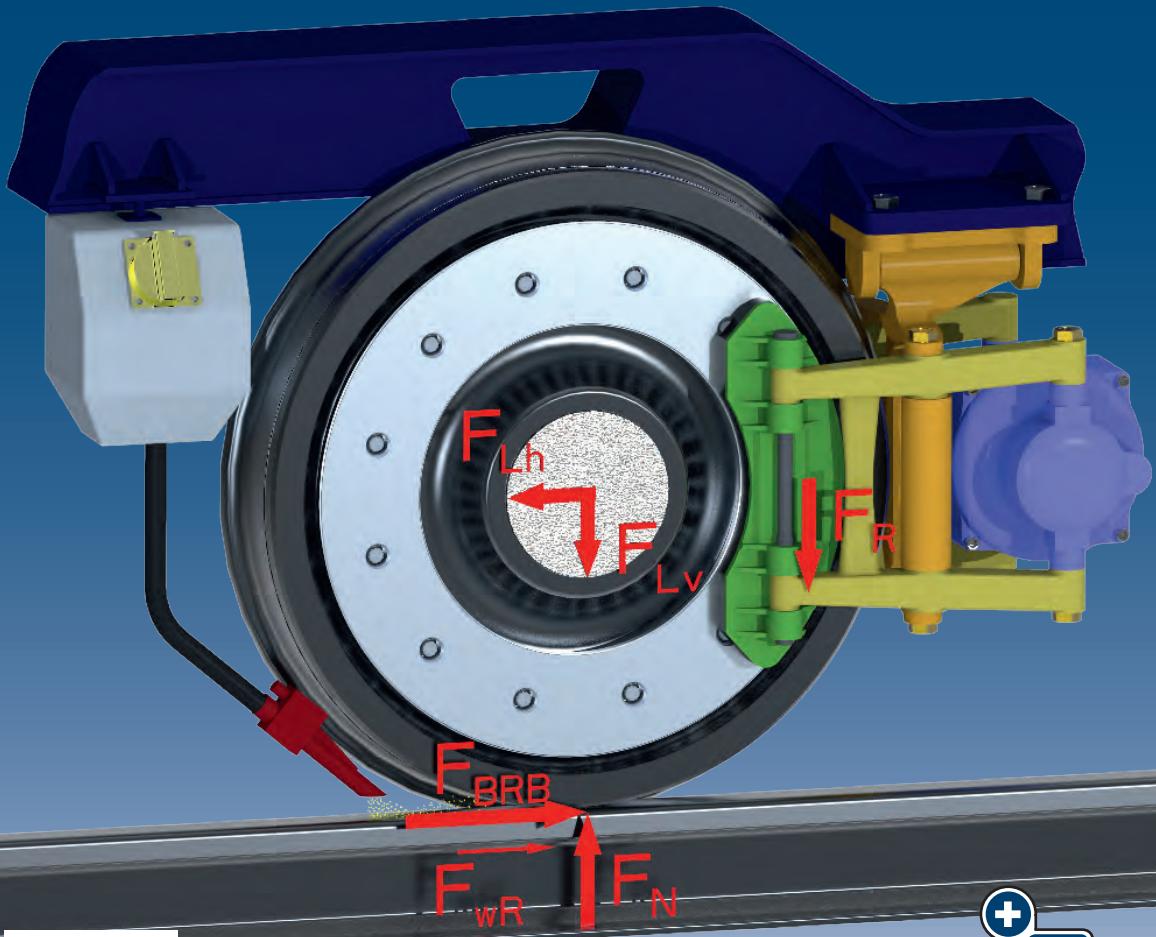


Dieter Jaenichen (Hrsg.)

HANDBUCH Bremstechnik von Eisenbahnfahrzeugen

Theorie · Konstruktion · Betriebseinsatz



HANDBUCH

Bremstechnik

von Eisenbahnfahrzeugen

Theorie · Konstruktion · Betriebseinsatz

Herausgeber

Dr.-Ing. Dieter Jaenichen

Autoren

Dipl.-Ing. Maik Bähr

Dr.-Ing. Peter Berger

Dr. Frank Günther

Dipl.-Phys. Sebastian Heinz

Dr.-Ing. Martin Heller

Dr.-Ing. Dieter Jaenichen

Dipl.-Ing. (EUR ING) Jürgen Mallikat

Dipl.-Ing. Frank Minde

Dr.-Ing. Olivera Pavlovic

Dipl.-Ing. Stefan Reinicke

Dr.-Ing. Stefan Schneider

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

Verlag: GRT Global Rail Academy and Media GmbH
Werkstättenstraße 18
D-51379 Leverkusen

Office Hamburg: Frankenstraße 29, D-20097 Hamburg
Tel.: +49 (0) 40 228679 506
Fax: +49 (0) 40 228679 503
Web: www.trackomedia.com
E-Mail: office@globalrailmedia.com

Geschäftsführer: Detlev K. Suchanek
Lektorat: Alexandra Schöner (verantw. Leitung),
Kerstin Zapp
Vertrieb und Buchservice: Sabine Braun

Titelillustration: Knorr-Bremse Systeme für
Schienenfahrzeuge GmbH/Alexander Brynzov

Satz und Druck: TZ-Verlag & Print GmbH, Roßdorf

© 2023 GRT Global Rail Academy and Media GmbH
1. Auflage 2023

ISBN 978-3-96245-259-9

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen jeder Art, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeisung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Trotz sorgfältiger Recherche war es leider nicht in allen Fällen möglich, die Urheber der Bilder zu ermitteln. Sollten ohne Absicht Bilder in unerwünschter Weise veröffentlicht worden sein, teilen Sie dies bitte dem Verlag mit.

Eine Publikation von



TrackoMedia ist die Verlagsmarke der
GRT Global Rail Academy and Media GmbH.

Vorwort

Ein einheitlicher europäischer Eisenbahnverkehr erfordert interoperable Fahrzeuge, die ohne Einschränkungen bei einer variablen Zugbildung eingesetzt werden können. Ihre Leistungsmerkmale werden in europäischen Regelwerken dokumentiert und beinhaltet unter anderem Angaben zur Bremstechnik und zum Bremsbetrieb. Bremsen leisten einen entscheidenden Beitrag für die Sicherheitsarchitektur des Eisenbahnbetriebs. Die europäischen Regelwerke ermöglichen unterschiedliche Bauausführungen für Bremsen, angepasst an den Betriebseinsatz der Fahrzeuge. Da die Anforderungen an den Bahnbetrieb stetig steigen, werden Bremsen laufend weiterentwickelt. Dies führt zu einer Vielzahl von Bremsausführungen an Neubaufahrzeugen im Bahnbetrieb, was bei der betrieblichen Verwendung der Bremsen jeweils spezielle Sachkenntnisse erfordert.

Mit diesem Fokus und den Erfahrungen aus meiner langjährigen selbstständigen Lehr- und Forschungstätigkeit an der TU Dresden, meiner langjährigen Gutachtertätigkeit als benannter Bremsen-Fachexperte für Inspektions- und Zertifizierungsstellen sowie Prüflaboratorien für Produkte, Prozesse und Dienstleistungen im Fachgebiet Schienenverkehr bei der Deutschen Akkreditierungsstelle Dakks sowie einer mehrjährigen Tätigkeit als Sachverständiger des Eisenbahn-Bundesamts für Bremstechnik im Sachgebiet Fahrzeuge entstand ein neuartiges Werk, das die Einheit von Bremstechnik und betrieblichem Einsatz in den Mittelpunkt stellt.

Das Wissen rund um die verschiedenen Brems- und Einsatzarten wird anhand von Beschreibungen, Formeln und Beispielrechnungen vermittelt. In den Kap. 1 bis 7 liegen die Schwerpunkte auf den physikalischen Grundlagen, der Architektur der Bremsen, der Energieumwandlung, den Bauausführungen zu Bremssteuerungen und -regelungen, der Projektierung für bestimmte Fahrzeuge und der bremstechnischen Prüfung.

Kap. 8 richtet den Blick auf die Sicherung der Zugfolge aus bremstechnischer Sicht. Ausgehend vom konventionellen Bahnbetrieb wird die Rolle der Bremstechnik unter Einsatz des Zugbeeinflussungssystems ETCS sowie bei Fahrten mit ATO dargelegt, womit eine Lücke in der Fachliteratur geschlossen wird.

Als Herausgeber konnte ich für das Fachbuch ausgewiesene Bremsenexperten mit jeweils langjähriger Berufserfahrung gewinnen, die mit großem Engagement neben ihrer beruflichen Tätigkeit ihr Wissen in den verschiedenen Kapiteln niedergeschrieben haben.

Mein Dank gilt den Lektorinnen Frau Schöner vom Verlag sowie Frau Zapp mit ihren ausgewiesenen Fertigkeiten und ihrer Akribie bei der Gestaltung des Handbuchs. Beim Verlagsleiter Herrn Suchanek bedanke ich mich für die Förderung dieses Fachbuchs.

Und schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie, die immer Verständnis für meine Freizeitarbeit zeigte.

Dieter Jaenichen

Dresden, November 2023

Hinweise zur Nutzung:

Neben gesetzlichen Rahmenbedingungen werden in diesem Werk technische Grundregeln mithilfe von Normen und Regelwerken diskutiert. Diese unterliegen einem zeitlichen Wandel, weshalb immer auf das hinterlegte Ausgabedatum einer Quelle zu achten ist. Der Anwender muss zudem die konkreten Bedingungen seines Schienenfahrzeugs, die von den Annahmen im Buch abweichen können, kennen und beachten. Die Verwendung dieses Werks entbindet also nicht von der Einhaltung aktueller Regelungen, ggf. auch solchen, die nicht explizit genannt sind.

Aus Gründen der Lesbarkeit wird in diesem Werk bei Personen- und Funktionsbeschreibungen nur die männliche Form verwendet, auch wenn alle Geschlechter gemeint sind.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
---------------------	----------

1 Bahnbetrieb	11
1.1 Sicherer Bahnbetrieb.....	12
1.2 Allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen an die Fahrzeugbremsen....	14
1.3 Sicherer Bahnbetrieb im europäischen Kontext	15
2 Architektur der Bremsen	20
2.1 Aufgaben.....	20
2.2 Einteilung und Charakterisierung.....	22
2.3 Bremsen für charakterisierte Umweltbedingungen	26
3 Technische Mechanik beim Bremsen von Schienenfahrzeugen	30
3.1 Einführung.....	30
3.2 Kräfte und Verzögerungen	31
3.2.1 Grundlagen.....	31
3.2.2 Kräfte auf das Schienenfahrzeug beim Bremsen	32
3.2.3 Kräfte am gebremsten Rad mit Scheibenbremse	33
3.2.4 Kräfte am gebremsten Rad mit Klotzbremse	35
3.2.5 Die Fahrzeug- und Zugwiderstandskraft.....	37
3.3 Grundlegende Gleichungen der Fahrdynamik	39
3.3.1 Verzögerung und Bremsweg.....	39
3.3.2 Energetische Größen	44
3.4 Abschätzungen von Anhaltewegen	46
3.4.1 Vorgehensweise.....	46
3.4.2 Berechnungsbeispiel (Einzelwagen).....	47
3.4.3 Anhalteweg eines Zugs.....	48
3.5 Mechanische Prüfstände	49
3.5.1 Reibungsprüfstände (Dynamometer)	49
3.5.2 Rad/Schiene-Prüfstände für Bremsenprüfungen	51

3.6	Längsdynamik von Zügen beim Bremsen	54
3.6.1	Entstehung der Längsdruckkräfte beim Bremsen.....	55
3.6.2	Betriebliche Aspekte zur Beeinflussung der Längskräfte.....	57
3.6.3	Berechnung der Längskräfte.....	57
3.7	Kontaktmechanik zwischen Rad und Schiene	60
3.7.1	Grundlagen.....	60
3.7.2	Kraftschluss Rad/Schiene beim Bremsen.....	62
3.7.3	Kraftschlussausnutzung	63
3.7.4	Optimierung des Kraftschlusses.....	64
4	Bremsarbeitssysteme	67
4.1	Klotzbremse	67
4.1.1	Allgemeines, Wirkprinzip	67
4.1.2	Material, Reibwerte	68
4.1.3	Bauformen.....	70
4.1.4	Leistungsgrenzen.....	71
4.1.5	Bremszylinderkonstruktionen	72
4.1.6	Bremsgestänge	73
4.1.7	Hand- und Feststellbremsen	76
4.1.8	Auslegung von Güterwagen	79
4.2	Scheibenbremse.....	80
4.2.1	Allgemeines, Wirkprinzip	80
4.2.2	Material, Reibwerte	81
4.2.3	Bauformen.....	82
4.2.4	Leistungsgrenzen.....	86
4.2.5	Hand- und Feststellbremsen	88
4.2.6	Bremszylinder- und Bremsgestängekonstruktionen.....	88
4.2.7	Hydraulische Bremsaktuatoren	90
4.2.8	Elektromechanische Bremsaktuatoren	90
4.2.9	Bauausführungen	91
4.3	Elektrodynamische Bremse (E-Bremse).....	92
4.3.1	Allgemeines, Wirkprinzip	92
4.3.2	Kollektormotoren	94
4.3.3	Drehstrom-Asynchronmotor.....	96
4.3.4	Permanenterregter Synchronmotor	99
4.3.5	Dieseletelektrische Fahrzeuge	100

Inhaltsverzeichnis

4.4	Hydrodynamische Bremse (H-Bremse)	101
4.4.1	Allgemeines, Wirkprinzip	101
4.4.2	Kennlinien	102
4.4.3	Ausführungsformen.....	103
4.5	Magnetschienenbremse (Mg-Bremse)	104
4.5.1	Allgemeines, Wirkprinzip	104
4.5.2	Material, Kenngrößen.....	107
4.5.3	Konstruktive Auslegung	110
4.6	Wirbelstrombremse	110
4.6.1	Allgemeines	110
4.6.2	Lineare Wirbelstrombremse (LWB)	110
4.6.3	Rotierende Wirbelstrombremse (RWB)	114
4.7	Aerodynamische Bremse	115
5	Bremssteuerungen/-regelungen.....	118
5.1	Hauptfunktionen von Bremssteuerungen/-regelungen.....	118
5.1.1	Informationserzeugung (Erfassung der Bremskraftanforderungen).....	118
5.1.2	Informationsübertragung (Bremsbefehlsübertragung)	119
5.1.3	Informationsverarbeitung/-umsetzung (lokale Bremskrafterzeugung)	121
5.2	Pneumatische Steuerungen	121
5.2.1	Wirkprinzipien	121
5.2.2	HLL-gesteuerte selbsttätige indirekte Druckluftbremse.....	122
5.2.3	HLL-gesteuerte Saugluftbremse (Vakumbremse).....	123
5.2.4	Direkte nicht selbsttätige Druckluftbremse.....	124
5.2.5	Direkte nicht selbsttätige Druckluftzusatzbremse.....	124
5.3	Ansteuerung von Feststellbremsen	125
5.3.1	Ausführungen	125
5.3.2	Bedienbare Federspeicherbremsen.....	126
5.3.3	Nicht bedienbare Federspeicherbremsen.....	128
5.4	Elektropneumatische Bremssteuerungen	128
5.4.1	Direkte elektrisch-pneumatische Bremse	128
5.4.2	Elektronisch gesteuertes pneumatisches Güterzugbremssystem (ECP-System)....	130
5.4.3	Indirekte elektropneumatische Bremse für HLL-gesteuerte Fahrzeuge im UIC-Bereich	131

5.5	Fahrgastalarmsystem und Überbrückung von Zwangsbremsungen des Fahrgastalarmsystems	132
5.6	Ansteuerung und Überwachung von Magnetschienenbremsen	134
5.6.1	Ansteuerung von Magnetschienenbremsen.....	134
5.6.2	Überwachung von Magnetschienenbremsen	136
5.7	Ansteuerung und Überwachung von Wirbelstrombremsen.....	136
5.7.1	Ansteuerung von Wirbelstrombremsen	136
5.7.2	Überwachung von Wirbelstrombremsen	140
5.8	Steuerventile	141
5.8.1	Wirkprinzipien	141
5.8.2	Funktionsweise einlösiger Steuerventile.....	142
5.8.3	Funktionsweise mehrlösiger Steuerventile	143
5.8.4	Vereinfachte Steuerventile	145
5.8.5	Umschaltung Bremsstellung G/P	145
5.9	Relaisventile.....	146
5.10	Lastabbremsung.....	147
5.11	Betätigungsseinrichtungen	150
5.11.1	Bedienphilosophien für Sollwertsteller	150
5.11.2	Führerbremsventil (FbrV)	151
5.11.3	Fahr-/Bremshebel	157
5.11.4	Bremshebel für direkte Zusatzbremse	158
5.11.5	Notschlagtaster	158
5.12	Gleitschutz	158
5.12.1	Grundaufbau und -funktionen der Regelung	158
5.12.2	Regelungsprinzipien.....	159
5.12.3	Zusammenspiel von Gleitschutzeinrichtungen der Reibungs- und der dynamischen Bremse	161
5.12.4	Rollüberwachung	161
5.13	Rahmenbedingungen für die Bremskraftaufteilung und Blending-Verfahren	161
5.14	Zusammenspiel der Leittechnik mit den Bremssteuerungen.....	162
5.14.1	Strukturen von Bussystemen und Steuerleitungen	162
5.14.2	Blending-Verfahren	163
5.14.3	Bremskraftaufteilung	165
5.14.4	Hierarchien des Bremskraftmanagements.....	166
5.14.5	Zentrale zugverbandsweite Bremsmanagementfunktionen (Ebene 1)	167
5.14.6	Dezentrale Bremsmanagementfunktionen (Ebene 2)	168

Inhaltsverzeichnis

5.14.7	Lokale Bremsfunktionen zur Ansteuerung/Regelung der Aktuatoren (Ebene 3).....	168
5.14.8	Zugverbandsweite und zugteilseparate Bremskraftaufteilung	168
5.14.9	Lokale fahrzeugweise Berechnung der Bremssollwerte	170
5.14.10	Typische Steuergeräte im Zusammenhang mit Bremsfunktionen.....	171
6	Auslegung der Bremse.....	174
6.1	Rechnerische Nachweisführung für das Bremsvermögen (Bremsberechnung)	174
6.1.1	Zweck der Bremsberechnung	174
6.1.2	Anforderungen an das Bremsvermögen.....	175
6.1.3	Relevante Fahrzeugmassen	177
6.1.4	Momentane und mittlere Bremskräfte	179
6.1.5	Stoppbremsungen.....	184
6.1.6	Berechnung des Bremsgewichts.....	188
6.1.7	Rechnerische Nachweisführung der Stillstandssicherung	190
6.1.8	Beispiel: Güterwagen nach TSI WAG	192
6.1.9	Beispiel: Triebzug nach TSI LOC&PAS	196
6.2	Rechnerischer Nachweis der thermischen Belastbarkeit (thermische Berechnung)	210
6.2.1	Grundlagen für den Nachweis.....	210
6.2.2	Lastfälle für den thermischen Nachweis	212
6.3	Luftbedarfsberechnung	215
6.3.1	Zweck der Luftbedarfsberechnung.....	215
6.3.2	Physikalische Grundlagen	216
6.3.3	Überprüfung der Größe eines Bremsluftvorratsbehälters	216
6.4	Festigkeitsnachweis der Bremsbauteile.....	218
6.4.1	Grundlagen.....	218
6.4.2	Statischer Festigkeitsnachweis	219
6.4.3	Betriebsfestigkeitsnachweis	221
7	Bremsbewertung und bremstechnische Prüfung	225
7.1	Anhaltewege	225
7.1.1	Grundlagen.....	225
7.1.2	Normierung der Randbedingungen	225
7.1.3	Versuchstechnische Ermittlung	226
7.1.4	Korrekturrechnungen	228
7.1.5	Praktische Beispiele.....	229

7.2	Bremsgewichte und Bremshundertstel	234
7.2.1	Definition.....	234
7.2.2	Ermittlung von Bremsgewicht und Bremshundertsteln aus dem Anhalteweg.....	235
7.2.3	Berechnung	238
7.3	Verzögerungsprofile.....	238
7.3.1	Definition.....	238
7.3.2	Bestimmung der Verzögerungsprofile im Versuch.....	239
7.3.3	Sichere Schnellbremsverzögerung aus dem Versuchsbeispiel	241
7.3.4	Berücksichtigung verschlechterter Bedingungen auf das Bremsvermögen.....	241
7.4	Gleitschutzversuche	242
7.4.1	Gleitschutzversuche bei niedrigem Kraftschluss	242
7.4.2	Weitere Gleitschutzversuche	245
7.5	Statische Bremsprüfungen.....	247
8	Bremsbetrieb	249
8.1	Bremsbetrieb auf Strecken mit ortsfester Signalisierung	249
8.1.1	Zugbildungsregeln	250
8.1.2	Streckenbremstafeln	252
8.1.3	Zugfahrten unter linienförmiger Zugbeeinflussung (LZB)	263
8.2	Bremsbetrieb auf ETCS-Strecken.....	266
8.2.1	ETCS-Einführung	266
8.2.2	Die ETCS-Bremskurven	268
8.2.3	Modellierung des Bremsverhaltens in ETCS	273
8.2.4	Sichere ETCS-Schnellbremsverzögerung	276
8.3	Bremsbetrieb mit ATO	284
8.3.1	ATO-Architektur	286
8.3.2	Definitionen Schnittstelle Fahrzeug/ATO-Fahrzeuggerät	290
8.3.3	ATO-Fahrzeuggerät als Regler	292
8.3.4	Zielgenaues Bremsen	295
8.3.5	Bremsen bei vermindertem Rad/Schiene-Kraftschluss	296
9	Ausblick	301
A1	Anlage zu Bremsanschriften	304

Inhaltsverzeichnis

Herausgeber und Autorenteam	308
Abkürzungsverzeichnis	310
Stichwortverzeichnis	315
Inserentenverzeichnis	320

1 Bahnbetrieb

Jürgen Mallikat

Das „System Bahn“ ist ein komplexes, vielschichtig gestaltetes und technisch anspruchsvolles System. Es definiert sich über das sichere und wirtschaftliche Zusammenspiel der Teilsysteme Infrastruktur, Fahrzeuge sowie Betrieb und dient dem effizienten Transport von Personen und Gütern mit Schienenfahrzeugen, z.B. Lokomotiven und Wagen, auf einer geeigneten Infrastruktur. Die Leistung wird i. d. R. von Eisenbahnverkehrsunternehmen erbracht.

Unter dem Begriff „Bahnbetrieb“ werden alle Prozesse zusammengefasst, die mit der Koordination, der Regelung und der Sicherung von Eisenbahnfahrzeugen auf Schieneninfrastrukturen zu tun haben. Bahnbetrieb bedeutet also das Bewegen von Eisenbahnfahrzeugen – Züge fahren und rangieren – mit dem Zweck, Personen zu befördern und Güter zu transportieren [1].

Für den gesteuerten Bewegungsablauf der Fahrzeuge und Züge, speziell zur Verminderung ihrer Geschwindigkeit, sind Gegenkräfte (Bremskräfte) notwendig. Dazu bedarf es besonderer Einrichtungen in den Fahrzeugen, die diese Geschwindigkeitsreduzierung ermöglichen.

Um einen sicheren Bahnbetrieb zu gewährleisten, werden an die von den Bremsanlagen erzeugten Bremskräfte besondere Anforderungen gestellt. Die Bremsanlagen bedürfen einer hohen Kompatibilität zwischen der Bahninfrastruktur und den Schienenfahrzeugen.

Bremsen sind unter dem Gesichtspunkt des den Fahrzeugen zugewiesenen Einsatzgebiets zu projektieren. So wird zwischen dem konventionellen Bahnverkehr und dem Verkehr mit dem European Train Control System (ETCS), in das der Hochgeschwindigkeitsverkehr integriert ist, unterschieden. Alle genannten Verkehre sind unter dem Gesichtspunkt eines sicheren Bahnbetriebs zu betrachten, bei dem der Bremseinrichtung, wie bisher definiert, eine sicherheitsrelevante Bedeutung zukommt.

Jeder Bremsvorgang basiert auf den Grundgesetzen der Physik (siehe Kap. 3). Bremsen im Bahnbetrieb bedeutet gezielte Umwandlung der kinetischen bzw. der potentiellen Energie der Fahrzeuge in andere Energieformen, um Fahrgeschwindigkeiten von Einzelfahrzeugen oder Zügen kontrolliert zu regulieren bzw. bis zum Stillstand abzusenken und zu halten (siehe Kap. 4).

Nach [2] müssen Bremsysteme von Eisenbahnfahrzeugen sicherstellen, dass die Geschwindigkeit des Zugs reduziert bzw. bei abschüssiger Strecke beibehalten oder der Zug innerhalb des maximal zulässigen Anhaltewegs [3] angehalten werden kann. Das Bremsystem muss außerdem gewährleisten, dass ein Zug gegen Wegrollen und Wegrutschen zuverlässig gesichert werden kann (siehe Kap. 6).

Die Aktivierung des Bremsystems durch ein Fahrgastalarmsystem nach DIN EN 16334 [4] muss zudem zu einer direkten Auslösung der Betriebsbremse oder der „Bremsung mit Schnellbremswirkung“ führen, woraufhin der Zug vollständig angehalten wird. Bei infrastrukturbedingten Besonderheiten (z. B. Tunnelfahrten) kann es aber erforderlich sein, den Zug trotz einer angeforderten Fahrgastnotbremsung weiterfahren zu lassen und das Liegenbleiben an schwer zugänglichen Stellen zu vermeiden, um so schnell wie möglich einen für Selbst- oder Fremdrettung von Personen im Zug geeigneten Ort zu erreichen [5] (siehe Kap. 5).

Von den Bremsystemen der Eisenbahnfahrzeuge wird ein definiertes Bremsvermögen gefordert. Die wichtigsten Faktoren, die das Bremsvermögen beeinflussen, sind Bremsleistung (Erzeugung von Bremskraft), Zugmasse, Fahrwiderstandskräfte des Zugs, Geschwindigkeit und vorhandener Kraftschluss zwischen Rad und Schiene (siehe Kap. 6).

Das erforderliche Mindestbremsvermögen eines Zugs für den Betrieb auf einer Strecke mit einer vorgesehenen Geschwindigkeit hängt von konkreten Infrastrukturmerkmalen (Signalsystem, erlaubte Höchstgeschwindigkeit, Steigungen/Gefälle, Anhaltewegreserve, Bremswegreserve, Bedingungen für die Nutzung von Bremssystemen, die die Infrastruktur möglicherweise beeinträchtigen können, wie Magnetschienenbremsen, elektrischen Bremsen und Wirbelstrombremsen) ab. Diese gibt der Infrastrukturbetreiber gemäß der Durchführungsverordnung zur Technischen Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung – OPE“, Punkt 4.2.2.6.2 „Bremsleistung und zulässige Höchstgeschwindigkeit“, vor [6] (siehe Kap. 8.1).

Tiefergehende Ausführungen zur Architektur der Bremsen finden sich im nachfolgenden Kap. 2 dieses Handbuchs.

1.1 Sicherer Bahnbetrieb

Zum „System Bahn“ gehören gemäß der EU-Interoperabilitätsrichtlinie 2016/797, Anhang II [7], die Teilsysteme Infrastruktur, Energie, strecken- und fahrzeugseitige Zugsteuerung/Zugsicherung und Signalgebung, Fahrzeuge, Betriebsführung und Verkehrssteuerung, Instandhaltung sowie Telematikanwendungen für den Personen- und Güterverkehr. Für jedes dieser Teilsysteme müssen grundlegende Anforderungen und technische Spezifikationen vorgeschrieben werden. Dies gilt insbesondere für die Komponenten und Schnittstellen, mit denen diese grundlegenden Anforderungen einen sicheren Bahnbetrieb möglich machen. Vor dem Inverkehrbringen z. B. von Fahrzeugen ist die technische Kompatibilität mit relevanten Teilsystemen nachzuweisen. Für das Bremssystem war dies bereits bei den ehemaligen Länderbahnen eine zwingende Notwendigkeit, was seinerzeit in der Technischen Einheit (TE) dokumentiert worden ist. Aktuell ist diese Kompatibilität auch für den interoperablen europäischen Eisenbahnverkehr eine zwingende Notwendigkeit. Dies spiegelt sich in den funktionalen Anforderungen an die Bremse in den TSI und den Europäischen Normen (EN) wider.

Bremsen sind sicherheitsrelevante Bauteile, die einer besonderen Auslegungsphilosophie unterliegen. Detaillierte Festlegungen dazu sind in der TSI LOC&PAS, Kap. 4.2.4 Bremsen [2], und in der TSI „Fahrzeuge – Güterwagen“, Kap. 4.2.4 Bremse [8], formuliert. Für das Rad/Schiene-System im konventionellen Verkehr ≤ 200 km/h müssen festgelegte Funktionen und Kennwerte bezüglich des Bremsvermögens erfüllt werden, damit bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eine sichere Fahrt und ein Anhalten innerhalb der vorgegebenen Signalabstände (Vorsignale – Hauptsignale, Anhalteweglängen) gewährleistet sind (TSI OPE, Kap. 4.2.2.6 Zugbremsung [6]).

Sicherer Eisenbahnverkehr bedeutet, dass insbesondere die Bremssysteme auch unter ungünstigen Umweltbedingungen zuverlässig und sicher funktionieren. Das ist bei der Entwicklung der Bremsanlagen zu beachten. Ein erheblicher Erprobungsaufwand vor der Inbetriebsetzung von Eisenbahnfahrzeugen ist dazu zwingend erforderlich (siehe Kap. 7). Speziell zu den klimatischen Bedingungen werden in Kap. 2 nähere Angaben gemacht.

Grundlage für die Auslegung von Bremssystemen ist die Einhaltung des „**Fail-safe-Prinzips**“. Das heißt, während der Zugfahrt muss in der Bremsleitung ein definiertes Energiepotenzial vorhanden sein, damit die Bremsen gelöst sind. Diese Forderung besagt, dass die Bremssysteme die Fähigkeit besitzen müssen, in einem sicheren Zustand zu verbleiben oder unmittelbar in einen anderen sicheren Zustand überzugehen, wenn eine Komponente bzw. ein Teilsystem ausfällt. Wird z. B. eine Bremskopplung der Hauptluftleitung der Druckluftbremse außerplanmäßig getrennt, wird diese in beiden Zugteilen entlüftet und es kommt zu einer Zwangsbremsung beider Zugteile.

3 Technische Mechanik beim Bremsen von Schienenfahrzeugen

Martin Heller (Kap. 3.1 – 3.5), Stefan Schneider (Kap. 3.6 – 3.7)

3.1 Einführung

Ziel dieses Kapitels ist die Darlegung der Grundlagen für die Bremstechnik, speziell der Mechanik als der Lehre von den Bewegungen von Körpern und den dabei wirkenden Kräften. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist der Schlüssel zum Verständnis von Berechnungsprogrammen und Normen. Auf ihrer Grundlage ist es möglich, eine einfache Rechnung zur Ermittlung des Bremsvermögens auszuführen, um so Abschätzungen und Plausibilitätsprüfungen von Ergebnissen der Rechenprogramme vornehmen zu können.

Neben der Ermittlung des Bremsvermögens bestehen folgende Aufgaben:

- die Vorausberechnung der Kräfte, die durch die Bremsgeräte zu erzeugen sind
- die Prüfung der mechanischen und energetischen Ertragbarkeit der Belastung der Bremsanlagen
- die Sicherstellung, dass der Kraftschluss Rad/Schiene beim Bremsvorgang nicht mehr als zulässig beansprucht wird

Die Bearbeitung dieser Aufgaben anhand von Normen wird in Kap. 6 behandelt, während das vorliegende Kap. 3 die Grundlagen darlegt.

Vorzeichenkonvention

Soweit der Fahrgeschwindigkeit ein positives Vorzeichen gegeben wird, entsteht beim Bremsen eine Beschleunigung kleiner als Null. Anstelle einer negativen Beschleunigung wird auch der Begriff **Verzögerung** verwendet. Hier ist das Vorzeichen im Begriff vorweggenommen. Eine negative Beschleunigung (Entschleunigung) ist eine Verzögerung größer als Null. In den Kap. 3.2 bis 3.5 wird daher der Verzögerung a und der Winkelverzögerung α (Alpha) ein positives Vorzeichen gegeben, wenn die Fahrgeschwindigkeit bzw. die Drehfrequenz vermindert werden. Diese werden als Skalare behandelt, soweit sich die Betrachtung auf die Fahrtrichtung beschränkt.

Zahlenwerte und Größengleichungen

Aufgrund der Vielfalt und der ständigen Weiterentwicklung der Schienenfahrzeuge können die Angaben dieses Kapitels, wie Reibwerte, Kraftschlussbeiwerte, Bremskräfte, Massenfaktoren usw., nur Beispiele sein. Für konkrete Berechnungen ist es notwendig, die tatsächlichen Werte einschließlich ihrer Toleranzen aus Spezifikationen oder Prüfberichten zu entnehmen. Zusätzliche Quellen sind geltende Normen, nach denen die Produkte zugelassen wurden bzw. zu denen sie konform sind. Dabei ist zu prüfen, inwieweit die Prüfbedingungen mit den Einsatzbedingungen des realen Bremsbetriebs übereinstimmen.

Soweit nicht explizit angegeben, sind die angeführten Gleichungen unabhängig von den verwendeten Maßeinheiten gültig und es obliegt dem Anwender, Faktoren für die von ihm verwendeten Maßeinheiten zu berücksichtigen. Beispiele: Beim Einsetzen einer Masse in t ist ein Faktor 1.000 zur Rückführung auf das MKS-System (Meter-Kilogramm-Sekunde) zu verwenden. Und bei Verwendung einer Widerstandszahl in % ist ein Faktor 0,001 hinzuzufügen.

Bei Gleichungen, die Drücke verwenden (z.B. den Bremszylinderdruck) sind die Überdrücke gegenüber dem atmosphärischen Druck einzusetzen. Üblich ist die anschauliche Maßeinheit „bar“. 1 bar entspricht ungefähr dem atmosphärischen Druck. Die Maßeinheit „MPa“ (1 MPa = 10 bar) hat in Rechnungen den Vorteil, als Bestandteil des MKS-Systems direkt mit der Maßeinheit „N“ zu kommunizieren (1 MPa = 1 N/mm²).

3.2 Kräfte und Verzögerungen

3.2.1 Grundlagen

Grundlagen der Berechnungen sind die **Newtonschen Gesetze**:

- 1. Newtonsches Gesetz: Ein Körper bleibt im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung, wenn (in Summe) keine Kräfte auf ihn wirken.
- 2. Newtonsches Gesetz: Die Änderung der Bewegung ist proportional zu und erfolgt in Richtung der einwirkenden Kraft ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$).
- 3. Newtonsches Gesetz: Kräfte treten stets paarweise auf und heben sich so auf.

Bei ungleichförmigen Bewegungen wirken die Kräfte eines solchen Paars als äußere Kräfte auf verschiedene Körper. So wirkt z.B. die Bremskraft von der Schiene auf das Fahrzeug; gleichzeitig versucht das Fahrzeug, mit einer im Betrag gleichen Kraft die Schiene in Fahrtrichtung zu schieben.

Die Newtonschen Gesetze werden sinngemäß auch auf Drehbewegungen angewendet.

Aus dem zweiten Newtonschen Gesetz werden die nachfolgenden Gleichungen abgeleitet:

$$a = \frac{F}{m} \quad (3.2-1)$$

$$\alpha = \frac{M}{J} \quad (3.2-2)$$

a – Beschleunigung/Verzögerung¹

F – Summe der äußeren Kräfte auf das Fahrzeug mit der Masse m

m – Masse (des Fahrzeugs)

α – (Alpha-) Winkelbeschleunigung/-verzögerung bezogen auf die Drehachse der Radsatzwelle

M – Summe der äußeren Momente auf den Körper der Masse m bzw. seine rotierenden Teile

J – Massenträgheitsmoment rotierender Teile bezogen auf die Drehachse der Radsatzwelle

Die Summe der äußeren Kräfte wird aus Bremskräften, den Neigungs-, und den Fahrzeugwiderstandskräften gebildet.

Bremskräfte sind:

- von Radbremsen durch Reibung, generatorisch oder hydraulisch verursachte und über den Rad/Schiene-Kontakt übertragene Kräfte
- von Schienenbremsen über Reibung (Magnetschienenbremse) oder Kraftfelder (Wirbelstrombremse) verursachte Kräfte
- von aerodynamischen Bremsen zusätzlich zum Luftwiderstand aufgebrachte Kräfte

Fahrzeugwiderstandskräfte sind z.B.:

- die Widerstandskraft durch den Fahrtwind (äußerer Luftwiderstand)
- die Luftwiderstandskraft durch Lüftungen (Impulswiderstand)

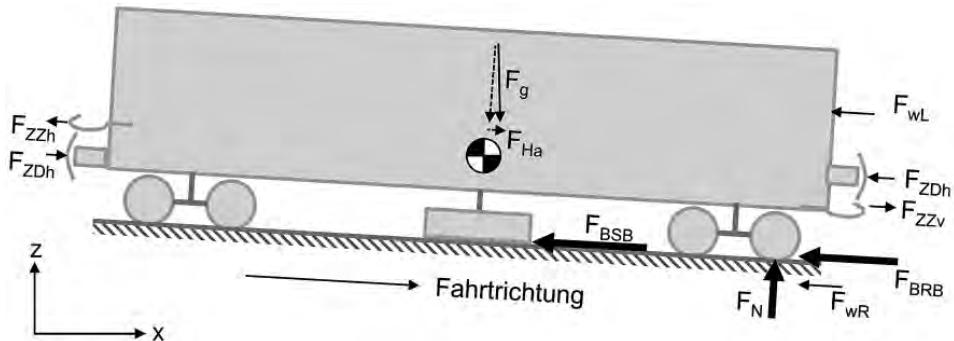
¹ In ERA-Dokumenten wird die Verzögerung mit dem Formelzeichen „A“ angegeben, in den deutschen Fassungen der DIN-Vorschriften mit dem Formelzeichen „a“.

- innere und äußere Reibungskräfte (z. B. Lagerreibung, Rollreibung, Kräfte am Spurkranz)
- Widerstandskraft von Antriebsteilen und Achsgeneratoren

3.2.2 Kräfte auf das Schienenfahrzeug beim Bremsen

Im Folgenden werden die an den Systemgrenzen des Fahrzeugs freigeschnittenen äußeren Kräfte behandelt. Es werden Bewegungsgleichungen aufgestellt, mit denen Anhaltewege oder erforderliche Kräfte der Bremsen berechnet werden können.

Die Kräfte werden durch Pfeile symbolisiert und sollen ein positives Vorzeichen tragen, wenn sie in Pfeilrichtung wirken.



- $F_{Z..}$ – Kräfte an der Zug- und Stoßeinrichtung, in Fahrtrichtung vorn und hinten, Zug und Druck
 F_{wL} – Luftwiderstandskraft
 F_{BRB} – Bremskraft durch die Wirkung der Radbremsen (Klotzbremsen, Scheibenbremsen, dynamische Bremsen) – hier beispielhaft an einem Rad dargestellt)
 F_N – Normalkraft zwischen Rad und Schiene – hier beispielhaft für ein Rad. Die Summe der Normalkräfte ist gleich der Normalkomponente der Gewichtskraft. Durch dynamische Entlastungen oder Belastungen der Radsätze können die vier Normalkräfte jedoch verschieden groß sein.
 F_{BSB} – Bremskraft durch Schienenbremsen (Magnetschienenbremsen, Wirbelstrombremsen)
 F_{wR} – Roll- und Reibungswiderstandskraft
 F_g – Gewichtskraft. Diese lässt sich in eine Normal- und eine Tangentialkomponente zerlegen, die Hangabtriebskraft.
 F_{Ha} – Hangabtriebskraft

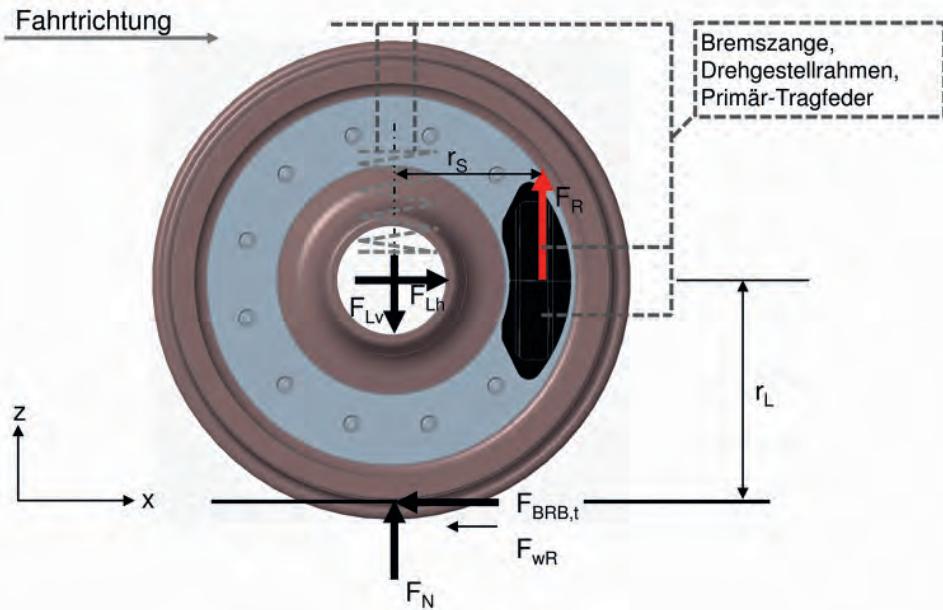
Abb. 3.2-1: Kräfte auf ein Schienenfahrzeug beim Bremsen (Grafik: eigene Darstellung)

Die Kräfte an den Zug- und Stoßeinrichtungen spielen eine wichtige Rolle für die Längsdynamik der Züge (siehe Kap. 3.6). Bei Behandlung der grundlegenden mechanischen Gesetze an einem einzelnen Fahrzeug oder homogenen Zug auf geradem Gleis kommen sie nicht vor.

Die Kräfte von der Schiene auf das Fahrzeug sind somit die wichtigsten zu berechnenden Kräfte für das Bremsen. Da für Ihre Realisierung meist Radbremsen (Klotzbremsen, Scheibenbremsen, generatorische Bremsen) verantwortlich sind, werden die Bremskräfte über den Rad/Schiene-Kontakt übertragen. Deshalb ist der Kraftschluss Rad/Schiene eine essenzielle Voraussetzung für den sicheren Bremsbetrieb.

Der Zusammenhang zwischen der im Rad/Schiene-Kontakt wirkenden Bremskraft und den von den Bremsgeräten erzeugten Kräften wird aus dem Freischnitt des Systems hergeleitet.

3.2.3 Kräfte am gebremsten Rad mit Scheibenbremse



- F_N – Normalkraft von der Schiene auf das Rad
 $F_{BRB,t}$ – tatsächliche Bremskraft der Radbremse. Die für die Verzögerung der Rotation eingesetzte Kraft ist in ihr nicht enthalten. Die tatsächliche Bremskraft wirkt auf die tatsächliche Masse des Fahrzeugs, im Unterschied zur „scheinbaren Masse“ (siehe Kap. 3.3.1).
 F_{wR} – Widerstandskraft (Reibung); bezogen auf den Kontaktpunkt Rad/Schiene
 F_{Lh} – horizontale Kraft vom Radsatzlager auf das Rad
 F_{Lv} – vertikale Kraft vom Radsatzlager auf das Rad
 F_R – Reibkraft der Reibungsbremse, bezogen auf den angenommenen Reibradius; Summe für alle Beläge der betrachteten Einheit (Rad oder Radsatz), d.h. mindestens zwei
 r_L – Laufkreisradius
 r_s – angenommener Reibradius

Abb. 3.2-2: Kräfte auf ein Rad mit Radscheibenbremse beim Bremsen eines Schienenfahrzeugs in der Ebene (Grafik: eigene Darstellung)

Abb. 3.2-2 kann sinngemäß auch auf einen Radsatz angewendet werden. Dabei sind die eingezeichneten Kräfte als Summe für zwei Räder und die entsprechende Anzahl von Bremsbelägen anzusehen.

Die Teile Bremszange, Drehgestellrahmen und Primär-Tragfeder sind in Abb. 3.2-2 angedeutet, weil sie dafür verantwortlich sind, dass sich die inneren Kräfte beim Bremsen aufheben, so dass die Normalkraft konstant bleibt.

Die momentane tatsächliche Bremskraft $F_{BRB,t}$, verursacht durch die Reibungsbremse, ergibt sich gemäß Gleichung (3.2-2):

Kap. 1). Bei Betätigung wird entweder sofort eine Zwangsbremsung eingeleitet oder der Tf kann diese Bremsanforderung überbrücken, um an einem geeigneten Haltepunkt anzuhalten. Weitere Details sind Kap. 5.5 zu entnehmen.

5.1.2 Informationsübertragung (Bremsbefehlsübertragung)

Weil die Schnellbremsungen ein sehr hohes Sicherheitsniveau erfüllen müssen, ergeben sich auch an die Auslösewege und die Befehlsübertragung spezielle Anforderungen. Eine der wichtigsten Anforderungen ist die an die **Durchgängigkeit** der Befehlsübertragung über den gesamten Zugverband. Eine zweite Charakteristik ist die **Selbsttätigkeit**. Selbsttätigkeit bedeutet, dass bei Unterbrechung bzw. Abriss der Bremsleitung die Bremsen im Zug anlegen. Bei modernen Schienenfahrzeugen wird die Auslösung einer Schnellbremsung meist auf unabhängigen Wirkwegen ausgeführt.

Da historisch bedingt pneumatische Bremsen noch am weitesten verbreitet sind und es auch lange Zeit keine zugweiten rein elektrischen Bremsbefehlsübertragungen bei Eisenbahnfahrzeugen gab, ist die pneumatische Hauptluftleitung (HLL) noch immer sehr verbreitet. Das betrifft sowohl lokbespannte Züge als auch Triebzüge. Bei Auslösung einer Schnellbremsung, sei es durch den Tf oder eine automatische Überwachungseinrichtung, wird die HLL über pneumatische bzw. elektropneumatische Ventile über einen großen Querschnitt mit dem Atmosphärendruck verbunden. Die Verbindung mit dem Atmosphärendruck erfolgt bei modernen Schienenfahrzeugen über mindestens zwei Auslöseorgane.

In Deutschland beträgt die maximale Zuglänge 740 m. In anderen Teilen der Welt wie in Nordamerika, Teilen Afrikas und Australien sind Züge mehrere Kilometer lang. Der Druck in der Hauptluftleitung reagiert am Zugende deutlich langsamer als im führenden Fahrzeug mit der HLL-Steuerung (siehe Kap. 3.6.1). Deshalb werden oft zusätzliche Lokomotiven im Zugverband bzw. am Ende des Zugs eingestellt. Dies dient zur Verstärkung der Traktionsleistung, der Verringerung der Längskräfte (durch Lokomotiven in der Mitte des Zugs) und wird auch für die Bremssteuerung genutzt. Die geführten Lokomotiven erhalten von der führenden Lok über Funk Befehle, um die Hauptluftdruckabsenkung bzw. -erhöhung wegen der gegenüber elektrischen Signalübertragungen langsamen Übertragungszeiten über die HLL zu unterstützen. Diese Art der Steuerung wird vor allem im AAR-Bereich (AAR – Association of American Railroads) eingesetzt. Die AAR gibt spezielle Anforderungen an die Bremsysteme für Nordamerika vor. Diese Regularien und Anforderungen werden aber auch in anderen Teilen der Welt angewendet. Diese spezielle Zugbildung mit Lokomotiven im Zugverband und/oder am Ende des Zugs ist unter dem Namen „Distributed Power“ (verteilte Traktion) bekannt. In Mittel- und Westeuropa wurden solche Distributed-Power-Systeme bisher nur prototypisch getestet.

In modernen Nahverkehrsfahrzeugen wie Straßenbahnen, Metros oder Stadtbahnen sowie bei Vollbahnfahrzeugen wie Triebzügen und Lokomotiven ist immer eine elektrische Schnellbremseschleife (siehe Abb. 5.1-1) installiert. Bei Lokomotiven wird in der Regel die Schnellbremseschleife nur innerhalb der Lokomotive ausgeführt. Die Weitergabe des Schnellbremsbefehls an die angekoppelten Wagen erfolgt dann über die HLL. Die Funktionsweise beruht auf dem Ruhstromprinzip. Wird die Schnellbremsschleife (bei Straßenbahnen auch als Notbremsschleife bezeichnet) geöffnet, fällt die Spannung auf null Volt ab, was einem Schnellbremsbefehl entspricht.

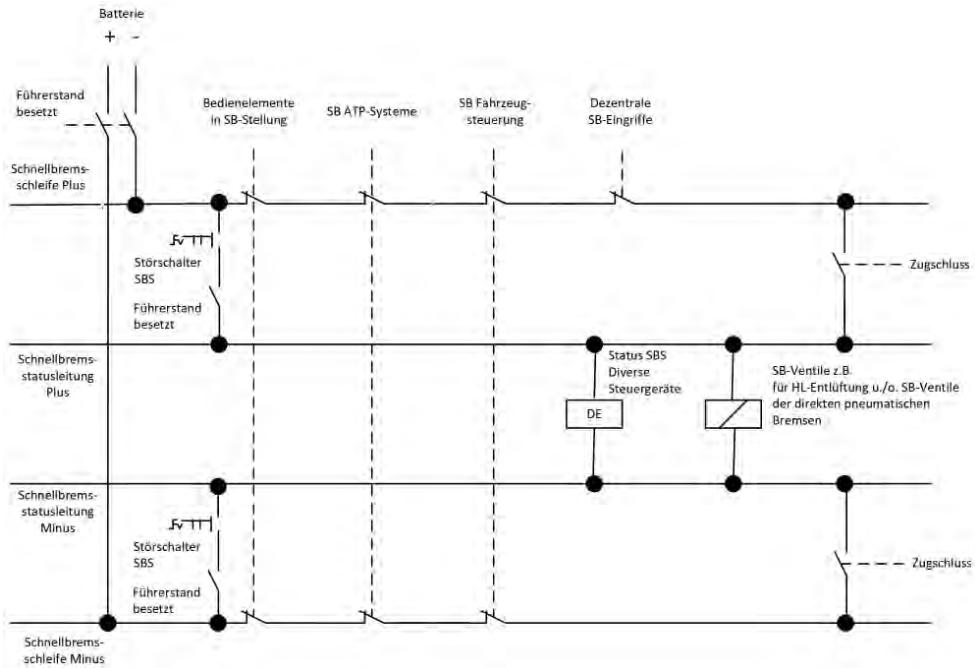


Abb. 5.1-1: Vereinfachte und Beispielhafte Darstellung einer Schnellbremsschleife (SBS)
(Grafik: eigene Darstellung)

Die Einspeisung der Schnellbremsschleife erfolgt bei der beispielhaften Darstellung in Abb. 5.1-1 im führenden Fahrzeug bei besetztem Führerstand. Je nach Niveau der Sicherheitsanforderungen wird die Aktivierung einer Schnellbremsung zwei- oder einkanalig ausgeführt. Bei zweikanaliger Ausführung wird die Schnellbremsschleife im Plus- und Minuspfad unterbrochen. Bei zugweiten Bremsfunktionen wie der Auslösung einer Schnellbremsung durch den Triebfahrzeugführer oder durch die Zugsicherungssysteme (ATP – automatic train protection) werden die Eingriffe immer zweikanalig ausgeführt, damit keine Einzelfehler zum Versagen der Schnellbremsbefehlsauslösung führen und die Selbsttätigkeit der Bremsen gegeben ist.

Am Zugschluss bzw. Zugende werden die Schnellbremsstatusleitungen mit der Schnellbremsschleife im Plus- und Minuspfad verbunden. Daher kommt auch der Begriff „Schleife“, weil die Leitungen einmal durch den Zug bzw. das Fahrzeug hin und zurück „durchgeschleift“ werden. Über die Statusleitungen können diverse Steuergeräte, die bei einer Schnellbremsung aktiv werden müssen, den Status über digitale Eingänge erfassen. Zusätzlich werden z. B. auch elektropneumatische Ventile oder weitere Schnellbremsaktuatoren wie etwa Schienenbremsen über die Statusleitungen aktiviert. Wenn die Schnellbremsschleife fehlerhaft abgefallen ist, so besteht im führenden Fahrzeug die Möglichkeit, die Statusleitung über einen Störschalter zu brücken und somit die Statusleitungen zu bestromen, damit z. B. noch die Strecke geräumt werden kann. In der Regel gelten dann allerdings betriebliche Einschränkungen wie z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen o. ä. Im Nahverkehrsbereich sowie auch bei Triebzügen ist die Schnellbremsschleife inzwischen oft der primäre Übertragungsweg für einen Schnellbremsbefehl, da diese Fahrzeuge teilweise keine HLL mehr aufweisen.

v_0 in km/h	s in m	
	nur Druckluftbremse (R)	mit Magnetschienenbremse (R+Mg)
100	387	292
120	550	428
140	740	590
160	959	781

Tab. 6.1-16: Anhaltewege s in Abhängigkeit von der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0

Der Triebzug wird als Zugverband bewertet. Die daraus, unter Verwendung der in Tab. 6.1-2 aufgeführten Konstanten nach Gleichung (6.1-29), berechneten Bremshundertstel sind in Tab. 6.1-17 zusammengefasst.

v_0 km/h	λ	
	Druckluftbremse (R)	mit Magnetschienenbremse (R+Mg)
100	$\lambda = \frac{61.300}{387} - 8,9 = 149$	$\lambda = \frac{61.300}{292} - 8,9 = 201$
120	$\lambda = \frac{91.633}{550} - 11,6 = 155$	$\lambda = \frac{91.633}{428} - 11,6 = 202$
140	$\lambda = \frac{130.995}{740} - 11,6 = 165$	$\lambda = \frac{130.995}{590} - 11,6 = 210$
160	$\lambda = \frac{176.714}{959} - 11,6 = 173$	$\lambda = \frac{176.714}{781} - 11,6 = 215$

Tab. 6.1-17: Bremshundertstel λ in Abhängigkeit von der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0

Für die Bremsstellung R sind die kleinsten Bremshundertstel im Geschwindigkeitsbereich zwischen 120 km/h und der Höchstgeschwindigkeit maßgebend für die Ermittlung des Bremsgewichts. Damit ergibt sich ein Bremsgewicht B_R nach Gleichung (6.1-30) zu:

$$B_R = \frac{\lambda_{\text{relevant}}}{100} \cdot m_{\text{relevant}} = \frac{155}{100} \cdot 188 \text{ t} = 291 \text{ t}$$

Für die Bremsstellung R+Mg sind die kleinsten Bremshundertstel im Geschwindigkeitsbereich zwischen 140 km/h und der Höchstgeschwindigkeit maßgebend für die Ermittlung des Bremsgewichts. Damit ergibt sich ein Bremsgewicht B_{R+Mg} nach Gleichung (6.1-30) zu:

$$B_{R+Mg} = \frac{\lambda_{\text{relevant}}}{100} \cdot m_{\text{relevant}} = \frac{210}{100} \cdot 188 \text{ t} = 395 \text{ t}$$

Werden die Ergebnisse durch die bremstechnische Erprobung im Rahmen der Typprüfung (siehe Kap. 7.1.3) bestätigt, kann der Triebzug im deutschen Eisenbahnnetz auf Strecken mit konventionellem Signalsystem und 1.000 m Vorsignalabstand in Bremsstellung R+Mg mit der vorgesehenen Höchstgeschwindigkeit (160 km/h) verkehren.

Betriebsbremsung (Vollbremsung bei Gesamtmasse)

Wenn nichts anderes vorgegeben ist, ist es üblich, die Betriebsbremse eines Fahrzeugs möglichst so auszulegen, dass das Fahrzeug mit einer am Vorsignal eingeleiteten Vollbremsung innerhalb des Vorsignalabstands (ohne Sicherheitsabschlag, im Normalbetrieb, auf ebenem und trockenem Gleis) zum Stehen kommen kann. Dabei wird derjenige Vorsignalabstand zugrunde gelegt, für den aufgrund des angerechneten Bremsvermögens ein Betrieb mit der maximalen

Geschwindigkeit möglich ist. Ein weiteres Auslegungskriterium ist üblicherweise, dass die Verzögerung bei Vollbremsungen nicht größer als bei einer Schnellbremsung sein soll.

Bei Betriebsbremsungen wird vorzugsweise die dynamische Bremse des angetriebenen Mittelwagens (MC C) eingesetzt. Je nach Bremsanforderung muss deren Bremskraft durch die Scheibenbremse ergänzt werden (Blending). Für das Bespielfahrzeug werden dafür die folgenden Annahmen getroffen:

- Die äquivalente Ansprechzeit t_e bei einer Vollbremsung beträgt 1,7 s.
- Die maximale Kraftschlussausnutzung der dynamischen Bremse soll 0,15 betragen. Daraus errechnet sich in Anlehnung an Gleichung (6.1-28) eine maximale Bremskraft der dynamischen Bremse:

$$F_{BED,max} = 0,15 \cdot 65 t \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 95 \text{ kN}$$

- Bei dieser Bremskraft beträgt die Geschwindigkeitsgrenze v_2 nach Abb. 6.1-4 70 km/h, eine Geschwindigkeitsgrenze v_1 kommt nicht zum Tragen.
- Bei einer Geschwindigkeit größer v_2 wird im angetriebenen Mittelwagen die Differenz zwischen der möglichen Bremskraft der dynamischen Bremse und der maximalen Bremskraft der dynamischen Bremse von 95 kN durch die Scheibenbremse des Mittelwagens ergänzt.
- Die äquivalente Verzögerung a_e bei einer Vollbremsung soll etwa der äquivalenten Verzögerung bei einer Schnellbremsung in Bremsstellung R (siehe Tab. 6.1-9) entsprechen. Daraus abgeleitet wird deshalb von der Scheibenbremse in den Endwagen jeweils eine Bremskraft von 44,644 KN aufgebracht.

In Abb. 6.1-17 ist die daraus abgeleitete Bremskraftverteilung dargestellt.

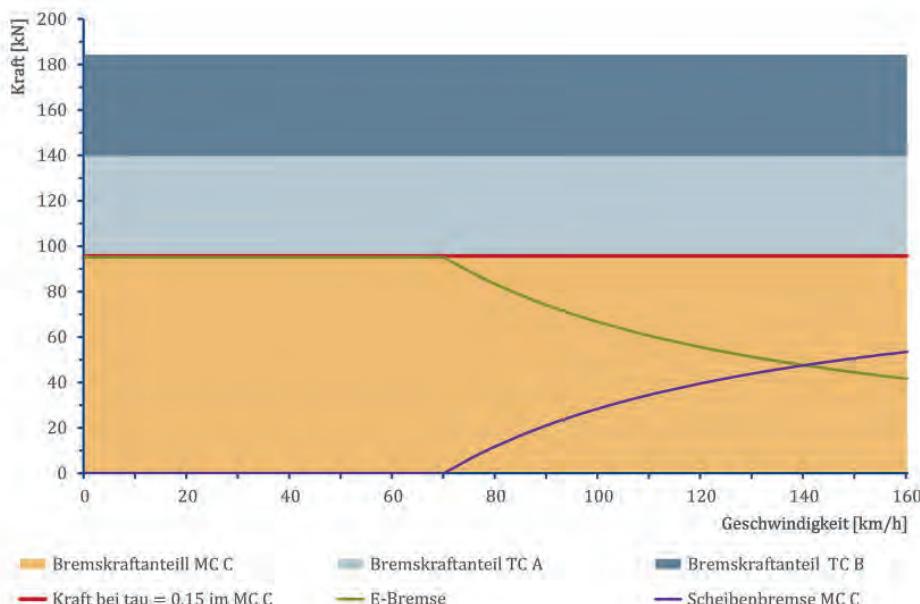


Abb. 6.1-17: Bremskraftverteilung (Blending) bei einer Vollbremsung für Gesamtmasse und neues Rad (Grafik: Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH)

Daraus ergibt sich über der Geschwindigkeit eine etwa konstante Gesamtbremskraft. Tab. 6.1-18 enthält die Berechnung von Verzögerung und Anhalteweg.

7 Bremsbewertung und bremstechnische Prüfung

Sebastian Heinz

7.1 Anhaltewege

7.1.1 Grundlagen

Im System Eisenbahn finden Zugfahrten und insbesondere Bremsungen i. d. R. nicht auf Sicht statt, sondern bedürfen eines verlässlichen vorhersagbaren Anhaltewegs. Aufgabe der Bremsbewertung ist es, das Bremsvermögen (auch physikalisch irreführend als „Bremsleistung“ bezeichnet) eines Zugs oder Schienenfahrzeugs so zu charakterisieren, dass sie für den Bremsbetrieb (siehe Kap. 8.1) einen Zusammenhang zwischen den streckenseitig vorgegebenen einzuhaltenden Anhaltewegen und den zulässigen Fahrgeschwindigkeiten eines Zugs herstellt. Die Bremsbewertung definiert somit eine Schnittstelle zwischen der Infrastruktur und den darauf verkehrenden Fahrzeugen.

Das einfachste und grundlegende Maß für das Bremsvermögen ist der Anhalteweg s . Dieser ist für einen gegebenen Zug mit festgelegten Bremseigenschaften auf gerader ebener Strecke eine Funktion der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 und der abzubremsenden Masse m .

$$s = f(v_0, m) \quad (7.1-1)$$

Für eine Bemessung des Bremsvermögens eines Zugs bräuchte man in diesem Fall für jeden Zug eine Matrix der Anhaltewege in Abhängigkeit von Bremsausgangsgeschwindigkeit und Masse. Dies ist unpraktisch und zudem nur für feste Zugformationen oder Einzelfahrzeuge anwendbar. Für einen variabel zusammengestellten Zug fehlt eine einfache praktikable Berechnungsmöglichkeit des Anhaltewegs aus den Anhaltewegen seiner Einzelfahrzeuge. Daher wird diese Möglichkeit, das Bremsvermögen eines Zugs auszudrücken, kaum angewendet. Dagegen findet sie Anwendung in der infrastrukturseitigen Festlegung von Mindestanforderungen. Als Voraussetzung für den Einsatz auf einer bestimmten Infrastruktur muss ein Fahrzeug oder Zug für die Einhaltung von geschwindigkeitsabhängig definierten Mindestanhaltewegen ausgelegt sein und dies nachweisen. Ein Beispiel hierfür sind die in der BOStrab [1] vorgegebenen Grenzwerte für Anhaltewege.

Auch wenn der Anhalteweg als direktes Maß für das Bremsvermögen wie gezeigt unpraktisch erscheint, so ist dessen Ermittlung doch die Basis für die weiter unten vorgestellten Methoden, das Bremsvermögen auszudrücken. Die Ermittlung der Anhaltewege kann rechnerisch erfolgen (siehe Kap. 6.1). Ein versuchstechnischer Nachweis ist jedoch in vielen Fällen weiterhin zwingend erforderlich, um die Berechnung durch Tests zu bestätigen, z. B. laut TSI LOC&PAS [2].

7.1.2 Normierung der Randbedingungen

Um im Rahmen der Festlegung von Grenzwerten zu Anhaltewegen eine klare Abgrenzung der fahrzeugseitigen Anforderungen von den infrastrukturseitigen Konsequenzen zu ermöglichen, ist eine präzise Definition der Randbedingungen erforderlich, unter denen die Anhaltewege gelten sollen.

Neben den bereits erwähnten Hauptparametern Geschwindigkeit und Masse haben viele weitere Parameter Einfluss auf die Anhaltewege. Infrastrukturseitig bewirkt die Trassierung (Streckenneigung, Bogenwiderstand) zusätzliche Verzögerungs- oder Beschleunigungs Kräfte (siehe

Kap. 3.2.5). Fahrzeugseitig führt vor allem der Zustand des Bremssystems (Einstellungs- und Fertigungstoleranzen, Verschleißzustände) in der Realität zu Abweichungen vom nominalen Bremsvermögen. Auch die Umgebungsbedingungen können unmittelbar (Wind) oder mittelbar (Temperatur, Nässe) über ihren Einfluss auf Reibwerte und Kraftschlussverhältnisse Auswirkungen auf die Anhaltewege haben (siehe Kap. 2.3).

Im Anwendungsbereich der TSI und der UIC-Regeln gilt nach [3] und [4] hierbei die Konvention, dass das Bremsvermögen unter Nominalbedingungen und bei mittlerem Betriebszustand ermittelt wird. Das Bremsvermögen bezieht sich auf gerade, ebene und trockene Schiene. Dies impliziert, dass es Züge gibt, die kürzere, aber auch solche, die längere als die ihrem Bremsvermögen entsprechenden Anhaltewege haben. Diese zufällige Streuung der Anhaltewege muss infrastrukturstetig bei der Aufstellung der bremsbetrieblichen Regeln (z.B. in Streckenbremstafeln, siehe Kap. 8.1.2) genauso durch Sicherheitszuschläge berücksichtigt sein wie die Auswirkungen witterungsbedingter verminderter Reib- oder Kraftschlusswerte. Systematische Abweichungen von den Nominalbedingungen wie die Streckenneigung werden ebenfalls infrastrukturstetig berücksichtigt. Da die bremsphysikalischen Grundlagen hierfür teilweise noch auf einer Reibcharakteristik von Graugussbremsklotzsohlen basieren (siehe auch Kap. 7.3.2.1), kann es im Zuge des zunehmenden Einsatzes von K-Sohlen im Güterverkehr notwendig sein, diese Zusammenhänge zu überprüfen. Ein Beispiel für das Vorgehen auf Basis entsprechender Grundlagenuntersuchungen ist in [5] dargestellt.

7.1.3 Versuchstechnische Ermittlung

7.1.3.1 Allgemeines

Mit Ausnahme von Güterwagen mit Standardbremsausrüstung und Grauguss- oder LL-Bremsklotzsohlen müssen Anhaltewege im Versuch ermittelt bzw. verifiziert werden. Die in Europa für Vollbahnen maßgeblichen Regelwerke hierfür sind das UIC-Merkblatt 544-1 [3] und die daraus hervorgegangene Euronorm EN 16834 [4]. Sofern nicht anders erwähnt, beziehen sich die folgenden Ausführungen dieses Kapitels auf die genannten Regelwerke. Der Einfachheit halber wird nur EN 16834 referenziert, solange keine relevanten Unterschiede zum genannten UIC-Merkblatt erwähnenswert sind.

7.1.3.2 Versuchsumfang

Die Anhaltewege sind auf gerader, ebener und trockener Schiene zu bestimmen. Die Versuche erfolgen aus unterschiedlichen Ausgangsgeschwindigkeiten bis zur Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs und in bis zu drei Lastzuständen. Die Versuche sind in der Regel als Schnellbremsung in allen vorhandenen Bremsstellungen durchzuführen. Die Methodik kann aber auch für Betriebs- und Vollbremsungen angewendet werden. Bei kombinierten Bremssystemen müssen die einzelnen Beiträge zum Bremsvermögen durch Abschalten einzelner Bremskomponenten ermittelt werden. Welche Versuche im Detail erforderlich sind, richtet sich unter anderem auch nach der verwendeten Bremsbewertungsmethode.

7.1.3.3 Durchführung

Bei den Versuchen soll die Bremsausrüstung des zu prüfenden Fahrzeugs bzw. Zugs nicht durch andere Fahrzeuge verfälscht werden. Bei Lokomotiven und Triebzügen werden die Versuche daher bei Fahrten aus eigener Kraft durchgeführt. Bei Güter- oder Personenwagen kann die Durchführung als Abhängerversuch erfolgen, bei dem das Fahrzeug nach der Beschleunigung durch ein Triebfahrzeug kurz vor der Bremsung abgekoppelt wird (besondere Abhängvorrichtung siehe Abb. 7.1-1) und sich dann selbst abbremst.

Literatur:

- [1] Bundesministerium der Justiz: Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab). 11.12.1987, zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 1.10.2019 I 1410.
- [2] EU-Kommission: Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union (TSI LOC&PAS). Amtsblatt der Europäischen Union L 356/228, 12.12.2014; zuletzt geändert durch die Durchführungsverordnung (EU) Nr. 2023/1694 vom 11.3.2023.
- [3] Union Internationale des Chemins de fer (Hrsg.): UIC 544-1: Bremse – Bremsleistung. 6. Ausgabe, Oktober 2014.
- [4] DIN EN 16834:2019-07: Bahnanwendungen – Bremse – Bremsvermögen; Deutsche Fassung EN 16834:2019. Abb. 7.4-2 wird wiedergegeben mit Erlaubnis von, aber ohne Prüfung durch DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, zu beziehen über die Beuth Verlag GmbH, www.beuth.de.
- [5] Jaenichen, D.; Eske, S.: Anhalteweg-Berechnungen für mit K-Bremssohlen gebremste Güterzüge. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 11/2015, S. 58–64.
- [6] DIN EN 14198:2021-07: Bahnanwendungen – Bremsen – Anforderungen an die Bremsausrüstung lokbespannter Züge; Deutsche Fassung EN 14198:2016+A2:2021. Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Buchs war eine Aktualisierung der Norm in Vorbereitung (prEN 14198:2023, Juli 2023).
- [7] Bundesamt für Verkehr BAV (Hrsg.): Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV). Stand: 1.11.2020.
- [8] DIN EN 16185-1:2020-08: Bahnanwendungen – Bremssysteme für Triebzüge – Teil 1: Anforderungen und Definitionen; Deutsche Fassung EN 16185-1:2014+A1:2020.
- [9] Förster, J.; Kümmeling, M.; Olesch, M. (et al.): ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis. EI – Der Eisenbahningenieur, Heft 6/2023, S. 45–50.
- [10] Union Internationale des Chemins de fer (Hrsg.): UIC 541-05: Bremse – Vorschriften für den Bau der verschiedenen Bremsteile – Gleitschutzanlage. 2. Ausgabe, August 2006.
- [11] DIN EN 15595:2021-07: Bahnanwendungen – Bremse – Gleitschutz; Deutsche Fassung EN 15595:2018+AC:2021. Abb. 7.4-2 wird wiedergegeben mit Erlaubnis von, aber ohne Prüfung durch DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, zu beziehen über die Beuth Verlag GmbH, www.beuth.de.
- [12] Heinz, S.; Kröger, F.: Das neue UIC-Merkblatt 541-05 (3. Ausgabe) zu Gleitschutzanlagen – Hintergründe und Auswirkungen für die Durchführung von Gleitschutzversuchen. ZEVrail, Jahrgang 141, Ausgabe Sonderheft Graz 2017, S. 204–212.
- [13] Fischer, M.; Haselsteiner, K.; Szekely, F. (et al.): Mehr Mobilität auf der Schiene: Erhöhung der Transportkapazität durch Optimierung des Kraftschlusses. ZEVrail, Jahrgang 144, Ausgabe 10, 2020, S. 393–399.
- [14] DIN EN 16185-2:2020-01: Bahnanwendungen – Bremssysteme für Triebzüge – Teil 2: Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 16185-2:2014+A1:2019.

8 Bremsbetrieb

Jürgen Mallikat (Kap. 8.1), Olivera Pavlovic (Kap. 8.2), Maik Bähr (Kap. 8.3)

8.1 Bremsbetrieb auf Strecken mit ortsfester Signalisierung

Eine signalgeführte Zugfahrt wird durch die Standorte der ortsfesten Signale an der Strecke bestimmt. Durch diese ortsfesten Signale werden dem Triebfahrzeugführer (Tf) Fahrt- und Haltbegriffe sowie Geschwindigkeitswechsel angekündigt und angezeigt. Alle Fahrstraßen für signalgeführten Zugfahrten werden durch Hauptsignale signaltechnisch gesichert. Bei signalgeführten Zugfahrten ist die Höchstgeschwindigkeit durch die verfügbaren Signalwege (Abstand zwischen Vor- und Hauptsignal) begrenzt. Über den Begriff „Halt erwarten“ eines Streckensignals wird der Triebfahrzeugführer zur Einleitung einer Bremsung aufgefordert, damit ein Zug innerhalb eines definierten Wegabstands sicher vor einem „Halt“ zeigenden Signal zum Stillstand kommt.

Züge fahren gewöhnlich im sogenannten „festen Raumabstand“, d. h., Strecken werden durch Signale in Zugfolgeabschnitte (auch Blockabschnitte genannt) unterteilt. Bedingung ist, dass sich in einem Streckenabschnitt nur ein Zug befinden darf. Bei einer beispielhaften Mindestlänge für einen Zugfolgeabschnitt von 1.000 m sind die maximale Zuglänge (+ x) und der maximale Anhalteweg¹ des Zugs zu berücksichtigen. Der Signalanhalteweg ist der Abstand zwischen dem Vor- und dem Hauptsignal, der für den Anhalteweg zur Verfügung steht. Dieser Signalanhalteweg darf aber betrieblich wegen der Streuung des Anhaltewegs nicht voll in Anspruch genommen werden (siehe Kap. 7.1.3.3). Bei Einleitung einer Schnellbremsung in Höhe des Vorsignals muss der Zug sicher vor dem Hauptsignal zum Stillstand kommen. Die Zusammenhänge sind in der nachfolgenden Abb. 8.1-1 vereinfacht dargestellt:

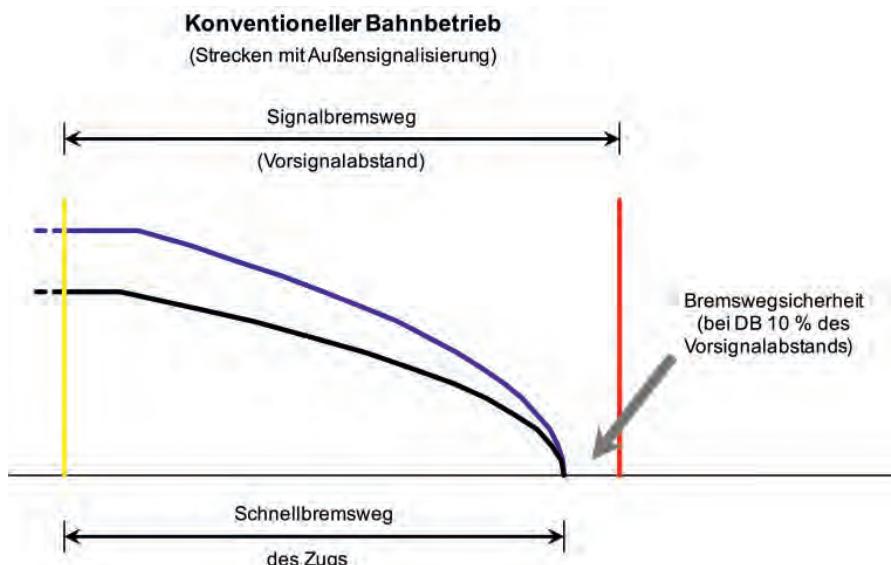


Abb. 8.1-1: Signal- und Schnellbremsanhaltewege von Bremsungen aus zwei Bremsausgangsgeschwindigkeiten bei signalgeführter Zugfahrt (Grafik: Olaf Gröpler, DB Systemtechnik GmbH)

¹ Gemäß DIN EN 14478, Punkt 4.6.3, wird der Anhalteweg als der Weg definiert, der von der Einleitung der Bremsanforderung bis zum Stillstand zurückgelegt wird [1].

Gemäß der TSI (EU) 2019/773 „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung“ [2], hier Abschnitt 4.2.2.6.2 „Bremsleistung und zulässige Höchstgeschwindigkeit“, muss der jeweilige Infrastrukturbetreiber (Eisenbahninfrastrukturunternehmen – EIU) den Nutzern (Eisenbahnverkehrsunternehmen – EVU) seiner Infrastruktur Angaben zu definierten Wegabständen – wie im ersten Absatz dargelegt (Abstand zwischen Vor- und Hauptsignalen, Anhalteweglängen) – machen und die darin enthaltenen Sicherheitsmargen mitteilen. Voraussetzung für einen sicheren Zugbetrieb ist insbesondere eine notwendige Kompatibilität zwischen den Infrastruktur- und den Fahrzeugmerkmalen. Die EVU verarbeiten diese Angaben in dem unternehmensspezifischen Dokument „Betriebsregelwerk EVU“ (BRW) [3], welches auf der Basis von [2] und den Empfehlungen des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (VDV) in Form von Regelbüchern wie dem „Regelbuch für Triebfahrzeugführer“ (Triebfahrzeugführerheft) zu erstellen und weiterzuentwickeln ist.

Im Geltungsbereich des Allgemeinen Eisenbahngesetzes (AEG) in Deutschland und der damit korrespondierenden Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), hier § 35 Bremsen der Züge [4], werden als größte Anhaltewege für Hauptbahnen 1.000 m und für Nebenbahnen 700 m vorgeschrieben.

Zur Sicherheit ist zusätzlich noch ein sogenannter Durchrutschweg vorhanden. Als Durchrutschweg (auch D-Weg) wird der Abstand von einem Ausfahr- oder Zwischensignal bis zum maßgebenden Gefahrpunkt bezeichnet. Im Zusammenhang mit dem European Train Control System (ETCS) werden im europäischen Eisenbahnraum dafür die Begriffe „overlap“ bzw. „overlap length“ verwendet.

„Der Durchrutschweg ist ein Teil der Gleisanlage hinter dem Ende einer Fahrstraße. Er wird von der Sicherungsanlage beansprucht, um Risiken, die durch einen über das Ende seiner Fahrstraße hinausfahrenden Zug entstehen, zu reduzieren.“ [5]

Eine ausführliche Definition des Begriffs „Durchrutschweg“ mit Verweis auf Inhalte der Richtlinie Ril 819 „LST-Anlagen planen“ der DB AG findet sich in [6].

8.1.1 Zugbildungsregeln

Die Regelungen zur Zugbildung unterliegen den europäischen Rechtsvorschriften, hier insbesondere der TSI „Verkehrsbetrieb und Verkehrssteuerung“ (TSI OPE), Abschnitt 4.2.2.5 „Streckenkompatibilität und Zugbildung“ [2] in Verbindung mit der TSI „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“, Abschnitt 4.4.5 „Bremsvermögen“ [7].

Bezüglich der Zugbremsung, Abschnitt 4.2.2.6 TSI OPE, sind im Rahmen der Zugbildung folgende Einzelparameter zu berücksichtigen:

- Im Zugverband müssen alle Fahrzeuge an ein durchgehendes automatisches Bremssystem gemäß den TSI LOC&PAS [7] und TSI WAG [8] angeschlossen sein.
- Das erste und das letzte Fahrzeug (einschließlich der Triebfahrzeuge) im Zugverband müssen eine funktionstüchtige selbsttätige Bremse besitzen.
- Wenn ein Zugverband während der Fahrt unbeabsichtigt in zwei Teile getrennt wird, müssen beide Zugteile selbsttätig durch Zwangsbremsung zum Stillstand gebracht werden.

Ergänzend dazu werden in der DIN EN 14198 [9] weitere Prüfungen zur Herstellung der Fahrbereitschaft eines lokbespannten Zugs genannt:

- Verfügbarkeit der Bremsenergieversorgung im gesamten Zug
- Status der Feststellbremse
- Ein- und Ausschaltzustand der dynamischen Bremse im Zusammenhang mit dem Antriebsystem
- Überprüfung der Verfügbarkeit der Druckluftbremsen durch Bremsdruckkontrolle (Bremsproben)

Während der Zugfahrt ist der Bremsstatus ständig zu überprüfen (siehe Punkt 5.32.9 gemäß DIN EN 14198 [9]).

Im Rahmen seiner Informationspflichten gegenüber den EVU hat der Betreiber der Eisenbahninfrastruktur für jede zu befahrende Strecke die relevanten Streckenmerkmale über das Eisenbahn-Infrastrukturregister (Register of Infrastructure – RINF) mitzuteilen. Das sind z. B.:

- Signalabstände (zwischen Vor- und Hauptsignalen, Anhalteweglängen) und die darin enthaltenen Sicherheitsmargen
- Neigungsverhältnisse
- zulässige Höchstgeschwindigkeiten
- Bedingungen für die Nutzung von Bremssystemen, die die Infrastruktur möglicherweise beeinträchtigen können, wie Magnetschienenbremsen, elektrische Bremsen und Wirbelstrombremsen

Das EVU hat laut DIN EN 14531 ([10], [11]) Vorschriften aufzustellen, die anzuwenden sind, wenn ein Zug im Betrieb die erforderliche Bremsleistung nicht erreicht. In diesem Fall muss das Eisenbahnverkehrsunternehmen das EIU umgehend benachrichtigen. Der Infrastrukturbetreiber kann daraufhin geeignete Maßnahmen ergreifen, um die Auswirkungen auf den Gesamtverkehr in seinem Netz zu reduzieren.

Das EVU gewährleistet, dass alle Fahrzeuge, die den Zug bilden, mit der bzw. den vorgesehnen Strecke(n) kompatibel sind; die jeweiligen Klimabedingungen sind hierbei zu berücksichtigen. Beispielhaft ist an dieser Stelle auf die Vereinbarung zwischen der französischen Eisenbahnsicherheitsbehörde Établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) und dem VDV zum Thema „Zugbildung und Bremsbedingungen von internationalen Güterzügen zwischen Frankreich und Deutschland“ [12] hinzuweisen. Diese Vereinbarung legt die besonderen Regeln der Zugbildung, Traktion, Bremsbedingungen und die zulässigen Geschwindigkeiten der internationalen Güterzüge fest, die zwischen dem französischen nationalen Eisenbahnnetz (RFN) und dem deutschen Eisenbahnnetz verkehren.

Die Vereinbarung zwischen EPSF und VDV ergänzt in Deutschland die VDV-Schrift 757 „Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen“ [13] (in Teilen wortgleich mit Richtlinie (Ril) 91501 „Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen“ der DB AG). Zu den Details der einzelnen Verkehre und zu den Einzelheiten der Umsetzung sind – wie bisher – bilaterale Vereinbarungen zwischen den Eisenbahnunternehmen erforderlich.

Auf wesentliche Inhalte des Dokuments IRS 40421 „Zugbildungs- und Bremsvorschriften für Internationale Güterzüge“ [14] ist bereits in Kap. 1.3 hingewiesen worden.

Zur Kraftschlussverbesserung zwischen Rad und Schiene kann der Triebfahrzeugführer beim Bremsvorgang die Sandstreueinrichtung des Triebfahrzeugs bedienen. Dabei sind die betrieblichen Vorgaben der Ergänzungsregelung Nr. B 007 zur „Kraftschlussausnutzung“ [15], der Er-

Im letzten Jahrzehnt sind zur Herstellung der Interoperabilität im europäischen Eisenbahnverkehr neue gesetzliche Regelwerke entstanden, die auch für die Gestaltung der Bremstechnik bindend sind. Diese werden im Handbuch „Bremstechnik von Eisenbahnfahrzeugen“ vorgestellt. Dabei werden die an die Bremskomponenten gestellten funktionalen und sicherheitsrelevanten Anforderungen aus den Regelwerken erläutert.

Dargelegtes physikalisches Grundwissen zur Abbremsung von Eisenbahnfahrzeugen führt den Leser im ersten Teil zu den Kapiteln Auslegung und Projektierung sowie zur Bewertung des Bremsvermögens der Bremsanlagen für ausgewählte Fahrzeuge und Züge. Zahlreiche detaillierte Ausführungen zur Bremssteuerung und Bremsregelung sowie verfügbarer Varianten der Energieumwandlung beim Bremsen geben Einblick in die Vielfältigkeit der Gestaltung von Bremsanlagen der Schienenfahrzeuge.

Der zweite Teil des Buchs widmet sich dem betrieblichen Bremseinsatz bei der Regelung der Zugfolge. Betrachtet wird unter dem genannten Aspekt zunächst das herkömmliche signalgeführte und anschließend das anzeigengeführte Fahren mit ETCS und ATO.

Das Buch richtet sich als Nachschlagewerk an den Leserkreis der Ingenieure, die mittelbar oder unmittelbar im Berufsleben im Fahrzeugbau, Fahrzeuginstandhaltung oder im Bahnbetrieb tätig sind.

Auszubildenden, besonders aus den Studienrichtungen der Eisenbahnverkehrstechnik und des -betriebs an den Hochschulen und Universitäten, dient dieses Buch zum Wissenserwerb und bildet eine Grundlage, sich die notwendigen Fertigkeiten und Fähigkeiten für die berufliche Tätigkeit auf dem Gebiet der Bremstechnik anzueignen.

Extra: Dank des kostenlosen enthaltenen E-Books stehen Nutzern eines Endgeräts mit PDF-Reader (PC, Tablet, Smartphone) die Inhalte des Werks auch elektronisch und mit Suchfunktion zur Verfügung.

ISBN 978-3-96245-259-9



9

783962

452599