



LEISE, ENERGIEEFFIZIENT, WIRTSCHAFTLICH

BMVI-Forschungsprojekt
„Aufbau und Erprobung von Innovativen Güterwagen“

Energieeinsparung durch die ep-light Bremse
RWTH Aachen

Auftraggeber:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Hauptauftragnehmer
(Arge):



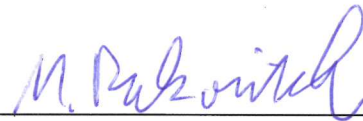
Auftragnehmer
für Energie- und
Lärmmessungen:



Energieeinsparung durch die ep-light-Bremse

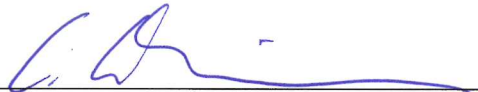
Vergleich des Energieverbrauchs beim Betrieb eines Güterzugs mit durchgängiger Luftbremse zu einem Zug mit elektrisch übertragenem Bremsbefehl (ep-light)

Erstellt:



(M.Sc. Martin Rakowitsch)

Freigegeben:



(Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler)

Auftraggeber:

DB Cargo AG
Herrn Dr. Holger Schmidt
Pionierstr. 10
32423 Minden

Datum: 01.04.2019

LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR SCHIENENFAHRZEUGE UND TRANSPORTSYSTEME

UNIV.-PROF. DR.-ING. C. SCHINDLER

Energieeinsparung durch die ep-light-Bremse

Vergleich des Energieverbrauchs beim Betrieb eines Güterzugs mit durchgängiger Luftbremse zu einem Zug mit elektrisch übertragenem Bremsbefehl (ep-light)

Kurzfassung

Die ep-light-Bremse zeichnet sich durch das schnellere Ansprechverhalten gegenüber der konventionellen, mittels HL-Druck gesteuerten Druckluftbremse aus. Über ein Bremsenmodell wird gezeigt, dass das Ansprechverhalten beim Anlegen verbessert wird. Eine energetische Analyse der Betriebsbremsung zeigt die Energieeinsparungspotentiale auf, welche mit der ep-light-Bremse aufgrund des unveränderten Löseverhaltens nicht ausgeschöpft werden können.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	5
Formelverzeichnis	6
1 Einführung und Untersuchungsgegenstand.....	8
2 Modellbildung.....	10
2.1 Modell der Längsdynamik des Güterzugs.....	10
2.2 Modellierung des Bremskraftauf- und -abbaus	11
2.2.1 Analyse des Verhaltens pneumatischer Güterwagenbremsen	11
2.2.2 Bremsenmodell.....	12
2.2.3 Ermittlung der Kraftänderungsraten	13
2.2.4 Bestimmung der effektiven Bremskraft eines Fahrzeugs	15
2.2.5 Übersicht der Bremsenmodellparameter.....	16
2.3 Parameter eines Beispielgüterzugs	17
3 Analyse des Bremsverhaltens	19
3.1 Bremskraft je Wagen	19
3.2 Gesamtbremskraft des Zugs	21
3.3 Vergleich der Bremsenarten bei einer Schnellbremsung	23
4 Energieeinsparungspotentiale bei einer Betriebsbremsung	25
4.1 Energetische Analyse einer Betriebsbremsung	25
4.2 Verrichtete Arbeit der Bremskräfte.....	27
4.3 Vermeidung von Überbremsungen	28
4.4 Maximierung der Rekuperation.....	29
4.5 Quantitativer Vergleich der Energieeinsparungspotentiale.....	31
4.6 Auswirkungen der ep-light-Bremse	33
4.6.1 Überbremsungen	33
4.6.2 Rekuperation	33

5 Zusammenfassung und Fazit	36
Literaturverzeichnis.....	37
Abbildungsverzeichnis.....	38
Tabellenverzeichnis.....	41
Anhang	42

Abkürzungsverzeichnis

ep elektropneumatisch

FbV Führerbremsventil

HL Hauptluftleitung

Tf Triebfahrzeugführer

Formelverzeichnis

Δv	Geschwindigkeitsdifferenz
λ	Massenfaktor
ρ	Luftdichte
a	Beschleunigung
A	Spantquerschnittsfläche in Zuglängsrichtung
Brh	Bremshundertstel
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
d	Abstand zwischen Güterwagen und Lokomotive
$E_{\Delta v}$	Kinetische Energie bei Änderung der Geschwindigkeit um Δv
$E_{kin,0}$	Kinetische Energie vor der Bremsung
$E_{kin,min}$	Kinetische Energie nach einer Überbremsung
$E_{kin,soll}$	Kinetische Energie bei Sollgeschwindigkeit
E_{ng}	Nicht rekuperierte Energie
E_{pn}	Energie, die in der pneumatischen Bremse umgesetzt wird
E_{rek}	Rekuperierte Bremsenergie
F_B	Effektive Bremskraft
F_{ed}	Elektrodynamische Bremskraft
F_{pn}	Bremskraft der pneumatisch wirkenden Bremse
$F_{pn,ges}$	Gesamte pneumatische Bremskraft des Güterzugs
$F_{pn,max}$	Maximale Bremskraft der pneumatischen Bremse eines Fahrzeugs
f_{w0}	Grundwiderstandsbeiwert
F_{w0}	Grundwiderstandskraft

F_{WL}	Luftwiderstandskraft
g	Gravitationsbeschleunigung
i	Index ganzer Zahlen
l	Fahrzeuglänge
m	Masse eines Fahrzeugs
s	Weg
s^*	Zur Verfügung stehender Bremsweg, der nicht für die Rekuperation genutzt wird
s_{FbV}	Signal bzw. Stellung des Führerbremssventils
s_{nB}	Nominaler Bremsweg
t	Zeit
t_{Aufbau}	Zeitspanne zum Aufbau der maximalen Kraft einer Druckluftbremse ohne Durchschlagszeit
t_{durch}	Durchschlagszeit
v	Geschwindigkeit
v_{durch}	Durchschlagsgeschwindigkeit
v_{min}	Minimale Geschwindigkeit bei einer Bremsung
v_{soll}	Zielgeschwindigkeit bei einer Betriebsbremsung

1 Einführung und Untersuchungsgegenstand

In Güterwagen konventioneller Bauart kommt eine pneumatisch wirkende Bremsanlage zum Einsatz. Als Steuerbefehl zum Anlegen und Lösen der Bremse dient die Druckabsenkung bzw. –anhebung in der Hauptluftleitung (HL). Die HL ist eine Druckluftleitung, die den gesamten Zug von der Lokomotive bis zum letzten Wagen durchsetzt. Sie entsteht bei der Zugbildung, indem die Druckluftleitungen der einzelnen Fahrzeuge miteinander verbunden werden.

Der Steuerbefehl geht von der Lokomotive aus, indem der Triebfahrzeugführer (Tf) die HL über das Führerbremventil (FbV) in der Lokomotive entlüftet, wodurch der Druck in der HL absinkt und das Steuersignal der Bremse bereitgestellt wird. Durch die Trägheit der Luft findet die Druckabsenkung nicht an allen Stellen der HL gleichzeitig statt. Sie verzögert sich mit zunehmendem Abstand zur Entlüftungsstelle, welche im Allgemeinen in der Lokomotive vorzufinden ist. Dies hat zur Folge, dass die Bremsen der Güterwagen nicht gleichzeitig auslösen, siehe Abbildung 1. Je größer der Abstand zwischen Wagen und Lokomotive ist, desto größer ist die Zeitverzögerung. Das gleiche Verhalten ist beim Lösen der pneumatisch wirkenden Bremse zu beobachten. Der wesentliche Unterschied zum Anlegen ist, dass der Druck erhöht statt abgesenkt wird.

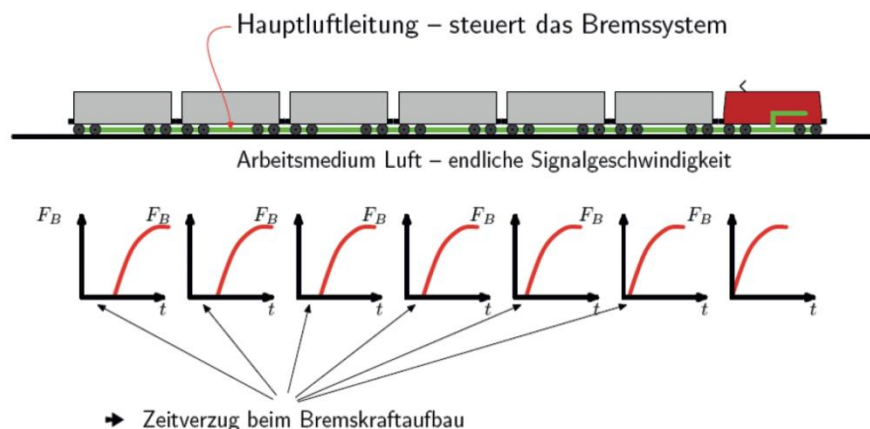


Abbildung 1: Zeitverzug beim Bremskraftaufbau der Druckluftbremse; übernommen aus [1]

Durch die Zeitverzögerung zwischen der Bedienung des FbV und der Reaktion der Bremse ist es schwierig, gewünschte Fahrgeschwindigkeitsprofile nachzufahren. Wirtschaftliche Verluste ergeben sich, wenn bei einer gewünschten Geschwindigkeitsreduktion die Zielgeschwindigkeit unterschritten wird, da anschließend Traktionsenergie aufgewendet werden muss, um einen Güterzug auf die Sollgeschwindigkeit zu beschleunigen.

Im Rahmen des Projekts „Innovativer Güterwagen“ wurden neue Wagen hergestellt, die mit neuen technischen Einrichtungen ausgestattet sind. Eine dieser Einrichtungen ist die sogenannte ep-light-Bremse. Bei dieser Bauart wird ähnlich der herkömmlichen elektropneumatischen (ep) Bremse ein elektrisches Steuersignal verwendet um die Druckabsenkung in der HL zu beschleunigen und in jedem Güterwagen gleichzeitig ablaufen

zu lassen. Dies geschieht über ein zusätzliches Ventil, das in jedem Wagen in der Nähe des konventionellen Steuerventils verbaut wird und auf einen elektrischen Befehl die HL entlüftet, wodurch die Bremsung eingeleitet wird. Gelöst wird die Bremse über die konventionelle Methode, nämlich über die Druckerhöhung der HL, die von der Lokomotive ausgeht.

Von der ep-light-Bremse wird durch das schnellere Ansprechverhalten beim Anlegen der Bremse erwartet, dass sich die Zielgeschwindigkeit bei Betriebsbremsungen besser einstellen lässt, wodurch Energie eingespart würde. Inwiefern und in welchem Umfang dies möglich ist, ist Untersuchungsgegenstand des vorliegenden Berichts.

Für die Untersuchung wird im ersten Teil ein Güterzugmodell entwickelt, wobei der Fokus auf der Modellierung des Bremsverhaltens liegt. Mit diesem Modell wird das Bremsverhalten mit den unterschiedlichen Bremsenbauarten verglichen. Im zweiten Teil folgt eine Analyse von prinzipiellen Energieeinsparungspotentialen bei Betriebsbremsungen. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob die ep-light-Bremse hilft, die Einsparungspotentiale auszuschöpfen.

2 Modellbildung

Um die Auswirkungen der ep-light-Bremse auf einen Güterzug abschätzen zu können, wird zunächst die Zuglängsdynamik und das Zeitverhalten der Bremse modelliert. Anschließend werden Modellparameter für einen Beispielgüterzug angegeben.

2.1 Modell der Längsdynamik des Güterzugs

Jedes Fahrzeug des Zugs wird durch seine Masse m , seine Länge l und den Massenfaktor λ abstrahiert, der den rotatorischen Energieanteil der Drehmassen berücksichtigt. Die modellierten Kräfte an einem Fahrzeug sind die effektive Bremskraft F_B , die Luftwiderstandskraft F_{WL} und die Grundwiderstandskraft F_{W0} . Für den Zug in Abbildung 2 wird die Beschleunigung a eingeführt, sodass sich der Kräftesatz für den Zug mit N Fahrzeugen wie folgt ergibt:

$$a \sum_{i=1}^N \lambda_i m_i = \sum_{i=1}^N (F_{B,i} + F_{WL,i} + F_{W0,i})$$

Die Luftwiderstandskraft F_{WL} und die Grundwiderstandskraft F_{W0} sind definiert durch

$$F_{WL} = \frac{1}{2} \rho A c_W v^2 \quad \text{und} \quad F_{W0} = f_{W0} \cdot m \cdot g.$$

Über eine numerische Integration der Beschleunigung a mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 wird die Geschwindigkeit v berechnet. Eine weitere Integration liefert den Weg s .

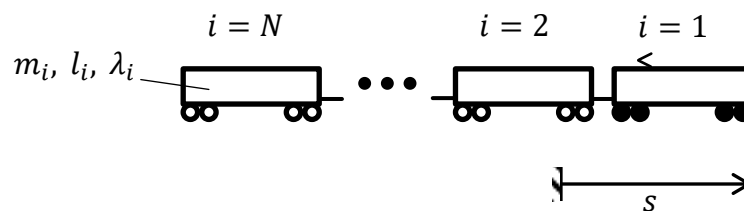


Abbildung 2: Definitionen am Zugmodell

2.2 Modellierung des Bremskraftauf- und -abbaus

Im Folgenden wird das Zeitverhalten der pneumatischen Bremse analysiert und ein Modell abgeleitet, das dieses Verhalten abbilden kann.

2.2.1 Analyse des Verhaltens pneumatischer Güterwagenbremsen

Der Aufbau der pneumatischen Bremse ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Der Kompressor verdichtet Luft, sodass im Luftbehälter ein Druck von 8 bis 10 bar anliegt. Mit dem FbV wird der Druck in der HL eingestellt, der im ungebremsten Fall 5 bar beträgt. Registrieren die Steuerventile (4) einen Druckabfall in der HL, werden die Bremszylinder (6) mit der Druckluft aus dem Vorratsluftbehälter auf maximal 3,8 bar beaufschlagt. Der Bremszylinderdruck wird über die Kolbenfläche in eine Kraft transformiert, die anschließend über ein Bremsgestänge übersetzt den Bremsklotz gegen das Rad drückt. Wird die Rückstellfeder im Bremszylinder vernachlässigt, ist die Bremskraft proportional zum Druck im Bremszylinder. Dadurch kann das Zeitverhalten der Bremskräfte aus den Zylinderdrücken ermittelt werden.

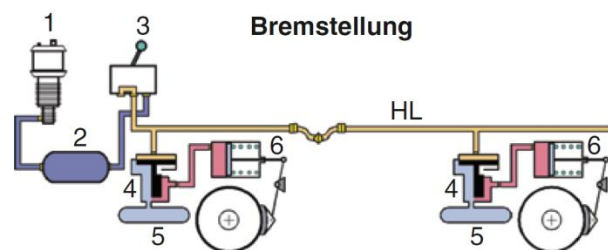


Abbildung 3: Aufbau der indirekten pneumatischen Bremse; übernommen aus [2].
 (1) Kompressor; (2) Luftbehälter; (3) Führerbremventil; (4) Steuerventil;
 (5) Vorratsluftbehälter; (6) Bremszylinder

In Abbildung 4 sind experimentell ermittelte Zeitschriebe der Bremszylinderdrücke aufgetragen, welche aus [2] entnommen wurden. In Versuchen wurde ein Zug mit einer Länge 750 m und 52 Wagen in den Bremsstellungen P und G abgebremst. Zu sehen ist, dass hintere Wagen eine größere Durchschlagszeit t_{durch} besitzen und in Bremsstellung P der mittlere Gradient des Bremszylinderdrucks kleiner wird. Dementsprechend baut sich die Bremskraft der hinteren Wagen langsamer auf.

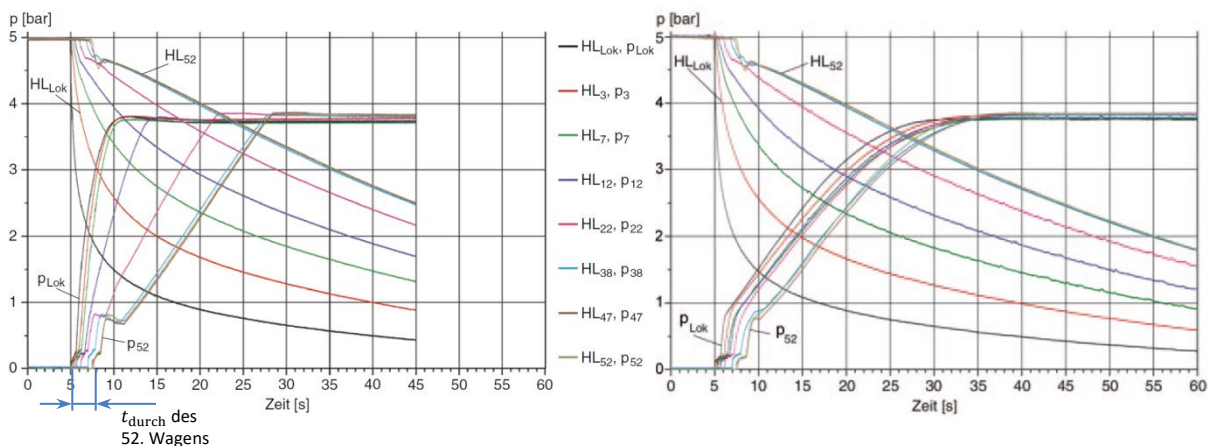


Abbildung 4: HL- und Bremszylinderdrücke in ausgewählten Wagen bei einer Schnellbremsung eines 750 m langen Zugs mit 52 Wagen in Bremsstellung P (links) und G (rechts); übernommen aus [2] und mit Anmerkung versehen

Der Aufbau der ep-light-Bremse ist in Abbildung 5 gezeigt. Die HL eines jeden Wagen wird um ein Entlüftungsventil erweitert, das über ein elektrisch übertragenes Signal angesteuert wird. Dies hat zur Folge, dass die Druckminderung in der HL in allen Wagen gleichzeitig stattfindet.

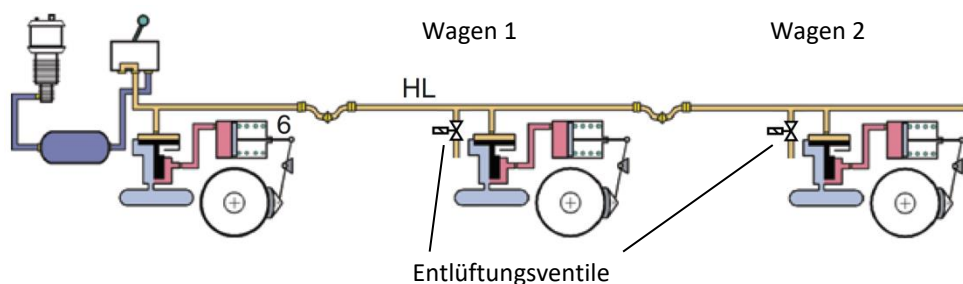


Abbildung 5: ep-light-Bremsausstattung durch Erweiterung der Wagen um elektrisch angesteuerte Entlüftungsventile zur schnelleren Entlüftung der HL; modifizierte Abbildung auf Basis von [2]

2.2.2 Bremsenmodell

Für das Modell der Druckluftbremse wird die in Abbildung 6 gezeigte Kennlinie angenommen. Die Bremskraft reagiert um die Durchschlagszeit t_{durch} verzögert auf die Stellung s_{FbV} des FbV. Anschließend baut sich die Bremskraft linear mit der Steigung $m_{\text{pn}} = \frac{\Delta F_{\text{pn}}}{\Delta t}$ auf, bis die Bremskraft $F_{\text{pn}}(t) = F_{\text{pn,max}} \cdot s_{\text{FbV}}(t)$ erreicht ist. Durch dieses Modell können die zwei wesentlichen Effekte der Druckluftbremse in langen Güterzügen abgebildet

werden, nämlich die nach hinten länger werdende Durchschlagszeit und der sich abflachende Gradient.

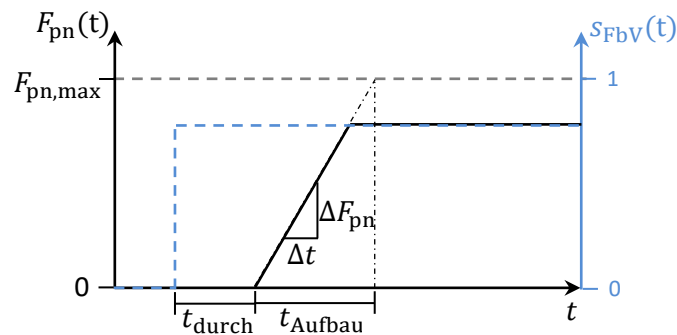


Abbildung 6: Charakteristik der Bremskraft im Modell

Durch das Bremsenmodell ergeben sich für jedes Fahrzeug die Parameter $F_{pn,max}$ (maximale effektive Bremskraft eines Fahrzeugs), $m_{pn} = \frac{\Delta F_{pn}}{\Delta t}$ (Steigung des Kraftaufbaus), und die Durchschlagszeit t_{durch} .

Die Durchschlagszeit berechnet sich aus $t_{durch} = \frac{\text{Abstand zur Lokomotive}}{v_{durch}}$ mit der Durchschlagsgeschwindigkeit v_{durch} von 250 m/s [2]. Im Fall der ep-light-Bremse entfällt die Durchschlagszeit und wird im Modell zu Null gesetzt.

2.2.3 Ermittlung der Kraftänderungsraten

Für die Ermittlung der Steigungen des Kraftaufbaus werden die Zylinderdrücke im Intervall von 10% und 95% des maximalen Drucks einer Regressionsrechnung mit linearer Ansatzfunktion unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt.

Weil die Kraftaufbauzeiten nur für einzelne Wagen vorliegen, wird eine kubische Interpolation über den Abstand d des Steuerventils zur Lokomotive vorgenommen. Damit kann die Rate für eine beliebige Position im Zug abgeschätzt werden, siehe Abbildung 8. Auf der Ordinate ist die normierte Kraftaufbauzeit aufgetragen. Sie ist um die maximale Bremskraft bereinigt, sodass dieser Wert dem Kehrwert von t_{Aufbau} entspricht, dessen Definition aus Abbildung 6 hervorgeht.

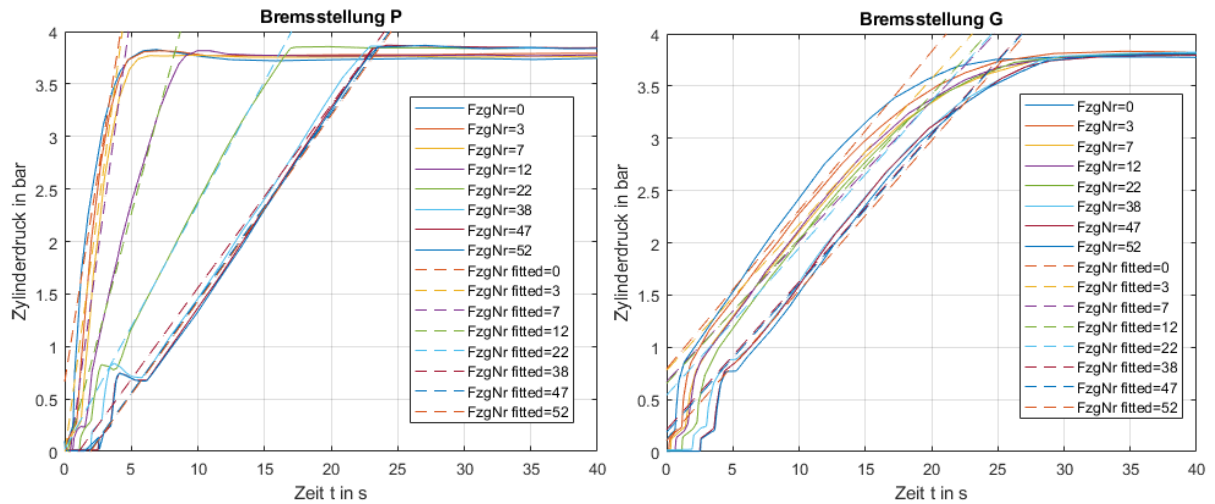


Abbildung 7: Bremszylinderdrücke in Bremsstellung P (links) und G (rechts) mit der linearen Regression zur Ermittlung der Kraftaufbaugradienten für Wagen, zu denen die Daten in [2] vorliegen

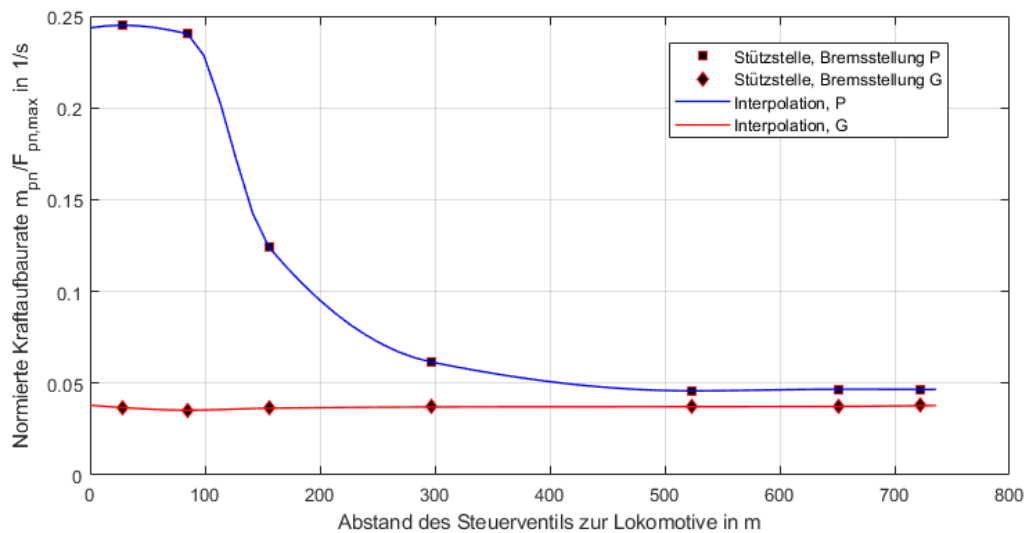


Abbildung 8: Normierte Kraftaufbaurrate als Funktion des Abstands d zur Lokomotive

Die Kraftlöseraten werden aus den üblichen Lösezeiten ermittelt, die in Tabelle 1 aufgelistet sind. Dem ersten Fahrzeug im Zug wird die minimale Lösezeit zugeordnet, dem Letzten die maximale Zeitdauer. Alle weiteren Werte werden linear interpoliert.

Tabelle 1: Lösezeiten der Bremse in Abhängigkeit der Bremsstellung aus [2]

Bremsstellung	Min. Lösezeit	Max. Lösezeit
P	15 s	20 s
G	45 s	60 s

Für die ep-light-Bremse liegen keine Messschriebe der Bremszylinderdrücke vor, weswegen folgende Annahmen getroffen werden. Mit der ep-light-Bremse wird ausschließlich der Kraftaufbau beeinflusst. Beim Anlegen der Bremse entfällt die Durchschlagszeit und alle Fahrzeuge haben die gleiche Kraftaufbaurrate. Die Rate entspricht dem Wert, der bei der Lokomotive vorzufinden ist ($d = 0$).

2.2.4 Bestimmung der effektiven Bremskraft eines Fahrzeugs

Die maximale pneumatisch erzeugte Bremskraft $F_{pn,max}$ eines Fahrzeugs wird aus dem Fahrzeugbremsgewicht abgeschätzt, indem das Verfahren zur Ermittlung der Bremsgewichte aus [3] rückwärts angewendet wird. Dazu werden zuerst die Brems Hundertstel gemäß

$$Brh = \frac{\text{Bremsgewicht in Stellung P in } t}{\text{Fahrzeugmasse in } t} \cdot 100$$

bestimmt. Anschließend wird der Bremsweg aus 100 km/h aus dem Diagramm B.1 in [3] abgelesen.

Über eine numerische Simulation wird der Wert der Bremskraft bestimmt, der notwendig ist, um das Fahrzeug im zuvor abgelesenen Bremsweg zum Stillstand zu bringen. Für das Zeitverhalten der Bremse, wird in der Simulation die in Abbildung 9 skizzierte Kennlinie verwendet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 3 (Abschnitt 2.3) aufgeführt.

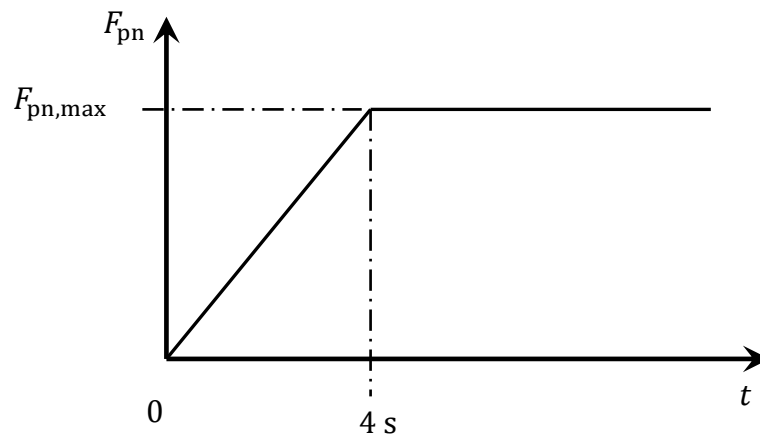


Abbildung 9: Annahme des Bremskraftzeitverhaltens in Stellung P für die Bestimmung der maximalen Bremskraft aus dem Bremsgewicht

2.2.5 Übersicht der Bremsenmodellparameter

Das Zeitverhalten der Modellbremskraft ergibt sich - wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert - aus der Durchschlagszeit und den Anlege- bzw. Löseraten. Diese sind in Tabelle 2 für die verschiedenen Bremsstellungen und Bremsbauarten zusammengestellt. Die Variable d kennzeichnet die Distanz zum ersten Fahrzeug.

Tabelle 2: Parameter für das Bremsenmodell für verschiedene Bremsstellungen und Bauarten

Bremsstellung/Bauart	Anlegen		Lösen	
	t_{durch}	m_{pn}	t_{durch}	m_{pn}
P konventionell	$\frac{d}{v_{\text{durch}}}$	$f(d)$, nach Abbildung 8	$\frac{d}{v_{\text{durch}}}$	$\frac{F_{\text{pn,max}}}{15 \text{ s} \dots 20 \text{ s}}$
G konventionell	$\frac{d}{v_{\text{durch}}}$	$f(d)$, nach Abbildung 8	$\frac{d}{v_{\text{durch}}}$	$\frac{F_{\text{pn,max}}}{45 \text{ s} \dots 60 \text{ s}}$
P ep-light	0 s	$f(d = 0) \approx \frac{F_{\text{pn,max}}}{4 \text{ s}}$, Abbildung 8	$\frac{d}{v_{\text{durch}}}$	$\frac{F_{\text{pn,max}}}{15 \text{ s} \dots 20 \text{ s}}$
G ep-light	0 s	$f(d = 0) \approx \frac{F_{\text{pn,max}}}{26 \text{ s}}$, Abbildung 8	$\frac{d}{v_{\text{durch}}}$	$\frac{F_{\text{pn,max}}}{45 \text{ s} \dots 60 \text{ s}}$

2.3 Parameter eines Beispielgüterzugs

Als exemplarischer Güterzug wird ein Autotransportganzzug mit 20 Wagen modelliert. Die technischen Daten der Lokomotive werden anhand der Baureihe 152 ermittelt. Werte für die Wagen werden anhand des Autotransportwagens vom Typ Laaers mit je 16,5 t Zuladung entnommen, was einer Beladung von 11 Kraftfahrzeugen mit je 1,5 t Masse entspricht. Kennzahlen, die keinem Datenblatt zu entnehmen sind, werden aus [4] für überschlägige Berechnung der Längsdynamik für Schienenfahrzeuge übernommen. Tabelle 3 schlüsselt die Parameter auf.

Tabelle 3: Daten und Parameter des Beispielzugs

	Symbol	Beschreibung	Wert	Quelle
Lokomotive der Baureihe 152		Anzahl der Lokomotive	1	Annahme
	m	Dienstmasse	87 t	[5]
	l	Länge über Puffer	19,6 m	[5]
	λ	Massenfaktor	1,2	[4]
		Bremsgewicht Stellung P	103 t	[5]
	$F_{pn,max}$	Effektive pneumatische Bremskraft	92,2 kN	Berechnung nach Abschnitt 2.2.4
	c_w	Strömungswiderstandskoeffizient	0,5	[4]
	f_{w0}	Grundwiderstandskoeffizient	3,75 ‰	[4]
	A	Spantquerschnittsfläche	10 m ²	[4]
Autotransportwagen Laaers		Anzahl der Güterwagen	20	Annahme
	m	Dienstmasse inkl. 16,5 t Zuladung	46,5 t	[6], Annahme
	l	Länge über Puffer	31 m	[6]
	λ	Massenfaktor	1,035	[4]
		Bremsgewicht Stellung P	46,5 t	automatische Lastabbremung
	$F_{pn,max}$	Effektive pneumatische Bremskraft	42,2 kN	Berechnung nach Abschnitt 2.2.4
	c_w	Strömungswiderstandskoeffizient	0,25	[4]
	f_{w0}	Grundwiderstandskoeffizient	2 ‰	[4]
	A	Spantquerschnittsfläche	10 m ²	[4]

Der gesamte Güterzug hat die Eigenschaften, die in Tabelle 4 zusammengefasst sind.

Tabelle 4: Eigenschaften des Zugmodells

Eigenschaft	Wert
Anzahl Lokomotive	1
Anzahl Güterwagen	20
Gesamtmasse	1017 t
Vergrößerte Zugmasse	1067 t
Länge	639,6 m

3 Analyse des Bremsverhaltens

In diesem Kapitel wird zunächst das Zeitverhalten der Bremskraft für jeden Wagen im Zug gezeigt. Anschließend wird die Gesamtbremskraft des Güterzugs in verschiedenen Bremsstellungen analysiert. Die Auswirkung der verschiedenen Bremsausführungen auf eine Schnellbremsung wird nachfolgend gegenübergestellt.

3.1 Bremskraft je Wagen

Abbildung 10 vergleicht die Wagenbremskräfte in den unterschiedlichen Bauarten. In der linken Grafik sind die Bremskräfte für die rein pneumatische Steuerung dargestellt. Es ist zu sehen, dass im Modell die Durchschlagszeit größer und der Gradient kleiner wird, je weiter hinten ein Wagen im Zug angeordnet ist. In der rechten Grafik ist die Bremskraft für die ep-light-Bremse der Wagen abgebildet. Im Modell ist keine Durchschlagszeit mehr vorhanden und nach ca. 4 Sekunden ist die maximale Bremskraft erreicht. Alle Wagen haben unabhängig von ihrer Position im Zug die gleiche Bremskraftcharakteristik.

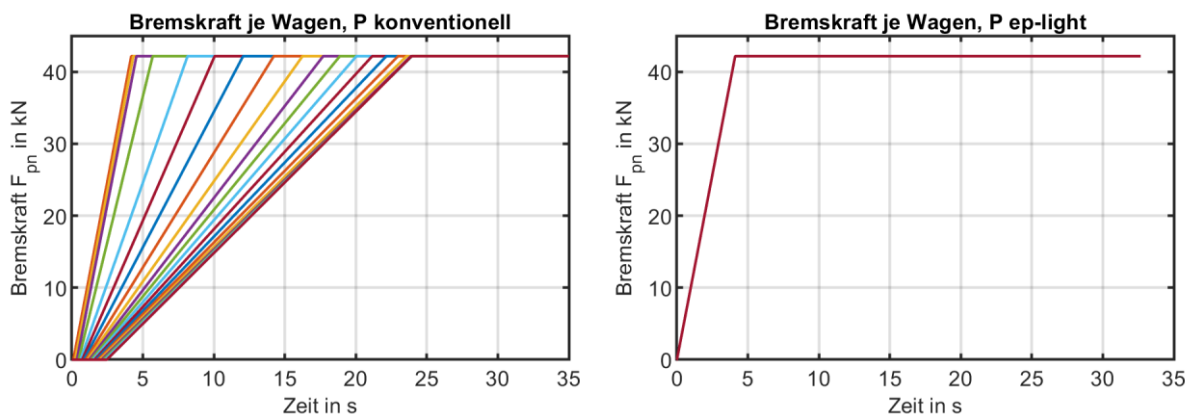


Abbildung 10: Bremskraftaufbau je Güterwagen in Bremsstellung P, links in konventioneller Ausführung, rechts mit ep-light-Ausstattung

In Abbildung 11 wird der Vergleich für die Bremsstellung G gezogen. In der konventionellen Bauart ist die Durchschlagszeit erkennbar, die in der ep-light-Ausführung entfällt. Die Kraftaufbauraten sind jedoch auch bei der herkömmlichen Bremsausführung sehr ähnlich, weshalb die ep-light-Bremse in Bremsstellung G die Kraftaufbauraten nicht wesentlich beeinflusst.

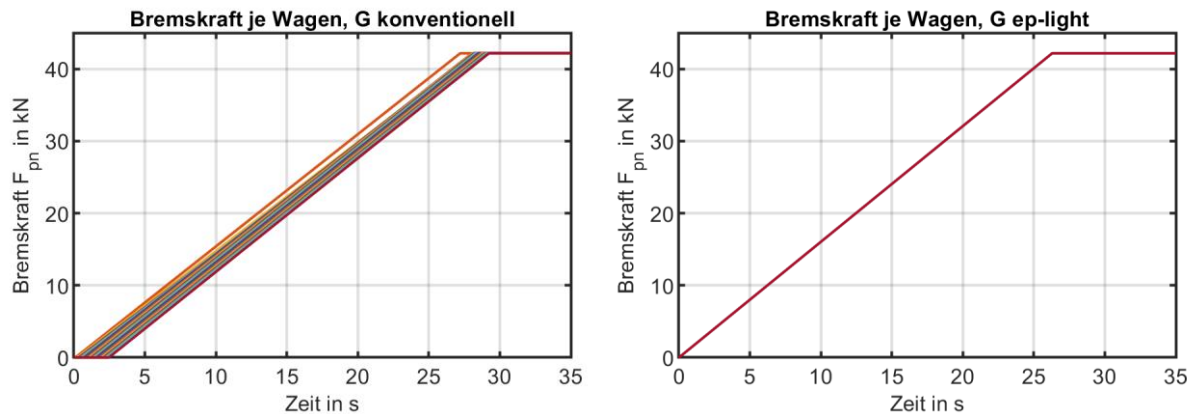


Abbildung 11: Bremskraftaufbau je Güterwagen in Bremsstellung G, links in konventioneller Ausführung, rechts mit ep-light-Ausstattung

Der Abbau beim Lösen der Bremskraft wird in den Abbildungen Abbildung 12 und Abbildung 13 gezeigt. Das Lösesignal erfolgt zum Zeitpunkt $t = 10$ s. Gemäß der Funktionsweise gibt es keinen Unterschied zwischen der herkömmlichen Bremse und der ep-light-Bremse. Im Modell tritt die Durchschlagszeit als Totzeit in Erscheinung. Zusätzlich wird die Abbaurrate kleiner, je weiter hinten ein Wagen im Zug positioniert ist.

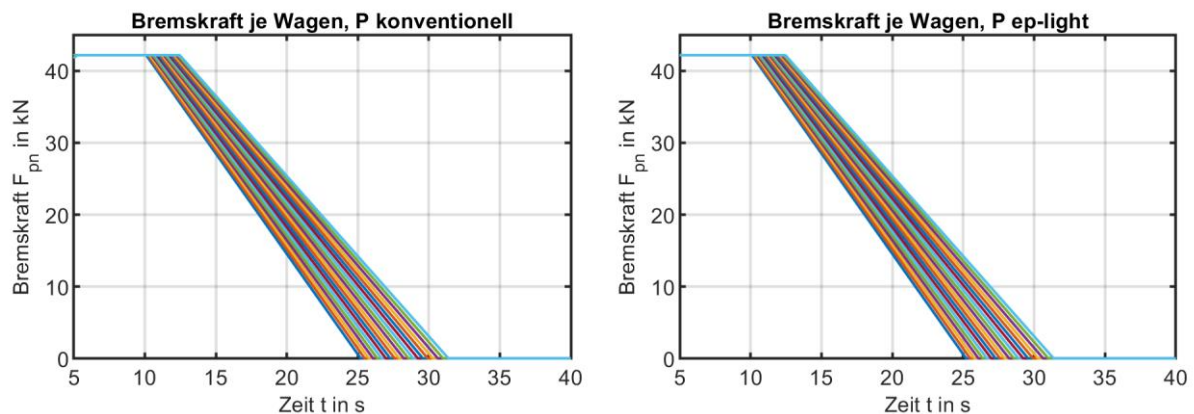


Abbildung 12: Bremskraftaufbau je Wagen des Bremsenmodells in Bremsstellung P, links in konventioneller Bauart, rechts mit ep-light-Ausführung. Lösung bei $t = 10$ s

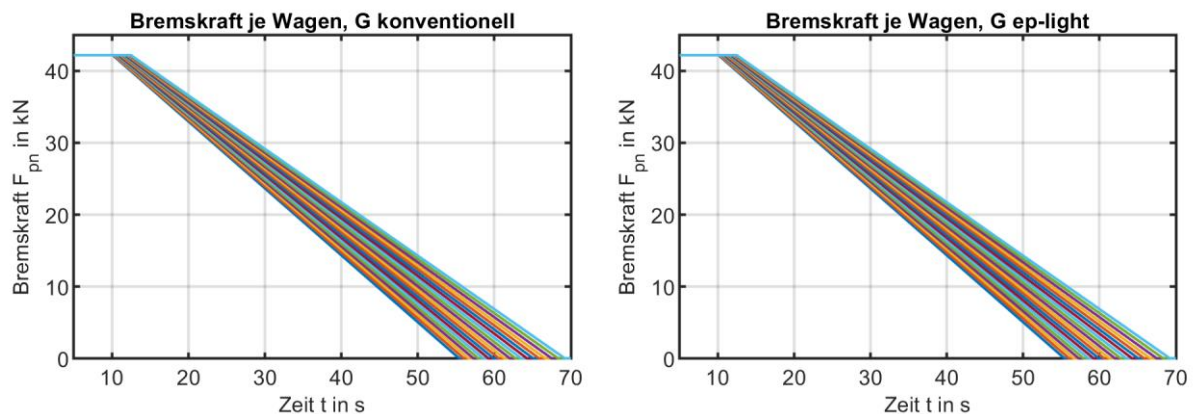


Abbildung 13: Bremskraftaufbau je Wagen des Bremsenmodells in Bremsstellung G, links in konventioneller Ausführung, rechts mit ep-light-Ausstattung. Lösung bei $t = 10$ s

3.2 Gesamtbremskraft des Zugs

Die gesamte Bremskraft des Zugs berechnet sich aus der Addition der Bremskräfte aller Wagen und der Lokomotive. Durch die unterschiedlichen Kraftaufbauzeiten zwischen den Bremsenausführungen ergeben sich mit der ep-light-Bremse verkürzte Kraftaufbauzeiten. In Abbildung 14 sind alle Gesamtbremskräfte vergleichend aufgetragen. Zu sehen ist, dass die Verkürzung in der Bremsstellung P vom Bremsniveau abhängt. So ist bei 90 % der maximalen Bremskraft die Anlegezeit um ca. 14,2 Sekunden reduziert, während sie bei 25 % der Bremskraft etwa 1,9 Sekunden beträgt.

In der Bremsstellung G fällt der Effekt kleiner aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kraftaufbauzeiten mit der ep-light-Bremse nicht wesentlich verbessert werden. Die Verkürzung des Ansprechverhaltens resultiert maßgeblich aus dem Wegfall der Durchschlagszeit, siehe Abschnitt 3.1.

Beim Lösen der Bremse ist aufgrund der Funktionsweise und daraus resultierenden Modellannahmen kein Unterschied zwischen der Bremsenausführung mit und ohne ep-light-System vorhanden, siehe Abbildung 15. Für den Beispielzug ist die Bremse in der Bremsstellung P nach 20 Sekunden gelöst. In der Bremsstellung G vergehen 60 Sekunden bis zum vollständigen Lösen. Die exakten Lösezeiten sind auf die Modellannahmen zurückzuführen, vgl. Abschnitt 2.2.3 und Tabelle 1.

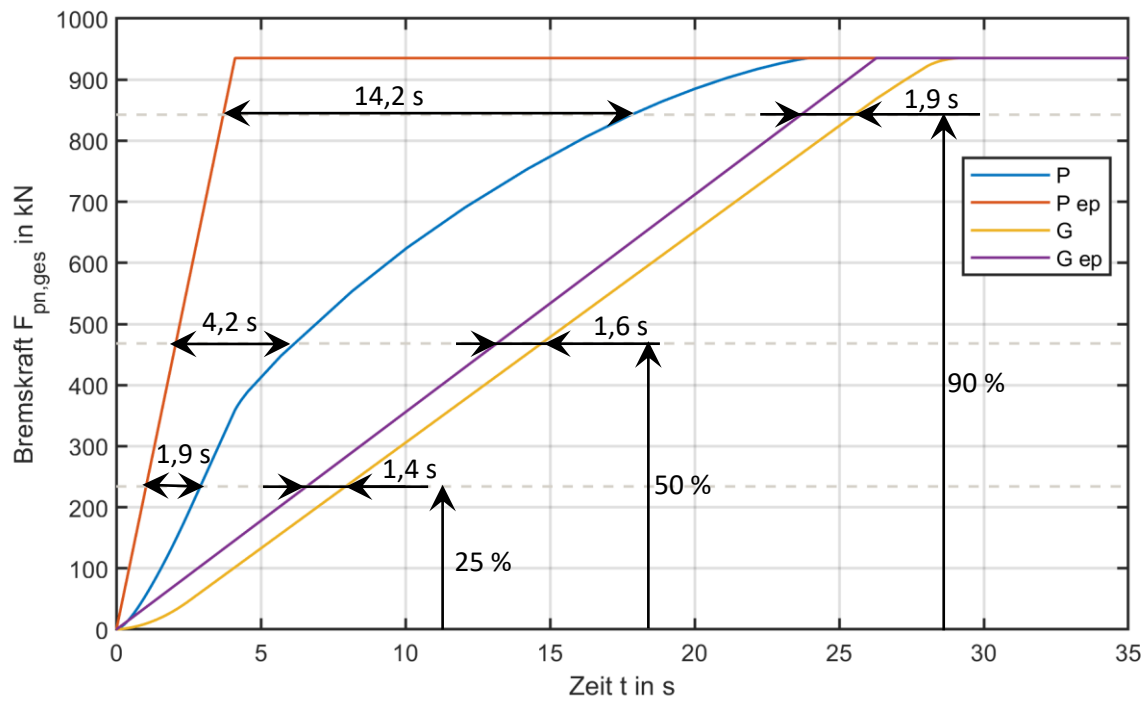


Abbildung 14: Aufbau der gesamten effektiven Bremskraft des Beispielzugs für die Bremsstellungen P und G und beide Bremsenbauarten

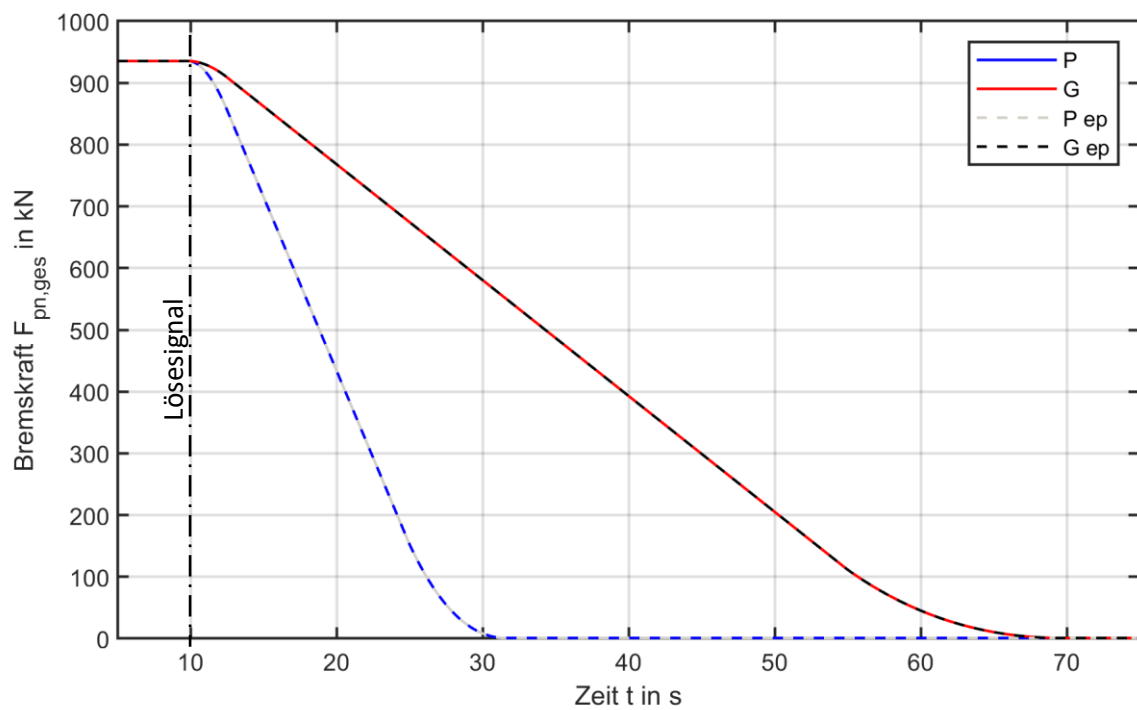


Abbildung 15: Abnahme der gesamten Zugbremskraft beim Lösen der Bremse bei $t = 10$ s für die Bremsstellungen P und G mit und ohne ep-light-Ausrüstung

3.3 Vergleich der Bremsarten bei einer Schnellbremsung

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansprechzeiten wird im Folgenden bei einer Bremsung gegenübergestellt. Es wird eine Bremsung aus 100 km/h bis zum Stillstand für beide Bremsstellungen, jeweils mit und ohne ep-light-Bremse betrachtet. Die Ergebnisse der Simulationen sind in Abbildung 16 dargestellt. In allen Fällen wird die Verzögerung durch die Bremskraft dominiert. Der Einfluss von Luft- und Grundwiderstand fällt demnach im Vergleich zur Bremskraft klein aus.

Durch die ep-light-Bremse kann der Bremsweg in der Stellung P von 620 m auf 478 m reduziert werden. Das entspricht einer Reduktion von 142 m. Der Stillstand wird 5,7 Sekunden früher erreicht.

In der Bremsstellung G fällt die Bremswegverkürzung kleiner aus. Der Anhalteweg wird um 37 m von 783 m auf 745 m verkürzt. Der Bremsvorgang dauert ohne ep-light-Bremse 1,4 Sekunden länger als die Bremsung mit ep-Bremse.

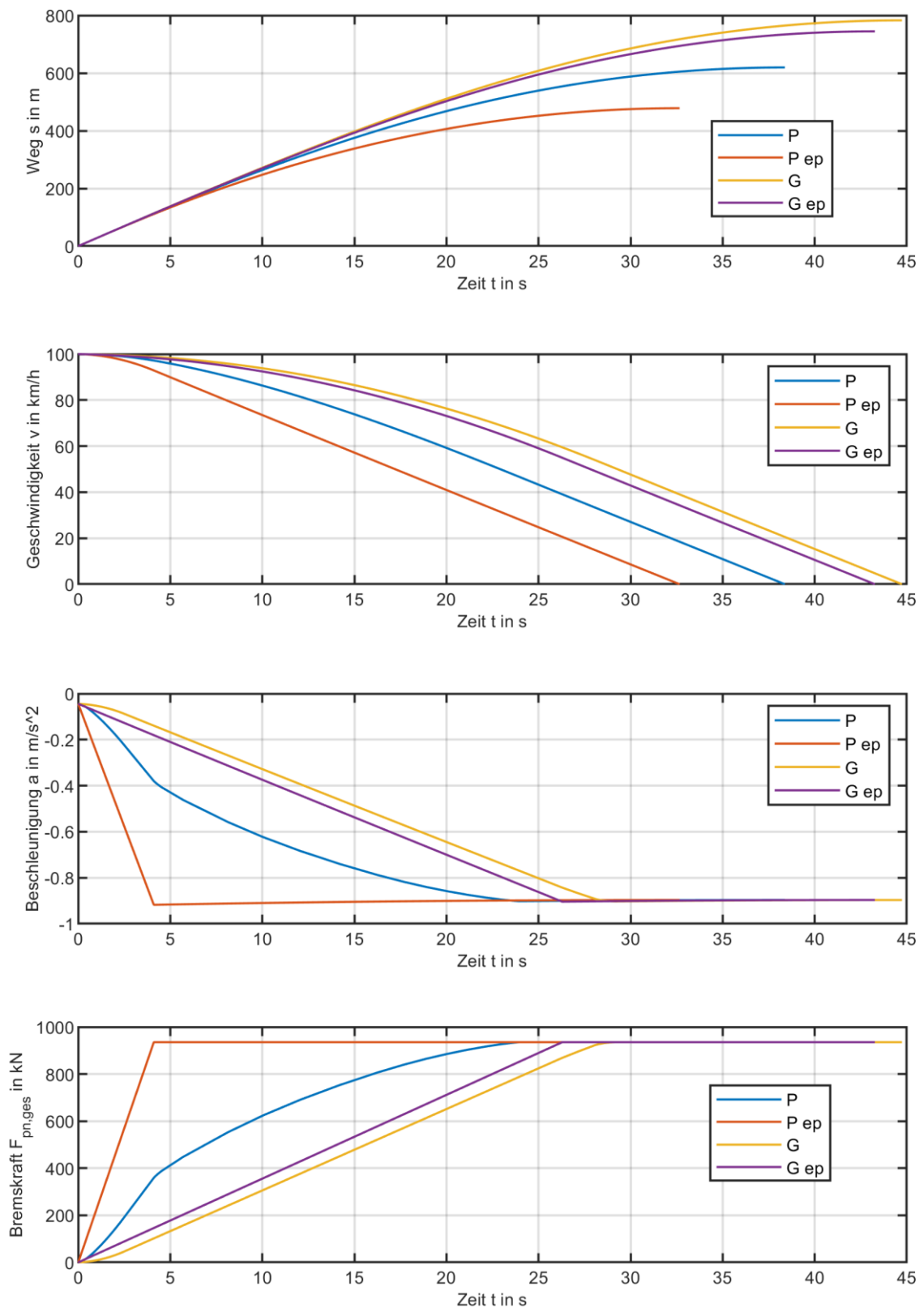


Abbildung 16: Schnellbremsung des Zugmodells aus $v_0 = 100$ km/h bis zum Stillstand in den Bremsstellungen P und G, jeweils in konventioneller Bauart und als ep-light-Ausführung

4 Energieeinsparungspotentiale bei einer Betriebsbremsung

In diesem Kapitel werden die Potentiale zur Energieeinsparung bei Betriebsbremsungen hergeleitet. Es folgen ein quantitativer Vergleich beider Potentiale sowie eine Bewertung der ep-light-Ausstattung hinsichtlich der Energieeinsparungsmöglichkeiten.

4.1 Energetische Analyse einer Betriebsbremsung

Für die energetische Betrachtung einer Betriebsbremsung werden Annahmen getroffen, die mit Abbildung 17 verdeutlicht werden. Die Bremsung wird frühestens beim Weg $s = 0$ durch den Tf eingeleitet. Dabei liegt die Ausgangsgeschwindigkeit bei v_0 . Für die Betriebsbremsung muss die Geschwindigkeit innerhalb des nominalen Bremswegs s_{nB} auf die Sollgeschwindigkeit v_{soll} reduziert werden. Sie kann aber auch um $\Delta v = v_{soll} - v_{min}$ unterschritten werden, was bei einer Überbremsung vorzufinden ist, siehe Abbildung 18. In der Analyse wird die potentielle Energie, wie sie aus Trassensteigungen resultiert, vernachlässigt. Als Bremskräfte treten die Kräfte der pneumatischen Bremse F_{pn} und die bei einer Elektrolokomotive vorhandenen elektrodynamischen Bremskraft F_{ed} auf. Letztere wird zur Bremsenergierückgewinnung genutzt. Weitere Widerstände wie Luft-, Roll-, Krümmungswiderstände werden in der Betrachtung vernachlässigt.

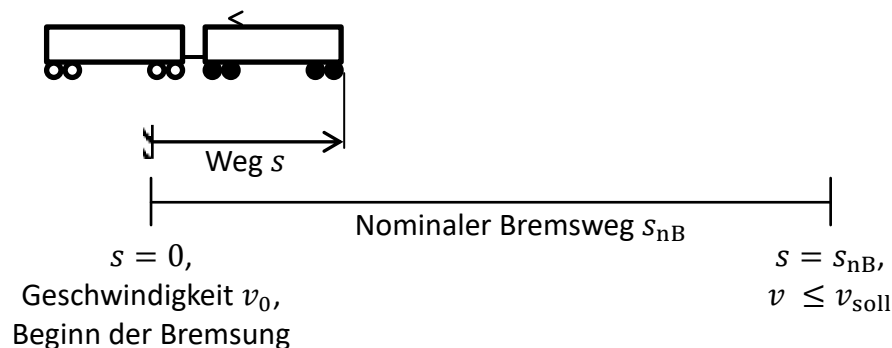


Abbildung 17: Definitionen für die Analyse einer Betriebsbremsung

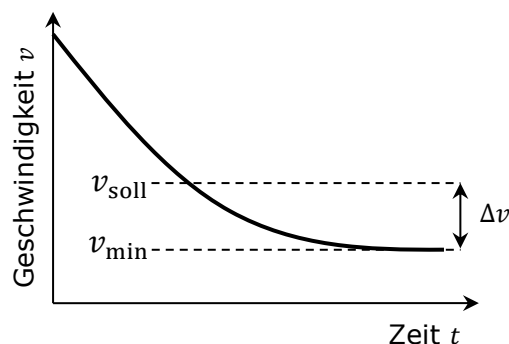


Abbildung 18: Verfehlung der Sollgeschwindigkeit um Δv bei einer Überbremsung

Im Allgemeinen wird dem Zug bei einer Bremsung kinetische Energie entzogen, indem sie in andere Energieformen umgewandelt wird. Dies soll für den Zug genauer analysiert werden.

Der Zug hat vor der Bremsung die Geschwindigkeit v_0 und die dazugehörige kinetische Energie $E_{kin,0}$, vgl. linke Säule in Abbildung 19. Nach einer Bremsung, bei der auch eine Überbremsung stattfindet, liegt das Niveau der kinetischen Energie bedingt durch die Geschwindigkeit v_{min} bei $E_{kin,min}$. Die Differenz zwischen den kinetischen Energien $E_{kin,0}$ und $E_{kin,min}$ lässt sich in die rekuperierte Energie E_{rek} (grün), die in der pneumatischen Bremse umgesetzte Energie E_{pn} (rot) und die Energie $E_{\Delta v}$ der Überbremsung (orange) einteilen.

Die rekuperierte Energie E_{rek} ist die bei der Bremsung zurückgewonnene Bremsenergie. Dazu wird im Allgemeinen der Motor einer Elektrolokomotive in den generatorischen Betrieb umgeschaltet, sodass der Motor eine Bremskraft aufbringt und die Bremsleistung als elektrische Leistung in die Oberleitung zurückspeist.

Die in der pneumatischen Bremse umgesetzte Energie E_{pn} wird durch Reibung zwischen Bremssohle und Rad bzw. Brems Scheibe dissipiert.

Die Energie $E_{\Delta v}$ ist die Differenz der kinetischen Energien von Sollgeschwindigkeit und minimaler Geschwindigkeit, $E_{\Delta v} = \frac{1}{2}m(v_{soll}^2 - v_{min}^2)$. Sie kennzeichnet den bei einer Überbremsung zu viel abgeführten Teil der kinetischen Energie. Im Allgemeinen muss dieser Energieanteil wieder durch Traktion aufgebracht werden, um den Zug auf die Sollgeschwindigkeit zu beschleunigen. Unter der Annahme, dass mit dem Erreichen der Sollgeschwindigkeit die generatorische Bremse ausgeschaltet wird, wird der Energieanteil aus der Überbremsung ebenfalls in der pneumatischen Bremse dissipiert. Damit stellt die Energie $E_{\Delta v}$ einen vermeidbaren Verlust dar. Eine Energieeinsparungsmöglichkeit besteht darin, die Überbremsung bei Betriebsbremsungen zu vermeiden, siehe dritte Säule von links in Abbildung 19.

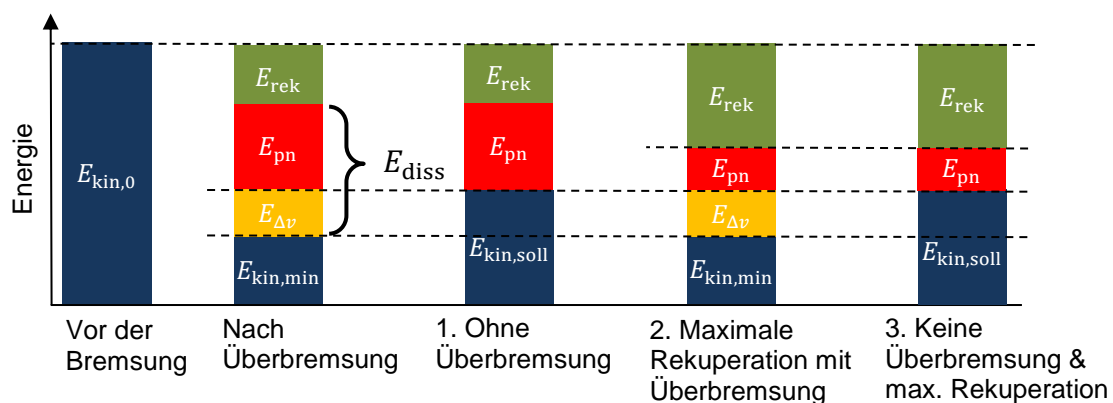


Abbildung 19: Bilanzierung der Energien bei verschiedenen Bremsszenarien

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Anteil der Rekuperation zu maximieren, womit gleichzeitig die in der pneumatischen Bremse dissipierte Energie minimiert wird. Dies ist in der vierten Säule von Abbildung 19 dargestellt.

Werden beide Einsparpotentiale kombiniert, folgt daraus eine energetisch optimale Betriebsbremsung. Sie wird durch die fünfte Säule repräsentiert.

4.2 Verrichtete Arbeit der Bremskräfte

Die von einer Kraft verrichtete Arbeit entspricht der von ihr umgesetzten Energie. Die Arbeit berechnet sich im Allgemeinen aus dem Wegintegral $E = \int F ds$. Dieses Integral wird in einem Kraft-Weg-Schaubild wie in Abbildung 20 durch die Fläche unter dem Graphen repräsentiert. Die umgesetzte Energie lässt sich durch Steigern der Bremskraft und Verlängern des Wegs, an dem die Bremskraft wirksam ist, vergrößern. Für die rekuperierte Energie wird vereinfachend ein Wirkungsgrad von 1 angenommen.

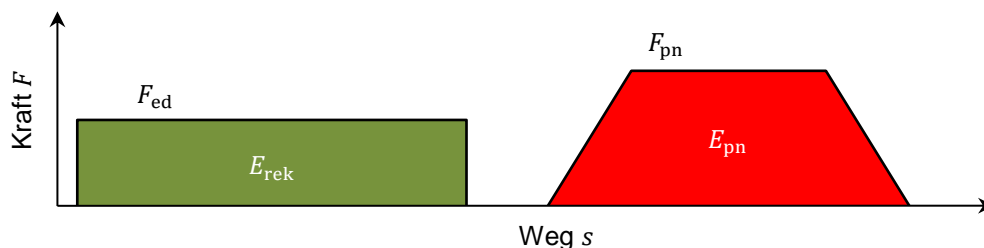


Abbildung 20: Kraft-Weg-Schaubild mit der elektrodynamischen und pneumatischen Bremskraft sowie deren verrichtete Arbeit, repräsentiert durch die farbigen Flächen

Die elektrodynamische Bremskraft ist von der Fahrgeschwindigkeit der Lokomotive abhängig. Auskunft über die Kennlinien geben die Fahrzustandsschaubilder. Abbildung 21 zeigt die Schaubilder exemplarisch für die Baureihen 101 und 145. Für den für Betriebsbremsungen relevanten Geschwindigkeitsbereich – ca. 100 km/h bis 40 km/h – haben beide Baureihen eine konstante Bremskraft. Dementsprechend wird für weitere Betrachtungen von einer konstanten elektrodynamischen Bremskraft ausgegangen, vgl. Abbildung 20.

Die Bremskraft der pneumatischen Bremse baut sich langsam auf und ab, während der Zug bereits einen gewissen Weg zurücklegt. Dieser Umstand wird symbolisch durch die linearen Abschnitte der pneumatischen Bremskraft in Abbildung 20 repräsentiert.

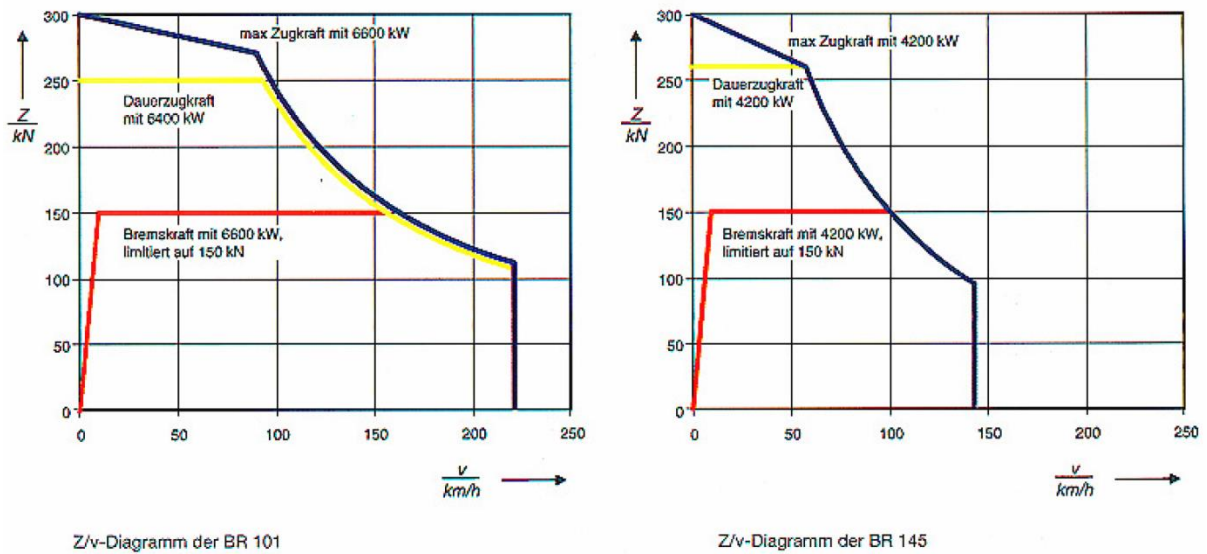


Abbildung 21: Fahrzeugzustandsschaubilder der BR 101 (links) und BR 145 (rechts) mit den Kennlinien der elektrodynamischen Bremse; übernommen aus [7]

4.3 Vermeidung von Überbremsungen

Überbremsungen aufgrund der langsam lösenden Bremse lassen sich vermeiden, indem der Tf die pneumatische Bremse frühzeitig löst und ihm damit viel Zeit verbleibt, die genaue Zielgeschwindigkeit einzustellen. Ein mögliches Szenario ist in Abbildung 22 dargestellt.

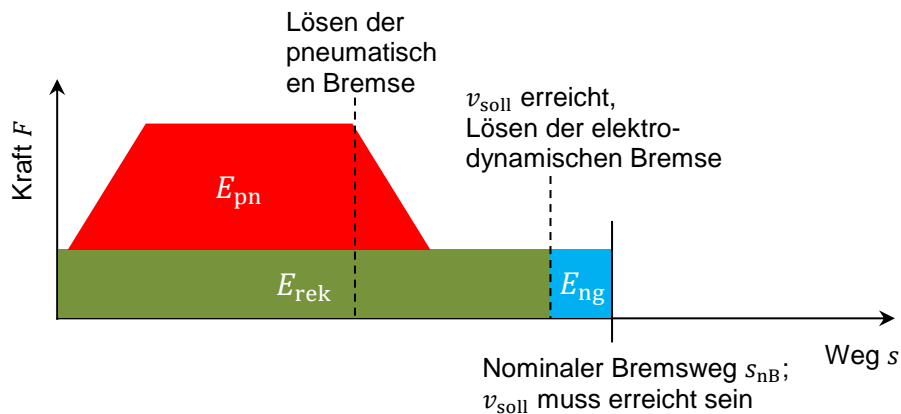


Abbildung 22: Szenario einer Betriebsbremsung ohne Überbremsung durch frühzeitige Geschwindigkeitsreduktion mittels pneumatischer Bremse und genaues Einstellen der Sollgeschwindigkeit mit Hilfe der elektrodynamischen Bremse

Der Tf leitet die Betriebsbremsung mit der schnell ansprechenden elektrodynamischen Bremse ein, um Bremsenergie zurückzugewinnen. Zudem betätigt er frühzeitig die pneumatische Bremse, damit die Geschwindigkeit schnell reduziert wird. Kann er abschätzen, dass ausreichend Energie dissipiert wurde um die Sollgeschwindigkeit innerhalb

des nominalen Bremswegs zu erreichen, löst er die pneumatische Bremse. Über die generatorische Bremse kann anschließend die Zielgeschwindigkeit eingestellt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Zielgeschwindigkeit vor dem Ende des nominalen Bremswegs erreicht wird. Dies hat zur Folge, dass das Potential der Rekuperation nicht vollständig ausgenutzt wird. Die blau eingefärbte Fläche stellt die Energie dar, die nicht zurückgewonnen werden kann. Sie wird E_{ng} (Index ng für nicht genutzt) und entspricht dem Anteil, der zuvor in der pneumatischen Bremse überschüssig umgesetzt wurde.

4.4 Maximierung der Rekuperation

Anhand des Wegintegrals $E_{rek} = \int F_{ed} ds$ wird deutlich, dass die Rekuperation maximal ist, wenn über den gesamten Bremsweg elektrodynamisch gebremst wird. Zu welchem Zeitpunkt pneumatisch zugebremst wird, ist für die Energiebilanz unerheblich, siehe Abbildung 23. Über die Druckluftbremse muss stets die Energiedifferenz

$$E_{kin,0} - (E_{rek} + E_{kin,soll})$$

abgeführt werden.

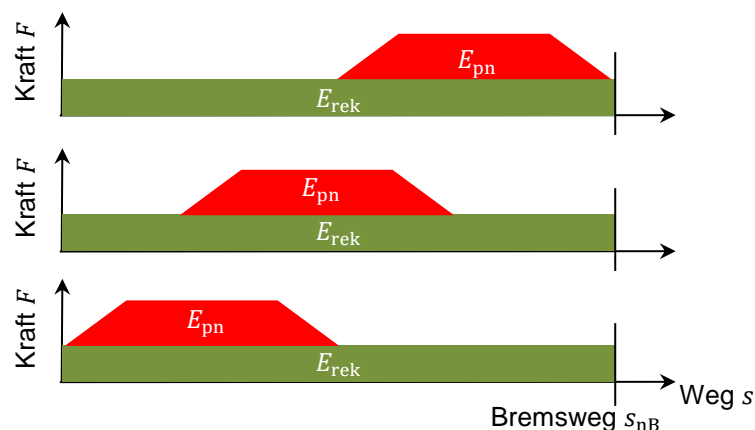


Abbildung 23: Bremszenarien mit maximaler Bremsenergieerückgewinnung

Bei der praktischen Ausführung solcher Betriebsbremsungen ergeben sich die in Abbildung 24 dargestellten Schwierigkeiten. Wird die pneumatische Bremse zu Beginn der Bremsung eingesetzt, kann nicht auf spätere Störeinflüsse wie Trassensteigungen und weitere Fahrwiderstände wie Wind reagiert werden. Sie dissipieren zusätzliche Energie, sodass der nominale Bremsweg nicht ausgereizt werden kann. Dementsprechend sollte im Sinne der Bremswegregelung spät mit der Druckluftbremse zugebremst werden.

Versucht der Tf die Druckluftbremse möglichst spät zu verwenden, besteht die Gefahr, dass diese zu spät eingesetzt wird, wodurch Geschwindigkeitsüberschreitungen auftreten können, Abbildung 24 unten.

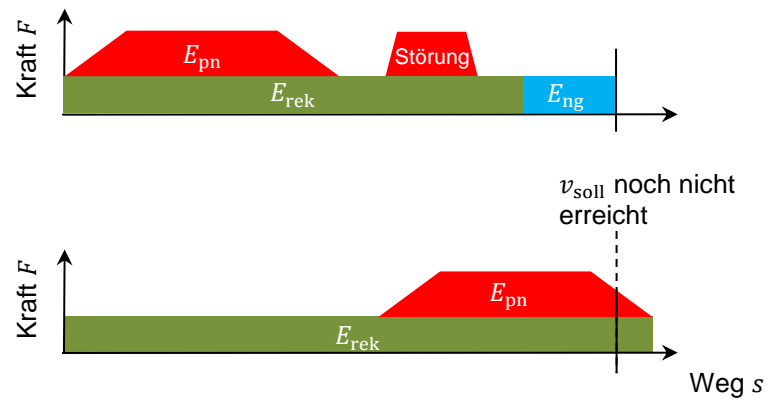


Abbildung 24: Schwierigkeiten bei der Maximierung der Bremsenergierückgewinnung; oben: Nicht genutzter Bremsweg durch Störeinflüsse, auf die beim frühen Zubremsen nicht reagiert werden kann; unten: Geschwindigkeitsüberschreitung durch zu spätes Bremsen mit der pneumatischen Bremse

4.5 Quantitativer Vergleich der Energieeinsparungspotentiale

Beide Energieeinsparungsmöglichkeiten werden quantitativ miteinander verglichen, um abzuschätzen, welche Methode im praktischen Bahnbetrieb ein größeres Einsparungspotential bietet.

Der Energieverlust $E_{\Delta v}$ der Überbremsung berechnet sich wie in Abschnitt 4.1 erläutert über die Gleichung

$$E_{\Delta v} = \frac{1}{2} m (v_{soll}^2 - v_{min}^2).$$

Mit dem Ausdruck $v_{min} = v_{soll} - \Delta v$ wird der Energieverlust zu

$$E_{\Delta v} = \frac{1}{2} m [v_{soll}^2 - (v_{soll} - \Delta v)^2].$$

Der Verlust hängt neben der Masse und der Überbremsung Δv auch von der Zielgeschwindigkeit ab. In Abbildung 25 ist der Energieverlust für die in Abschnitt 0 angegebenen Güterzugparameter als Funktion der Überbremsung aufgetragen.

Für die Rekuperation ergibt sich der Verlust aus dem Produkt von Bremskraft und nicht genutztem Bremsweg s^* . Wird, wie bei den Baureihen 101 und 145 vorzufinden ist, eine effektive maximale Bremskraft von 150 kN angenommen, kann der Verlust und damit die mögliche Energieeinsparung aus Abbildung 26 abgelesen werden.

Beide Mechanismen liefern Energieverluste und damit auch Einsparpotentiale in der gleichen Größenordnung. So liegt der Verlust bei einer Überbremsung um 4 km/h bei der Zielgeschwindigkeit von 60 km/h bei 5,3 kWh. Ein Verlust von 4,2 kWh wird berechnet, wenn 100 m Bremsweg nicht für die generatorische Bremsung verwendet werden.

Demnach müssen beide Mechanismen bei der energetischen Optimierung von Betriebsbremsungen berücksichtigt werden. So ist es z.B. nicht sinnvoll, den Fokus ausschließlich auf die Vermeidung von Überbremsungen zu legen, wenn gleichzeitig der genutzte Bremsweg verkürzt wird. Aus energetischer Sicht sollte die Handlung des Tf so ablaufen, dass die Zielgeschwindigkeit am Ende des nominalen Bremswegs ohne Überbremsung erreicht wird. Der Tf muss damit neben der Geschwindigkeit auch den Bremsweg auf einen optimalen Wert regeln. Die Regelaufgabe des Tf ist damit schwieriger durchzuführen, als eine reine Regelung der Geschwindigkeit.

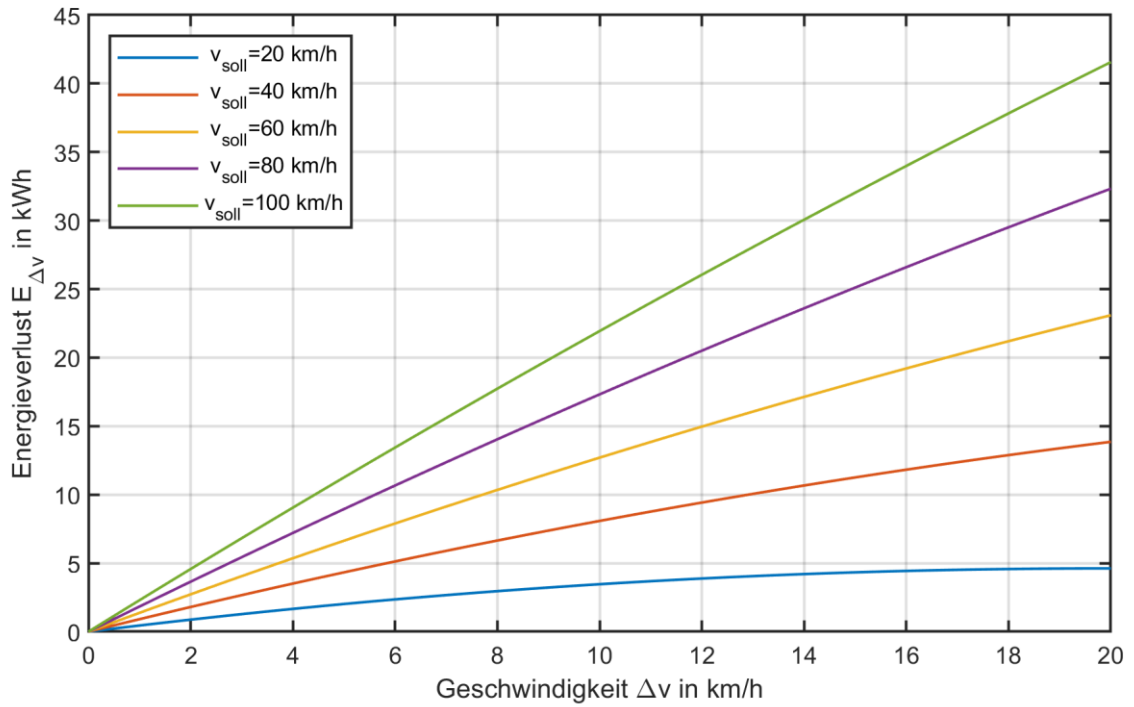


Abbildung 25: Energieverlust für den Beispielzug mit der vergrößerten Masse von 1067 t bei Überbremsungen um den Betrag Δv

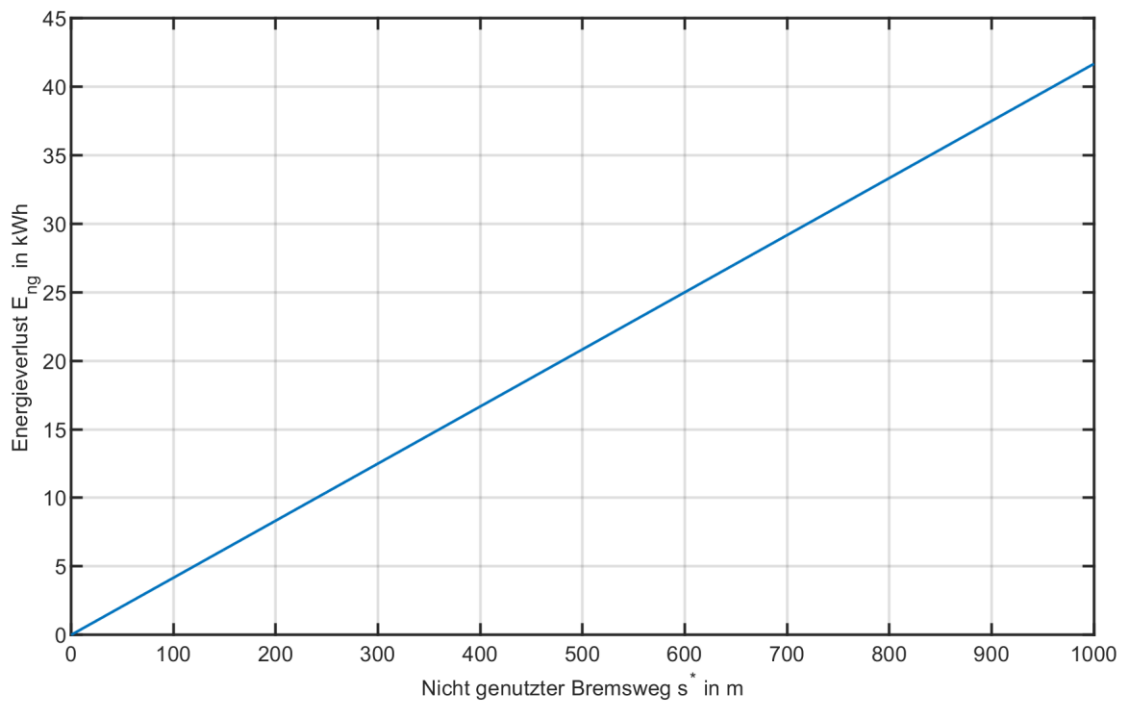


Abbildung 26: Energieverlust durch nicht vollständig genutzte Rekuperation als Funktion des nicht genutzten Bremswegs

4.6 Auswirkungen der ep-light-Bremse

In diesem Abschnitt wird untersucht, inwiefern sich die ep-light-Ausstattung der pneumatischen Bremse auf die Energieeinsparungsmöglichkeiten auswirken.

4.6.1 Überbremsungen

Bei der konventionellen Bauart der Bremse muss der Tf aufgrund des langsamen Löseverhaltens die Bremse bereits vor dem Erreichen der Sollgeschwindigkeit lösen. Bei der in Abbildung 27 dargestellten Betriebsbremsung ohne Überbremsung ist die Bremse bereits um die Zeitspanne $\Delta t_{\text{lösen}}$ vor dem Erreichen der Sollgeschwindigkeit zu lösen, da der Zug in der Zeitspanne weiterhin um die Geschwindigkeit $\Delta v_{\text{lösen}}$ verzögert wird.

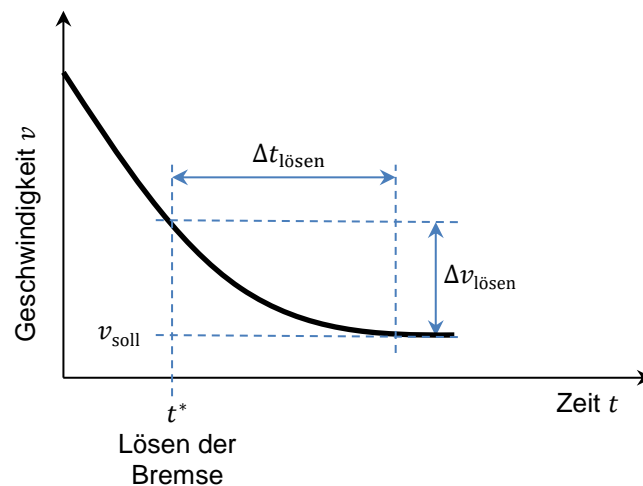


Abbildung 27: Geschwindigkeitsverlauf bei einer Betriebsbremsung ohne Überbremsung

Mit der ep-light-Bremse wird das Löseverhalten der pneumatischen Bremse nicht verändert, weshalb der oben beschriebene Sachverhalt auch für die ep-light-Bremse gilt und der Tf weiterhin vorausschauend handeln muss. Ein Effekt der ep-light-Bremse auf die Vermeidung von Überbremsungen ist daher nicht zu erwarten.

Eine Bremse, die den Tf dabei unterstützt, die Zielgeschwindigkeit genau einzustellen, muss ein verkürztes Löseverhalten aufweisen.

4.6.2 Rekuperation

Die Auswirkung der ep-light-Bremse in verschiedenen Bremsszenarien ist in Abbildung 28 dargestellt, die im Folgenden diskutiert werden.

In der Abbildung oben links ist ein Bremsszenario skizziert, indem die Rekuperation mit beiden Bremsenausführungen vollständig ausgereizt wird. Dies ist dadurch gekennzeichnet,

dass die elektrodynamische Bremse über den gesamten zur Verfügung stehenden Bremsweg s_{nB} wirksam ist. Die restliche Energie muss über die pneumatische Bremse dissipiert werden, unabhängig von der Bremsenbauart und der daraus resultierenden Kraft-Weg-Kurve. Da zwischen der ep-light- und der konventionellen Bremse kein Unterschied im Löseverhalten besteht, findet das Lösen an derselben Stelle statt. Ein Unterschied ist beim Anlegen der Bremse festzustellen. Durch das schnellere Ansprechverhalten kann mit der ep-light-Bremse später pneumatisch zugebremst werden. Daraus ist jedoch kein Vorteil hinsichtlich der Rekuperation abzuleiten.

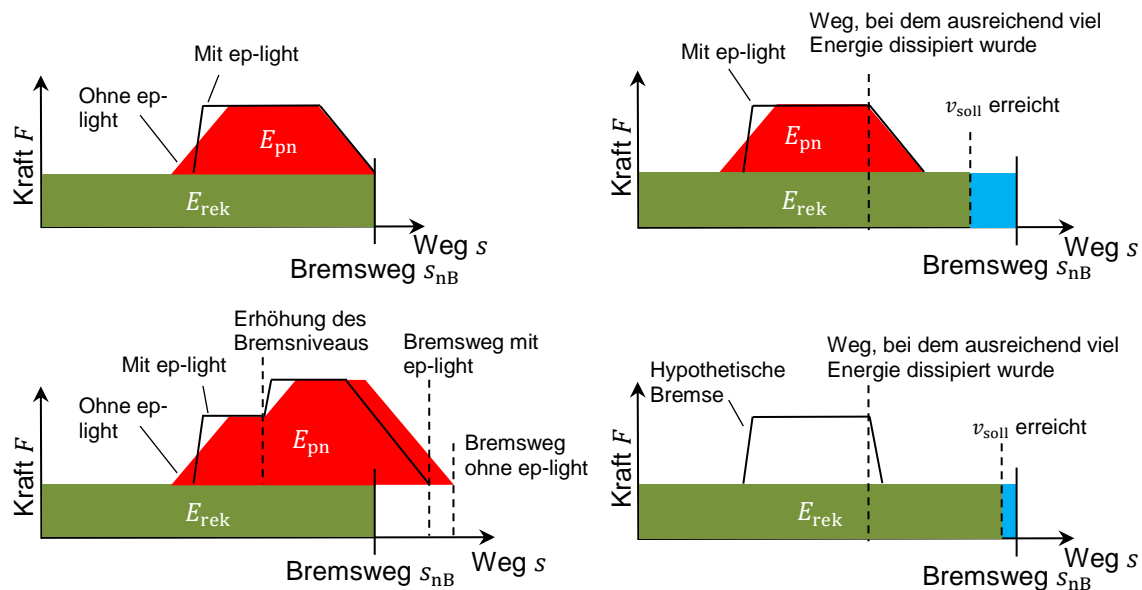


Abbildung 28: Auswirkungen der ep-light-Bremse hinsichtlich der Rekuperation in verschiedenen Bremsszenarien

Das Schema oben rechts in Abbildung 28 zeigt ein Szenario, in dem die Rekuperation nicht vollständig ausgenutzt wird. Zunächst wird rein generatorisch gebremst und anschließend pneumatisch zugebremst, um die Sollgeschwindigkeit innerhalb des Bremswegs zu erreichen. Wird die pneumatische Bremse dann gelöst, wenn bereits eine ausreichende Energiemenge über die Bremse abgeführt wurde, kann der Bremsweg l nicht vollständig ausgenutzt werden, da die pneumatische Bremse nach dem Lösen weiterhin Energie umsetzt. Es wird mehr Energie in der Bremse dissipiert als notwendig. Bedingt durch das gleiche Löseverhalten beider Bremsenausführungen bleibt die überschüssig dissipierte Energiemenge gleich. Dementsprechend ist kein positiver Effekt der ep-light-Bremse zu erwarten.

Im Szenario unten links in Abbildung 28 ist dargestellt, dass das ursprünglich gewählte Bremsniveau der pneumatischen Bremse nicht ausreicht, um die Geschwindigkeit im nominalen Bremsweg zu reduzieren. Wird die Bremskraft nun erhöht, wird mit der ep-light-Bremse mehr Energie als in der konventionellen Bauart umgesetzt. Dementsprechend kann die Bremse auch früher gelöst werden, wodurch sich ein kürzerer Bremsweg ergibt. Aus diesem Sachverhalt kann keine positive Auswirkung auf die Rekuperation abgeleitet werden,

jedoch wird mit der ep-light-Bremse das Sicherheitsniveau erhöht, da die Bremskraft schnell gesteigert werden kann, wenn dies erforderlich ist.

Die Abbildung unten rechts zeigt eine hypothetische Bremse, die ein schnelles Löseverhalten aufweist und nach dem Lösebeginn nur wenig Energie umsetzt. Mit ihr wird weniger überschüssige Energie dissipiert wodurch mehr Bremsenergie rekuperiert werden kann. Mit der Verkürzung der Lösezeit ist demnach eine bessere Ausschöpfung des Rekuperationspotentials abzuleiten.

5 Zusammenfassung und Fazit

In dem vorliegenden Bericht wurde das Zeitverhalten der Druckluftbremse eines Zugs analysiert und in ein Modell überführt, das neben der konventionellen Bremsenausführung auch die ep-light-Bremse abbilden kann. Für einen beispielhaften Güterzug wurde die gesamte effektive Bremskraft für unterschiedliche Bremsstellungen und Bremsausführungen gegenübergestellt. Dabei zeigte sich, dass der Effekt der ep-light-Bremse von der Bremsstellung abhängig ist. In der Stellung P wird das Ansprechverhalten der Bremse signifikant verbessert. Im Gegensatz dazu ist die Auswirkung in der Stellung G als klein zu bewerten. Durch die Funktionsweise der ep-light-Ausstattung wird das Löseverhalten der Druckluftbremse nicht beeinflusst.

Über eine Energiebetrachtung bei einer Betriebsbremsung konnten zwei Möglichkeiten der Energieeinsparungen erkannt werden. Zum einen sollten Überbremsungen, sprich das Unterschreiten der Sollgeschwindigkeit, vermieden werden, damit kinetische Energie nicht unnötigerweise dissipiert wird. Zum anderen sollte in Elektrolokomotiven mit Bremsenergieerückgewinnung der gesamte zur Verfügung stehende Bremsweg ausgenutzt werden, da somit die rekuperierte Energiemenge maximiert wird. Ein quantitativer Vergleich beider Möglichkeiten zeigte, dass beide Einsparungsmechanismen in derselben Größenordnung liegen und damit beide Potentiale bei Betriebsbremsungen berücksichtigt werden sollten. Die ep-light-Bremse zeigt aufgrund ihres unveränderten Löseverhaltens keine Möglichkeiten, die hergeleiteten Energieeinsparungspotentiale auszuschöpfen. Dafür ist eine Bremse notwendig, die schneller mit der vollständigen Lösung auf das entsprechende Signal des Tf reagiert.

Literaturverzeichnis

- [1] DELLMANN, T.: Grundlagen der Fahrzeugtechnik. In: SCHINDLER, C. (Hrsg.): Handbuch Schienenfahrzeuge - Entwicklung, Produktion, Instandhaltung. 1. Aufl. (2014), DVV Media Group GmbH, Hamburg
- [2] KLEEMANN, U.; HAUPT, R.; GALANDER, J.; LOEBNER, R.: Bremssysteme von Schienenfahrzeugen. In: BREUER, B. (Hrsg.); BILL, K. H. (Hrsg.): Bremsenhandbuch-Grundlagen, Komponenten, Systeme, Fahrdynamik. 4. Aufl. (2012), Springer Vieweg, Wiesbaden
- [3] UIC-Merkblatt Nr. 544-1: Bremse – Bremsleistung (2004), Mai., Internationaler Eisenbahnverband, Paris
- [4] WENDE, D.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs. 1 Aufl. (2003), Teubner Verl., Wiesbaden
- [5] N.N.: Technische Daten BR 152. http://www.drehstromloks.de/revisionen_daten/technische_Daten_BR_152.htm. zuletzt geöffnet 29.03.2019
- [6] N.N.: ELH Waggonbau Niesky GmbH/2x2achs. offener Autotransportwagen Laaers/Autotransportwagen/Produkte. https://www.waggonbau-niesky.com/assets/files/downloads/WBN_Datenblatt_2x2achs.%20offener%20Autotransportwagen%20Laaers.pdf. zuletzt geöffnet 21.03.2019
- [7] MINDE, F.: Vorlesung „Schienenfahrzeugtechnik“ IVE Hannover – Grundlagen der Eisenbahnbremstechnik. https://www.ids.uni-hannover.de/fileadmin/IDS/ids_lehre/SFZ/4._Vorlesung_Bremstechnik_2007.pdf. zuletzt geöffnet 21.03.2019

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitverzug beim Bremskraftaufbau der Druckluftbremse; übernommen aus [1].....	8
Abbildung 2: Definitionen am Zugmodell.....	10
Abbildung 3: Aufbau der indirekten pneumatischen Bremse; übernommen aus [2]. (1) Kompressor; (2) Luftbehälter; (3) Führerbremventil; (4) Steuerventil; (5) Vorratsluftbehälter; (6) Bremszylinder.....	11
Abbildung 4: HL- und Bremszylinderdrücke in ausgewählten Wagen bei einer Schnellbremsung eines 750 m langen Zugs mit 52 Wagen in Bremsstellung P (links) und G (rechts); übernommen aus [2] und mit Anmerkung versehen.....	12
Abbildung 5: ep-light-Bremsenausstattung durch Erweiterung der Wagen um elektrisch angesteuerte Entlüftungsventile zur schnelleren Entlüftung der HL; modifizierte Abbildung auf Basis von [2].....	12
Abbildung 6: Charakteristik der Bremskraft im Modell.....	13
Abbildung 7: Bremszylinderdrücke in Bremsstellung P (links) und G (rechts) mit der linearen Regression zur Ermittlung der Kraftaufbaugradienten für Wagen, zu denen die Daten in [2] vorliegen.....	14
Abbildung 8: Normierte Kraftaufbaurrate als Funktion des Abstands d zur Lokomotive.....	14
Abbildung 9: Annahme des Bremskraftzeitverhaltens in Stellung P für die Bestimmung der maximalen Bremskraft aus dem Bremsgewicht.....	15
Abbildung 10: Bremskraftaufbau je Güterwagen in Bremsstellung P, links in konventioneller Ausführung, rechts mit ep-light-Ausstattung.....	19
Abbildung 11: Bremskraftaufbau je Güterwagen in Bremsstellung G, links in konventioneller Ausführung, rechts mit ep-light-Ausstattung.....	20
Abbildung 12: Bremskraftaufbau je Wagen des Bremsenmodells in Bremsstellung P, links in konventioneller Bauart, rechts mit ep-light-Ausführung. Lösung bei $t = 10 \text{ s}$	20

Abbildung 13: Bremskraftaufbau je Wagen des Bremsenmodells in Bremsstellung G, links in konventioneller Ausführung, rechts mit ep-light-Ausstattung. Lösung bei $t = 10 \text{ s}$	21
Abbildung 14: Aufbau der gesamten effektiven Bremskraft des Beispielzugs für die Bremsstellungen P und G und beide Bremsenbauarten.....	22
Abbildung 15: Abnahme der gesamten Zugbremskraft beim Lösen der Bremse bei $t = 10 \text{ s}$ für die Bremsstellungen P und G mit und ohne ep-light-Ausrüstung.....	22
Abbildung 16: Schnellbremsung des Zugmodells aus $v_0 = 100 \text{ km/h}$ bis zum Stillstand in den Bremsstellungen P und G, jeweils in konventioneller Bauart und als ep-light-Ausführung.....	24
Abbildung 17: Definitionen für die Analyse einer Betriebsbremsung	25
Abbildung 18: Verfehlung der Sollgeschwindigkeit um Δv bei einer Überbremsung.....	25
Abbildung 19: Bilanzierung der Energien bei verschiedenen Bremsszenarien.....	26
Abbildung 20: Kraft-Weg-Schaubild mit der elektrodynamischen und pneumatischen Bremskraft sowie deren verrichtete Arbeit, repräsentiert durch die farbigen Flächen.....	27
Abbildung 21: Fahrzustandsschaubilder der BR 101 (links) und BR 145 (rechts) mit den Kennlinien der elektrodynamischen Bremse; übernommen aus [7]	28
Abbildung 22: Szenario einer Betriebsbremsung ohne Überbremsung durch frühzeitige Geschwindigkeitsreduktion mittels pneumatischer Bremse und genaues Einstellen der Sollgeschwindigkeit mit Hilfe der elektrodynamischen Bremse	28
Abbildung 23: Bremsszenarien mit maximaler Bremsenergieerückgewinnung	29
Abbildung 24: Schwierigkeiten bei der Maximierung der Bremsenergieerückgewinnung; oben: Nicht genutzter Bremsweg durch Störeinflüsse, auf die beim frühen Zubremsen nicht reagiert werden kann; unten: Geschwindigkeitsüberschreitung durch zu spätes Bremsen mit der pneumatischen Bremse	30
Abbildung 25: Energieverlust für den Beispielzug mit der vergrößerten Masse von 1067 t bei Überbremsungen um den Betrag Δv	32

Abbildung 26: Energieverlust durch nicht vollständig genutzte Rekuperation als Funktion des nicht genutzten Bremswegs.....	32
Abbildung 27: Geschwindigkeitsverlauf bei einer Betriebsbremsung ohne Überbremsung ..	33
Abbildung 28: Auswirkungen der ep-light-Bremse hinsichtlich der Rekuperation in verschiedenen Bremsszenarien	34
Abbildung 29: Auszug aus [5] mit technischen Daten zur BR 152.....	42
Abbildung 30: Datenblatt des Güterwagen vom Typ Laaers aus [6].....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lösezeiten der Bremse in Abhängigkeit der Bremsstellung aus [2]	14
Tabelle 2: Parameter für das Bremsenmodell für verschiedene Bremsstellungen und Bauarten	16
Tabelle 3: Daten und Parameter des Beispielzugs	17
Tabelle 4: Eigenschaften des Zugmodells	18

Anhang

Technische Daten BR 152 http://www.drehstromloks.de/revisionen_daten/technische_Daten_BR...

[Home](#)

technische Daten BR 152



Spurweite	1435 mm
Achsanordnung	Bo' Bo'
Länge (über Puffer)	19 580 mm
Höchstgeschwindigkeit	140 km/h
Dienstmasse	87 t
Leistung max.	6400 kW
max. elektrische Bremskraft	150 kN (15t)
Oberspannungen/Frequenz	15 kV / 16 2/3Hz
Bauart der Bremsen	KE-GPR-E mZ (D) (ep)
Bremsgewichte:	
R+E	145 t
R	125 t
P	103 t
G	90 t
Sifa	Zeit-Zeit
Zugbeeinflussungssysteme	LZB 80/16 mit PZB 90

Abbildung 29: Auszug aus [5] mit technischen Daten zur BR 152

WBN Waggonbau Niesky GmbH

2x2achs. Doppelstock-Autotransportwageneinheit Laaers



Tradition seit 1835



TECHNISCHE DATEN

Ladenlänge obere Ladeebene
30.550 mm

Ladenlänge untere Ladeebene
30.070 mm

Eigenmasse
29,6 t

Zuladung, obere & untere Ladeebene
18,0 t

Radlast der Kraftfahrzeuge
1,0 t

Radsatzlast Einheitsende
18,0 t

Radsatzlast Einheitsmitte
16,0 t



Die offene Fahrzeugeinheit ist für den Transport von PKW und Transportern, die über eine Kopframpe selbstständig auffahren und über mehrere Wageneinheiten fahren können, geeignet. Die Höhe der oberen Ladeplattform ist stufenlos einstellbar und garantiert so eine universelle Einsetzbarkeit.

WBN Waggonbau Niesky GmbH
 Am Waggonbau 11 • 02906 Niesky
 Tel. +49 / 3588 24-0 | Fax +49 / 3588 24-5657

info@waggonbau-niesky.com
www.waggonbau-niesky.com

MADE IN GERMANY

Abbildung 30: Datenblatt des Güterwagen vom Typ Laaers aus [6]