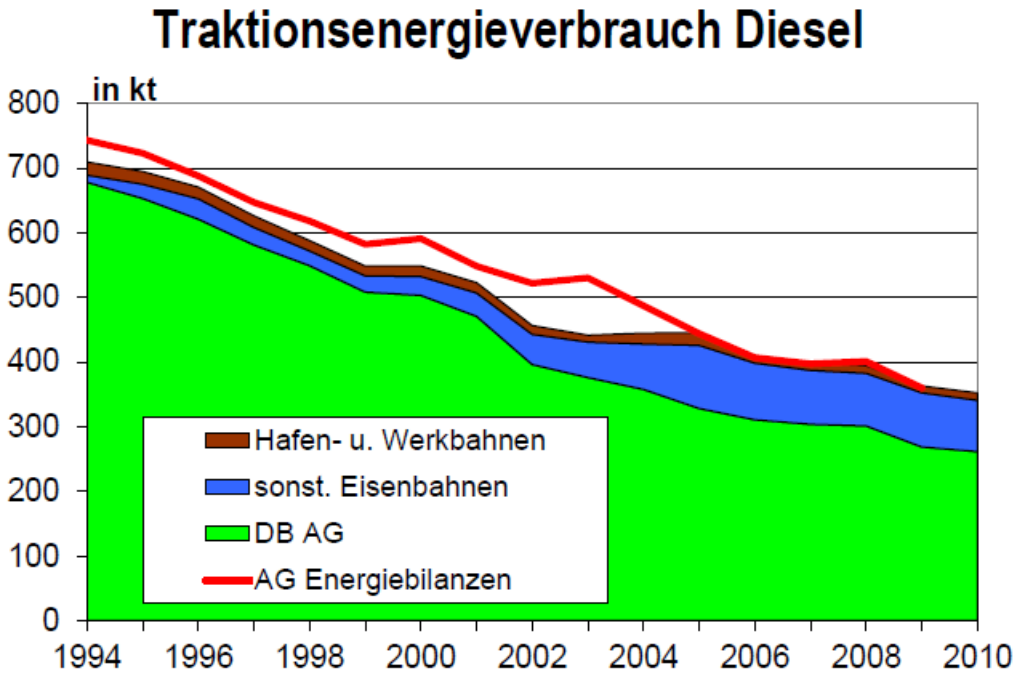


Bild 41
Verbrauch Bahndiesel in D, Knörr 2011, Seite 33 [32]. .

In Umsetzung von Kapitel 6 wird angenommen, dass der Anteil nichtelektrischer Traktion ab Fahrdraht nur noch 1% im Kurzstreckenverkehr, z.B. in Anschlussgleisen betragen wird. Ob dies dann mittels Speichertechnik (Batterie, Doppelschichtkondensator, Brennstoffzelle oder Dieselgeneratorset) geschehen wird, sei dahingestellt. Der Dieselverbrauch wird jedoch zurückgehen und keine nennenswerte Bedeutung mehr haben.

Da wie erwähnt keine Aufteilung nach Personen- und Güterverkehr vorhanden ist, wird eine Aufteilung des heutigen Verbrauchs 80% Personenverkehr und 20% Güterverkehr vorgesehen, in Anlehnung an [22]. Bei der DB ist der Anteil des Verbrauchs des Güterverkehrs 22%.
Der elektrische Verbrauch E_{2030} errechnet sich mit Übernahme des Dieselverkehrs, 30% Effizienzsteigerung und Verdreifachung der Verkehrsleistung im Personenverkehr und Verdoppelung im Güterverkehr dann folgendermaßen:

E_{2030} = 36,7 PJ (1/0,92)*(1-0,3)* (3*0,8 + 2*0,2)
Im Ergebnis: E_{2030} = 78,2 PJ
Diese Energiemenge muss und kann in Form von grünem Strom verwendet werden und ist somit klimaneutral.

Als Scenario wird folgendes angenommen:
Im Personenverkehr bedeutet Verdreifachung neu $3*89*10^9$ Pkm = $267 *10^9$ Pkm
Der Zuwachs sind also $2*89*10^9$ Pkm= $178 *10^9$ Pkm.

Dafür sind folgende Energieeinsparungen bei den jeweiligen Verkehrsträgern zu erwarten (Energieinhalt einheitlich 38,7 10^6 J/l).

10 % Neuverkehr	$17,8 *10^9$ Pkm		-
60 % Abwanderung von der Straße MIV	$106,8 *10^9$ Pkm	6l/100Pkm	248 PJ
20 % Abwanderung vom Luftverkehr(Kurzstr.)	$35,6*10^9$ Pkm	7l/100Pkm	97 PJ
10% Abw. Öffentlicher Straßenpersonenverkehr	$17,8*10^9$ Pkm	2l/100Pkm	14 PJ

Im Güterverkehr bedeutet Verdoppelung neu 2 *112,6 10^9 tkm = 225,2 10^9 tkm
Der Zuwachs sind also 1*112,6 10^9 tkm = 112,6 10^9 tkm.

Dafür sind folgende Energieeinsparungen bei den jeweiligen Verkehrsträgern zu erwarten:

80% von der Straße	90,1 10^9 tkm	3l/100tkm	104,6 PJ
2% vom Luftverkehr	2,2 10^9 tkm	20l/100tkm	17 PJ
18% von der Schifffahrt	20,3 10^9 tkm	1,5l/100tkm	11,8 PJ
0 % von Rohrleitungen	-	-	-

Dem Mehrverbrauch bei der Eisenbahn von 28,2 PJ (= 78,2 PJ 2030 – 50 PJ heute) stehen Einsparungen im Personenverkehr von 359 PJ und im Güterverkehr von 133,4 PJ gegenüber. Die Gesamtenergiebilanz beträgt +28,2 -359 -133,4 PJ = 464,2 PJ Einsparungen gegenüber heute. Bei einem Gesamtenergieverbrauch des Verkehrs in Deutschland von 2612 PJ im Jahr 2013 ([33] Seite 298) sind dies Einsparungen von fast 18%.
Die 464,2 PJ entsprechen 12 Mia l Diesel oder mit 1,1 €/l sind dies 13,2 Mia €/a Einsparungen. Zusätzlich kommen die Einsparungen an Treibhausgasen zur Geltung.
Ein Liter Diesel verbrennt zu **2,64** Kilogramm CO_2.
[http://www.spritmonitor.de/de/berechnung_co2_ausstoss.html]. Die Einsparung von 12 Mia l/a Diesel führt so zu einer Minderung von 31,7 Mio. t/a CO_2, davon 9,1 Mio. t/a allein

der Güterverkehr. Da der Verkehr in D heute knapp 200 Mio. t/a ausstößt [N.N. *CO2-Emissionsminderung* im *Verkehr* in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. - Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes ...2010] sind das mit 20 % des Verkehrsanteils bereits erhebliche Mengen.
Diese erheblichen Ersparnisse sollten auch für die Erstellung geeigneter Finanzierungsinstrumente der Umstellung Anreize schaffen. Die Einführung der Energiewende in die Eisenbahn könnte mit dem Traktionswechsel von Dampf auf Elektro und Diesel der 60er Jahre verglichen werden. Auch damals sind ungewöhnliche Finanzierungsquellen erschlossen worden, z.B. zinslose Kredite aus der Schweiz.

10. Forschungsempfehlungen

Wie oben mehrfach aufgeführt, ist der Klimavorteil der Schiene unbestritten, aber es fehlt die Nutzbarkeit.
Um dies zu erreichen, ist Forschung nötig. Bis Mitte der 90 Jahre gab es auch diverse Vorhaben, z.B. Cargosprinter, Cargomover, Intelligenter Güterwagen, Bremssysteme EBAS und Febis, diverse AK-Vorhaben.

Der Forschungsbedarf heute für den Schienengüterverkehr ist:

- Neue Rangierabläufe für Wagen mit Diagnose, automatischer Bremsprobe und allenfalls automatischer Kupplung, das bedeutet nicht nur Dispositionssoftware sondern auch Betriebsablaufänderungen
- Fahrdrahthybridloks unterschiedlicher Zugkraft und Leitung im Fahrleitungsbereich und im Alternativbereich

Pilotanwendungen von PEF (Product Environmental Footprint) fördern. Bei PEF werden die konkreten CO_2 resp.Treibhausgasemissionen von Herstellung und Transport einem Produkt direkt zugeordnet und z.B. auf die Verpackung für den Verbraucher sichtbar aufgebracht. Ein Großteil der Daten ist heute bereits vorhanden (z.B. Laufwegerfassung, Energieverbrauchsmessung) oder steht mit Telematikanwendungen am Güterwagen vor der Einführung. Allerdings ist das Datenhandling eine nichttriviale Aufgabe. Im Rahmen Industrie 4.0 wird das für Straßen- und Luftverkehr bereits in Pilotprojekten verwendet. Hier könnte der Schienenverkehr mit ausgezeichneten Resultaten glänzen und die in Kapitel 3 und 4 aufgezeigte geringe Wahrnehmung kompensieren.

11. Rahmenbedingungen

Schienenverkehr muss nach folgenden Prioritäten geführt werden:

1. Sicherheit
2. Pünktlichkeit
3. Energieeffizienz

Die Sicherheit ist interoperabel kompatibel nach dem Risikoansatz, Risiko ist als Funktion von möglichem Schadensausmaß und Eintretenswahrscheinlichkeit nach DIN-EN 50126, zu definieren.

In Kapitel 5 wird gezeigt, dass im Großen Pünktlichkeit auch eine Voraussetzung für Energieeffizienz ist. Im Kleinen, auf einzelnen Züge betrachtet, kann jedoch das Gegenteil der Fall sein, d.h. dass zur Erzielung von Pünktlichkeit mehr Energie aufgewendet werden muss, insbesondere durch Fahrzeitgewinn durch Verwendung der Druckluftbremse anstelle der Rekuperation.

Die Optimierung der Energieeffizienz ist stets eine Optimierung auch unter Berücksichtigung von Fahrzeit und Streckenleistungsfähigkeit.

Die Stärkung des Marktanteils des Schienenverkehrs hängt sehr stark von der Förderung der anderen Verkehrsträger ab.
Genannt werden sollen hier vor allem:

- Busverkehr ohne Maut und mit reduzierten PRM Auflagen
- Sehr schwache Besteuerung des Flugverkehrs
- Trassenpreis Bahn versus LKW Maut,
- EEG-Umlage, die bei den Bahnen nicht als Anreiz zum Sparen begriffen wurde und wird (Erneuerbare-Energien-Gesetz)

12. Schlussbemerkungen

Insbesondere durch die speicherlose Elektromobilität (Fahrdraht und Unterwerk statt Batterie und Steckdose) und die Spurführung sind Lösungen zur Energieeffizienzsteigerung aus der Automobiltechnik und aus der Luftfahrt nur sehr eingeschränkt und mit völlig anderer Priorisierung auf die Schiene übertragbar.

Durch diese Studie wird der große mögliche Beitrag des Schienenverkehrs zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzeptes und der nach Paris zu präzisierenden Klimaschutzziele der Bundesregierung im Groben aufgezeigt. Die Zielerreichung wird als sehr risikoarm angesehen, allerdings müssen die Maßnahmen – ähnlich wie beim Lärmschutz auf der Schiene - durch Impulse aus der Politik veranlasst und gefördert werden. Die Potentiale der engen Verknüpfung von Energie- und Verkehrswende können bei gemeinsamem Handeln gehoben werden.

Prof. Dr.-Ing. M. Hecht

Literatur

[1] Hecht, M.; Kleemann, U.; Polach, O**.:** Schienenfahrzeuge Kapitel Q2
in: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, 24. Auflage, 2014, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York S. Q37-Q68

[2] N.N.; EU Transport in Figures, Statistical Pocketbook 2014

[3] Bhupender Singh Bodh: Making the most of green Energy, Railway Gazette March 2016, p. 41-43

[4] Krause, P.; Hecht, M. ; Fahrwiderstandsmessung HVLE, Bericht 01/2016; TU Berlin Fachgebiet Schienenfahrzeuge, 07.02.2016

[5] Hoepke, Erich; Breuer, Stefan: Nutzfahrzeugtechnik; Grundlagen, Systeme, Komponenten; 7. Auflage, Springer Vieweg Verlag; Wiesbaden 2014

[6] Rossberg, R.R.: Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs Elektrische Bahnen 114(2016) Heft 3, Seite 108-109

[7] Gemeiner, Holger: Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung von Bogenwiderständen freilaufender Güterwagen in Zugbildungsanlagen, Dissertation TU-Berlin 2016

[8] Doris Luther: Automatisierte Bremsprobe im Schienengüterverkehr: ein Beitrag zur Optimierung von Effizienz, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, Dissertation TU-Berlin 2014

[9] Hecht, M., Krause, P.: Instandhaltung automatisch und energieautark planen, Privatbahn-Magazin, 01/2014, S. 88-90

[10] Krause, P.: ESZüG – Energieautarke Sensorsysteme zur Zustandsüberwachung von Güterwagen, Präsentation, Öffentliches Statusmeeting VDI/VDE-IT, 19.-20.05.2014, Berlin

[11] Hürlimann, Gisela: Die Eisenbahn der Zukunft, Automatisierung, Schnellverkehr und Modernisierung bei den SBB 1955-2005, Dissertation ETH Zürich 2006; http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:1642/eth-1642-01.pdf

[12] Leeb, R.: SBB-Netz: mehr Züge –Mehr Schiene –Mehr Unterhalt, Straße und Verkehr 2014, Heft 1-2, Seite 23-25

[13] http://www.bav.admin.ch/zeb/03777/03778/03782/index.html?lang=de

[14] Bosch, J: Pünktlichkeit spart Energie - Modellierung von Einflussfaktoren auf den Bahnenergiebedarf, Elektrische Bahnen 10/2014, Seite 596-602

[15] Bruckmann, D.: Umwegverkehr-Laufwege von Güterwagen; Wascosa Info Letter Nr. 22, Nov. 2013, S. 12-14

[16] Behmann, Uwe: Traktionsenergiebilanz mit Energierückspeisung im DB-Netz im Jahr 2014, Elektrische Bahnen 2015, Heft 10, Seite 474 bis 475

[17] Cortesi, Alberto: Die SBB Cargo Hybridlok Eem 923, Vortrag im Eisenbahnwesenseminar TU Berlin, 26. Mai 2014; http://www.ews.tu-berlin.de/sommersemester_2014/26_mai_2014/

[18] Leiste, M.: Bewertung und Analyse von Möglichkeiten zur Erhöhung der elektrodynamischen Bremskraft von Güterzügen mittels MKS-Simulationsrechnungen, Masterarbeit, Technische Universität Berlin, 2015

[19] Hecht, M., Leiste, M., Götz, G.: Energy savings with hybrid locomotives on TEN-T corridors, Swiftly Green Report, Technische Universität Berlin, 2015

[20] Shoeib, R.; Hecht, M.: Energieeinsparung durch aerodynamische Optimierung von Schüttgutwagen, ZEVrail Glasers Annalen 137, Heft 6-7, 2013, S. 246-256

[21] Hecht, M.; Keudel, J.: Verbesserte Energieeffizienz durch radialeinstellendes Fahrwerk, Eisenbahningenieur, 05/2006, S. 42-47

[22] Behmann, Uwe: Traktionsenergiebilanz mit Rückspeisung im DB-Netz im Jahr 2013, Elektrische Bahnen 112(2014), Seite 322-323

[23] Mannsbarth, Heiko: Vorteile der Innenlagerung bei Drehgestellen am Beispiel des ICx-Laufdrehgestells, Vortrag im Eisenbahnwesenseminar TU Berlin, 09.Dez. 2013; http://www.ews.tu-berlin.de/wintersemester_201314/9_dezember_2013/

[24] Ötting, A.: Schlussbericht Förderprojekt Freefloat 1, Intelligentes Schienennutzung – intensivere Nutzung der Ressource Schiene durch ein integriertes Planungs- und Verkehrsmanagement Schiene, Förderkennzeichen 19 G 7008, April 2013

[25] Gille, Andreas: Ein neuer Ansatz zur Kapazitätserhöhung von Bahnsystemen, ZEV-Rail 2015, Heft 1-2, Seite 4 bis 10

[26] DB Daten & Fakten 2014
http://lokster.deutschebahn.com/fileadmin/Redaktion/PDF/Daten_und_Fakten.pdf

[27] http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Wasserkraft-Lueckenschluss-im-Druckrohr

[28] Pfander,J.-P.; Simons, K.: Technik und Betrieb der Netzkupplungsanlagen 50/16,7 Hz bei der SBB, Elektrische Bahnen 2011, Heft 1-2; Seite 55-62

[29]http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/oekologie/klima-schutz/Erneuerbare_Energien/4097124/

[30] Eschweiler, P.; Hecht, M.: Einfluss des Wagens auf den Marktanteil des Schienengüterverkehrs - Weissbuch Eisenbahngüterwagen 2030
Jahrbuch Logistik 2013, Verlag: free beratung Gesellschaft für Kommunikation im Marketing mbH. Unit Logistik, S. 24-27 http://www.schienenfzg.tu-berlin.de/menue/service/downloads/weissbuch_innovativer_eisenbahngueterwagen_2030/

[31] N.N.; Verkehr in Zahlen 2014/2015, 43. Jahrgang, BMVI, Berlin 2014

[32] Knörr, Walter: Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell Engieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“, Berichtsperiode 1990-2010, Ifeu Institut Heidelberg, 2011