

Frank Minde
 Deutsche Bahn AG - Technik/Beschaffung - DB Systemtechnik
 Leiter Bremse und Kupplungen (TZF8)
 Weserglaci 2, 32423 Minden (Westf.)
 Tel.: (937) 51 00 bzw. +49 (571) 393 51 00 - Fax: -10 82
 Frank.Minde@bahn.de

Grundlagen der Eisenbahnbremstechnik

1 Grundlagen	2
2 Entstehung und Prinzip der heutigen Druckluftbremse	2
2.1 Die Anfänge	2
2.2 Die durchgehende selbsttätige Druckluftbremse	3
2.3 Die durchgehende nicht selbsttätige Druckluftbremse	3
2.4 Die Weiterentwicklung zum heutigen Stand	3
3 Die Grundfunktionen der pneumatischen Hauptbauteile der Druckluftbremse	4
3.1 Das Führerbremssventil (Fbv)	4
3.2 Das Steuerventil	4
3.3 Die Bremsstellungen	4
3.4 Die elektro-pneumatische (ep-) Bremse	5
3.4.1 Indirekt wirkende ep-Bremse	5
3.4.2 Direkt wirkende ep-Bremse	6
3.5 Die Datenbus- oder Zugbus-Bremse	6
4 Der Bremsbetrieb	6
4.1 Bremsleistung und Bremsgewicht	6
4.2 Zuglängenrestriktion	7
4.3 Zugmassenrestriktion	7
4.4 Bremsstufen und Mindestbremsleistung	8
4.5 Bremsprobe	8
5 Bauteile, Charakteristika und Auslegung von Güterwagenbremsen	9
5.1 Hauptbauteile	9
5.2 Hand-, Feststell- oder Federspeicherbremse	10
5.3 Lastabbremmung	10
5.3.1 Notwendigkeit der Lastabbremmung	10
5.3.2 Der Lastwechsel	10
5.3.3 Die automatische Lastabbremmung	10
5.4 Die Klotzbremse	11
5.4.1 Grauguß-Bremsklotzsohlen	11
5.4.2 Verbundstoffsohlen	11
5.5 Auslegung von Güterwagen und Bremsberechnung	12
6 Bauteile, Charakteristika und Auslegung von Reisezugwagenbremsen	12
6.1 Scheibenbremsen	12
6.2 Gleitschutz	13
6.3 Magnetschienenbremse (Mg-Bremse)	13
6.4 Wirbelstrombremse (WB)	13
6.5 Fahrgastnotbremseinrichtung	14
6.6 Hauptluftbehälterleitung (HBL) und ep-Bremse	14
6.7 Auslegung von Reisezugwagen und Bremsberechnung	14
7 Bauteile, Charakteristika und Auslegung von Triebfahrzeugbremsen	14
7.1 Elektrodynamische Bremse	14
7.2 Hydrodynamische Bremse	15
7.3 Blending	15
7.4 Sicherheitsfahrerschaltung (Sifa)	15
7.5 Induktive Zugbeeinflussung (Indusi)	15
7.6 Sandstreueinrichtungen	15
8 Normen und Literaturhinweise	15
8.1 UIC-Merkblätter	15
8.2 DS der DB	16
8.3 Literaturhinweise	16

1 Grundlagen

Beim Bremsen ist eine Umwandlung der Bewegungsenergie in andere Energieformen (meist in Wärme) erforderlich. Neben den immer vorhandenen Fahrzeugwiderstandskräften (Lager-, Lauf- und Luftwiderstand) sind dazu im Fahrzeug regulierbare Einrichtungen vorzusehen.

Bremsen am Fahrzeug haben folgende Aufgaben:

- die Fahrgeschwindigkeit aus betrieblichen Gründen in gewollten Grenzen zu verringern bzw. bei Gefällefahrten konstant halten,
- drohende Gefahren abzuwenden,
- stehende Fahrzeuge gegen Abrollen zu sichern.

Bis auf die bei Bahnen eingesetzten Schienenbremsen (Magnet- u. Wirbelstrombremsen) wirken die Bremsen von Kraft- und Schienenfahrzeugen auf das Rad. Sie dürfen dabei nicht so stark bremsen, daß der Radsatz blockiert. Daher begrenzt die Haftreibung zwischen Rad und Schiene die Bremskraft (Haftwertabhängigkeit).

Wesentliche Unterschiede bei Bremsen für Schienenfahrzeuge gegenüber Kraftfahrzeugen sind:

- größere abzubremsende Massen (Pkw: 0,8 t/Radsatz, Bahn: 5-25 t/Radsatz),
- kleinerer Haftwert zwischen Stahlrad und Schiene ($\mu_H \approx 0,15$) als zwischen Gummirad und Fahrbahn ($\mu_H \approx 0,9$), dadurch längere Bremswege,
- wesentlich größere Anzahl von Fahrzeugen aufgrund von Zugbildung,
- Spurführung (kein Ausweichen, aber Entgleisen möglich),
- fahren auf Sicht nicht möglich, daher nach Signalisierung mit festgelegtem Bremsweg (400 m, 700 m- und 1.000 m- Vorsignalabstände und LZB-Betrieb bei der DB).

2 Entstehung und Prinzip der heutigen Druckluftbremse

2.1 Die Anfänge

Im letzten Jahrhundert verwendete man Hebelbremsen, die vom Wagen aus bedient werden konnten. Man ersetzte sie bald durch Schrauben- oder Spindelbremsen, die noch heute an Reisezug- und Güterwagen als Handbremsen zu finden sind. Zu ihrer Bedienung fuhren Bremser auf jedem Wagen mit, die durch Pfeifsignale des Tf aufgefordert wurden, die Bremsen mäßig oder stark anzuziehen bzw. sie zu lösen. Die Unterbringung der Bremser in Sitzen auf den Wagenkästen oder in Bremserhäusern war primitiv, die Verständigung bei Wind und Wetter unzuverlässig und die Bremswirkung schwach.

Eine Verbesserung war die um 1852 eingeführte Heberlein-Bremse (Hb), die man damals schon als durchgehende Bremse bezeichnete, da die Bremsen aller angeschlossenen Wagen von einer Stelle aus bedient werden konnten. Dieses geschah über ein entlang des Zuges gespanntes Seil, welches über an jedem Wagen befindliche Verbindungsseile das Bremsgestänge betätigt.

Man versuchte dann die potentielle Energie des Unter- oder Überdruckes der Luft anzuwenden, um Kräfte auszuüben und Bewegungen zu übertragen.

Dabei wurden Unterdruck-, Saugluft- oder Vakuumbremsen nur bei wenigen ausländischen und einigen Schmalspurbahnen weiterverfolgt, da der in der Praxis erzielbare Unterdruck von 0,7 bar gegenüber einer Druckluftbremse, bei der 3,8 bar Überdruck im Bremszylinder wirksam werden, bei gleicher Kolbenkraft größere Kolbendurchmesser und Einbauräume am Wagen erfordert.

Etwa um 1880 wurden die Druckluftbremsen eingeführt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, daß das Medium Druckluft sowohl die Bremsen innerhalb des Zuges steuert, als auch die Bremskraft erzeugt. Sie bestehen aus der Druckluftherzeugung, dem Hauptluftbehälter zum Speichern der Druckluft, dem Führerbremventil zum Regulieren der Bremskraft, der Hauptluftleitung HL zum Transport der Druckluft und zum Steuern der angeschlossenen Bremsen des Zuges, den Steuerventilen, Vorratsluftbehältern (R-Behälter) und Bremszylindern.

Die ersten durchgehenden Druckluftbremsen, die Carpenter- und die Schleifer-Bremse genügten den Anforderungen nicht. Es folgten die Westinghouse- und die Knorr-Bremse. Mit ihnen wurde durch ihre indirekte Wirkung das Prinzip der Selbsttätigkeit realisiert, so daß bei Zugtrennungen auch der verlorene Zugteil automatisch bremst.

2.2 Die durchgehende selbsttätige Druckluftbremse

Bei der indirekt wirkenden (selbsttätigen) Druckluftbremse werden die Bremszylinder mit Druckluft aus den R-Behältern gefüllt. Steuerventile reagieren dazu auf eine Absenkung des HL-Regeldruckes (5 bar) durch das Führerbremventil, welches Druckluft ins Freie leitet. Zum Lösen wird der Hauptluftleitungsdruck wieder angehoben, die Steuerventile entlüften die Bremszylinder und füllen die R-Behälter wieder auf.

2.3 Die durchgehende nicht selbsttätige Druckluftbremse

Bei der direkt wirkenden (nicht selbsttätigen) Druckluftbremse werden die Bremszylinder direkt mit Druckluft gefüllt. Besondere Steuerventile sind nicht erforderlich. Zum Lösen wird die Druckluft über das Führerbremventil ins Freie geleitet. Die direkte Bremse ist sehr einfach aufgebaut, sehr feinstufig regulierbar und deshalb auf Triebfahrzeugen als Zusatzbremse vorhanden. Für Züge ist sie nicht geeignet, weil sie bei Leitungsbruch unwirksam würde und weil zu Beginn einer Bremsung bei langen Zügen die transportierbare Druckluftmenge durch die HL zu den Bremszylindern nicht ausreicht.

2.4 Die Weiterentwicklung zum heutigen Stand

1926 erhielten Westinghouse und Knorr (mit der Kunze-Knorr-Bremse, KK-Bremse) die Zulassung für Güterzüge vom Internationalen Eisenbahn Verband IEV. Mit der KK-Bremse wurde erstmals ein Konzept für Mehrlösigkeit realisiert und gleichzeitig die Unerschöpfbarkeit verwirklicht. Auf dieser Funktionsbasis entwickelte Knorr durch seinen Chefkonstrukteur Hildebrand das Steuerventil weiter zur Bauart HiK, das 1932 die internationale Zulassung erhielt und bis Mitte der 50er Jahre Standard bei den deutschen Bahnen war.

In den 50er Jahren setzte sich bei den Steuerventilen die Membransteuerung gegen die Schiebersteuerung durch, und es kam zu einer Reihe von Neuzulassungen. Darunter auch das Knorr-Ventil mit Einheitswirkung KE. Es zeichnet sich durch einen modularen Aufbau aus und erfordert keine Anpassungsmaßnahmen an den Bremsanlagen der Fahrzeuge zur Einhaltung der UIC-Bestimmungen.

3 Die Grundfunktionen der pneumatischen Hauptbauteile der Druckluftbremse

3.1 Das Führerbremventil (Fbv)

Das Fbv ist das Betätigungsorgan zur Steuerung der Druckluftbremse. Grundsätzlich ist zu unterscheiden nach der Art der damit zu steuernden Bremse (indirekt o. direkt). Weiterhin gibt es Unterschiede in der Art der Bedienung:

- Bei der Zeitimpulssteuerung wird der Bremshebel in die gewünschte Brems- o. Lösestufe gebracht bis sich die gewünschte Wirkung einstellt. Danach ist die Abschlußstellung einzunehmen. (bei der DB in Triebwagen, VT, Regelausführung bei der SNCF)
- Bei der stellungsabhängigen und selbstabschließenden Steuerung ist jeder Hebelstellung eine definierte Wirkung zugeordnet (bei DB vorwiegend).

Mit dem Führerbremventil müssen folgende Handlungen möglich sein:

- Schnelles Auffüllen der HL (Füllstoßstellung) direkt aus dem Hauptluftbehälter (8-10 bar) des Tfz
- Füllen der HL und Aufrechterhalten des Regelbetriebsdruckes von 5 bar auch bei geringen Undichtigkeiten (Fahrtstellung des Fbv)
- Absenken bzw. Erhöhen des HL-Druckes in feinen Stufen für Betriebsbremsungen (Brems- u. Lösestufen) bis zur Vollbremsstellung (3,5 bar) und halten dieser Bremsanforderungen auch bei Undichtigkeiten
- Absenken des HL-Druckes über einen großen Querschnitt in kurzer Zeit bis auf 0 bar (Schnellbremsstellung)

In einer weiteren Stellung (Mittelstellung) ist die Nachspeisung vom Hauptluftbehälter in die HL abgesperrt, so daß das FbV deaktiviert ist und unter anderem auch eine Dichtheitsprobe durchgeführt werden kann.

3.2 Das Steuerventil

Die Steuerventile der einzelnen Fahrzeuge steuern die Füllung der Hilfs- bzw. Vorratsluftbehälter und bilden nach Maßgabe des Druckes in der Hauptluftleitung einen Vorsteuer- bzw. Bremszylinderdruck.

Dabei reagieren UIC-Steuerventile auf den Gradienten der HL-Druckabsenkung, der über der Unempfindlichkeitsgrenze liegen muß, so daß kleine Undichtigkeiten in der HL nicht zu einer Bremsung führen. Nach der Anforderung einer Bremsstufe wird die Absenkung des HL-Druckes unterstützt und in kürzestmöglicher Zeit ein Mindestdruck aufgebaut, der Hysterese, Spiele und Dehnungen überwindet und die Bremse zum Anlegen bringt.

Der weitere Druckanstieg im Bremszylinder korrespondiert mit dem am Steuerventil anliegenden HL-Druck bis zum Erreichen des Vorsteuer- bzw. Bremszylinderhöchstdruckes (max. 3,8 bar).

3.3 Die Bremsstellungen

Da sich die Druckwelle in der Hauptluftleitung mit nur 250-280 m/s fortpflanzen kann, ergibt sich für das Ansprechen des letzten Steuerventils im Zugverband eine Zeitverzögerung, die Durchschlagzeit. Durch den nur am Fbv vorhandenen Luftauslaß verflacht zudem der Gradient der Druckabsenkung zum Zugende hin. Das hat zur Folge, daß der hintere Zugteil aufläuft. Es besteht die Gefahr von Entgleisungen und der Zerstörung der Zug- und Stoßeinrichtungen. Beim Lösen liegen analoge Verhältnisse vor, dadurch verschärft, daß die Luft zum Wiederauffüllen der R-Behälter und zur HL-Druckanhebung benötigt wird.

Um diesen Erscheinungen zu begegnen, werden die Füll- und Lösezeiten der Bremszylinder verlängert, für lange Güterzüge (Bremsstellung G) stärker als für kürzere Reisezüge (Bremsstellungen R u. P).

Bremsstellung	Bremszylinder-Füllzeit	Bremszylinder-Lösezeit
G	18-30 s	45-60 s
R, P	3-5 s	15-20 s

Die Bremsstellung R trägt im Unterschied zur Bremsstellung P bei gleichen Bremskraftentwicklungswicklungszeiten der Notwendigkeit Rechnung, bei höheren Geschwindigkeiten ($v > 120$ km/h) höheren Bremskräften zu bedürfen.

Die an jedem Wagen vorhandenen Bremsstellungen sind mit einer Umstelleinrichtung wählbar.

3.4 Die elektro-pneumatische (ep-) Bremse

Elektro-pneumatische (ep-) Bremsen bieten die Möglichkeit, die nachteiligen Eigenschaften der reinen Druckluftbremsen, die als Signal- und Arbeitsmedium die Druckluft nutzt, zu minimieren. Sie reduziert den Einfluß der langen Signallaufzeit (Durchschlagzeit) mit Auswirkungen auf die äquivalente Bremsentwicklungszeit und damit dem Bremsweg und der Zugdynamik und verbessert die mäßige Regulierbarkeit hervorgerufen durch den Lufttransport in der mit Strömungswiderständen behafteten HL. Ihre Nutzung bietet sich insbesondere bei Personenzügen an, die ohnehin elektrische Energie nutzen und zur Versorgung bremsfremder Verbraucher wie Tür- und WC-Steuerungen, Luftfederungen usw. mit einer unter 8-10 bar stehenden Hauptluftbehälterleitung HBL ausgestattet sind. Auch bei der ep-Bremse ist zwischen der direkt und der indirekt wirkenden zu unterscheiden.

3.4.1 Indirekt wirkende ep-Bremse

Bei Reisezügen des Fernverkehrs hat sich die indirekt wirkende Zweileitungs-ep-Bremse durchgesetzt, die die Funktionen der pneumatischen Bremse als zusätzliches System unterstützt, indem sie beim Bremsen die HL vor jedem Steuerventil absenkt bzw. die R-Behälter über die HBL beim Lösen auffüllt. Führerbremventil und Steuerventile arbeiten wie bei der reinen Druckluftbremse. Beim Einleiten eines Brems- oder Lösevorganges über das Führerbremventil werden jedoch gleichzeitig die Magnetventile an den einzelnen Wagen erregt. Dadurch wird die HL nahezu gleichzeitig vor jedem Steuerventil entlang des Zuges gesteuert. Damit auch beim Lösen kein Zeitverzug durch den Lufttransport in der HL entsteht, werden die R-Behälter über die separate Hauptluftbehälterleitung HBL (8-10bar) wieder aufgefüllt (Trennung von Steuer- und Versorgungsleitung).

Zum Einsatz kam die indirekt wirkende ep-Bremse aber erst mit der Förderung nach Fahrgast-Notbremsüberbrückungssystemen (NBÜ), mit denen ein Halt an ungünstigen Stellen unterbunden werden soll, dadurch, dass die eingeleitete Fahrgast-Notbremsung schnell gelöst (überbrückt) wird (siehe 6.5).

Es sind zwei ausgeführte Systeme zu unterscheiden:

- die sogenannte DB-ep-Bremse, wie sie in den DB-Fernverkehrs-Reisezugwagen verwendet wird, nutzt das IS- oder Lautsprecherkabel zur Signalgebung, die Schaltenergie für die Magnetventile wird der Spannungsversorgung der Wagen entnommen. Ihre Funktionstüchtigkeit wird nicht überwacht, daher ist sie keine sicherheitsrelevante Bremse.
- die sogenannte UIC-ep-Bremse nach MB 541-5, nutzt die UIC-Steuerleitung nach vorgenanntem Merkblatt und überträgt neben den Brems-, Löse- und Notbremsüberbrückungssignalen auch die dazugehörigen Schaltströme. Damit ist sie auch für Fahrzeuge ohne eigene Energieversorgung wie z.B. Güterwagen verwendbar. Eine permanente Überwachung der Steuerleitung auf Unterbrechung, Kurzschluß sowie Vorhandensein genau eines Zugschlusses gibt Auskunft über die momentane Verfügbarkeit.

3.4.2 Direkt wirkende ep-Bremse

Direkt wirkende ep-Bremsen werden vor allem in Nahverkehrstriebzügen verwendet. Ein elektrischer Bremssteller bestromt bei Brems- und Lösevorgängen Magnetventile, die zeitgleich im gesamten Zug Luft aus der HBL bzw. den Vorratsluftbehältern in den Bremszylinder gelangen lassen bzw. diesen ins Freie entlüften. Dem Vorteil einer sehr guten Regulierbarkeit steht die fehlende Selbsttätigkeit gegenüber, welche entweder

- durch eine zusätzliche indirekt wirkende Druckluftbremse oder
- durch ein relativ aufwendiges elektrisches System (Sicherheitsschleife) sichergestellt werden muß.

Im ersten Fall sind keine Kosteneinsparungen durch den Entfall der konventionellen Pneumatik erzielbar, im zweiten Fall fehlt die bremstechnische Kompatibilität zu anderen Fahrzeugen (Lokomotiven, Reisezug-, Güterwagen) was u.a. Überführungen und ein Abschleppen im Schadfall erschwert. Daher ergibt sich in der Praxis letztendlich doch wieder eine Zweileitungsbremse, da auf eine HL nicht verzichtet werden kann.

3.5 Die Datenbus- oder Zugbus-Bremse

Die konventionelle Ansteuerung der indirekten und direkten ep-Bremse kann aber auch durch einen Datenbus ersetzt werden, der es ermöglicht die Intelligenz zur Ansteuerung der Bremsen an den einzelnen Bremssteuerungen verteilt im Zug unterzubringen. Damit lassen sich auch zahlreiche Zusatzfunktionen wie Automatisierungen, Diagnosen, Fernbetätigungen oder ein kontinuierliches Blending (siehe 7.3) leicht durchführen.

Solche auf Basis von Kommunikationssystemen realisierten Bremsen bestehen im wesentlichen aus einem Triebfahrzeug-Steuerrechner zur Sollwertgenerierung und –steuerung, dem Zugbus auf Draht- oder Funkbasis zur Übertragung der Information innerhalb des Zuges, der Energieversorgung (zentral vom Triebfahrzeug oder wagenautark) und der Wagenausrüstung mit der für die Kommunikation notwendigen Elektronik (Gateway), der Wagenelektronik zur Ansteuerung der Bremse und der Wagenpneumatik. Gatewayelektronik und Steuerelektronik für die Bremse können dabei auch in einer Hardware integriert sein.

Für die der Bremssteuerung zugrundeliegende Kommunikation gibt es verschiedene Ansätze und Realisierungen. Für Trieb- und Reisezüge findet als Zugbus der WTB (Wire Train Bus) nach UIC 556 Anwendung. Das Kommunikationssystem ist ausgelegt auf Zuglängen bis ca. 860 m und z.Zt. maximal 32 Kommunikationsknoten. Innerhalb eines Fahrzeugs wird über einen Fahrzeugbus (z.B. dem MVB- Multi Vehicle Bus) kommuniziert.

Für Güterzüge ist der WTB nicht geeignet, zumal andere Anforderungen im Vordergrund stehen. So sind für Güterzüge die mögliche Buslänge (mindestens 1.000 m) sowie die Anzahl der Teilnehmer (bis zu 125) und auch die Kosten entscheidend.

4 Der Bremsbetrieb

4.1 Bremsleistung und Bremsgewicht

Für die Praxis ist es nötig, das Bremsverhalten eines Zuges, gebildet aus verschiedenen Einzelwagen, zu kennen, um zu entscheiden, bis zu welcher Höchstgeschwindigkeit der Zug sicher seinen vorgegebenen Bremsweg (Vorsignalabstand - 10% Bremswegsicherheit) in Abhängigkeit der jeweiligen Streckencharakteristik (Neigungen, Gefälle) einhalten kann.

Um die Jahrhundertwende begnügte man sich dazu damit, die Zahl der gebremsten Achsen ins Verhältnis zur Gesamtachsenzahl zu setzen. Es entstanden die Begriffe Bremsprozente bzw. Bremsleistung B_{rh} (λ).

1936 ermittelte man anhand des damals längsten und schwersten im Betrieb vorkommenden Zuges (15 Reisezugwagen) den charakteristischen Verlauf der mittleren Verzögerung über der Bremsausgangsgeschwindigkeit. Das Bremsverhalten dieses Zuges entsprach

fortan der Kennzahl „ $\lambda = 100 \text{ Brh}$ “ und stellt eine "Musterverzögerung" dar, die der Normierung dient. Darauf aufbauend entstand das UIC-Merkblatt 544-1, welches maßgeblich ist für die Bestimmung der Bremsleistung. In Anlehnung an das physikalische Gesetz:

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung} \quad \text{bzw.:} \quad \text{Verzögerung} = \frac{\text{Bremskraft}}{\text{Masse}}$$

und der Normierung

$$\frac{\text{Verzögerung}}{\text{"Musterverzögerung"}} = \frac{\text{Bremskraft} / \text{"Musterverzögerung"}}{\text{Masse}}$$

definieren sich die Bremshundertstel λ und das Bremsgewicht B:

- Bremshundertstel eines Fahrzeuges:
$$\lambda_{\text{Fahrzeug}} = \frac{B_{\text{Fahrzeug}}}{m_{\text{Fahrzeug}}} \times 100 \text{ (\%)}$$
- Bremshundertstel eines Zuges:
$$\lambda_{\text{Zug}} = \frac{\sum B_{\text{Fahrzeuge}}}{\sum m_{\text{Fahrzeuge}}} \times 100 \text{ (\%)}$$
- Bremsgewicht:
$$B = m \times \lambda \text{ (t)}$$

Durch die Normierung wird die Dimensionslosigkeit der Größe Bremshundertstel und auch die Einheit „Tonnen“ für das Bremsgewicht bestimmt.

Das Bremsgewicht wird im Versuch ermittelt. Für Wagen, die mit Grauguß-Bremsklotzsohlen ausgerüstet sind, ist eine auf empirisch ermittelten Faktoren beruhende Berechnung des Bremsgewichtes möglich, gemäß UIC Mb 544-1.

Das ermittelte Bremsgewicht der einzelnen Bremsstellungen wird dann am Wagen angeschrieben.

4.2 Zuglängenrestriktion

Die äquivalente Bremsentwicklungszeit und damit die sich einstellende mittlere Verzögerung des Zuges bei gegebener Bremsausrüstung ist abhängig von der Durchschlagzeit und der HL-Länge. Somit ist das Bremsgewicht abhängig von der Zuglänge.

Da es im Betrieb bei der Zugbildung nicht praktikabel ist, für jeden Wagen in Abhängigkeit von der Länge des Zuges in den er eingestellt wird, ein unterschiedliches Bremsgewicht zu bestimmen, bezieht sich der angeschriebene Wert bei Güterwagen auf eine Zuglänge von 500 m (Reisezugwagen 400 m) Wagenzuglänge. Ist ein Wagenzug kürzer entsteht eine Sicherheitsmarge; ist er länger, muß das Bremsgewicht des Zuges mit Abschlägen versehen werden. Dieser Abschlag kann bei einer Gesamtlänge von 700 m 10% betragen.

Mit anrechenbarer ep- oder Datenbus-Bremse könnten diese Restriktionen entfallen, da das Bremsgewicht nahezu Zuglängenunabhängig würde. Da sich der Zug dann ungefähr wie ein Einzelwagen verhält, kann sogar ein Zuschlag zum angeschriebenen 500 m-Bremsgewicht von ca. 12% gewährt werden.

4.3 Zugmassenrestriktion

Um die längsdynamischen Kräfte, hervorgerufen durch die Durchschlagzeit in Verbindung mit der HL-Länge, zu minimieren, werden bei langen bzw. schweren Zügen der Bremsstellung „P“ die ersten Fahrzeuge im Zugverband in Bremsstellung „G“ gefahren, wodurch sich deren volle Bremswirkung später einstellt. Dadurch kann der Zug zu Beginn einer Bremsung gestreckt gehalten werden. Diese Minderung der Bremsleistung aus längsdynamischen Gründen bezeichnet man als Zugmassenrestriktion.

Im betrieblichen Regelwerk sind die entsprechenden Festlegungen dazu getroffen. So ist beispielsweise bei einem Gewicht des Wagenzuges von über 1.200 t bei den an der Spitze laufenden Tfz sowie bei den ersten 5 Wagen die Bremsart „G“ einzustellen. An diesen Fahrzeugen müssen dann vom Bremsgewicht 20% für die Bremsart G abgezogen werden.

Mit anrechenbarer ep- oder Datenbus-Bremse könnten auch diese Restriktionen je nach Zugbild entfallen, da alle Bremsen gleichzeitig zu wirken beginnen.

4.4 Bremsstafel und Mindestbremshundertstel

Mindestbremshundertstel schreiben das für einen bestimmten Streckenabschnitt erforderliche „Mindestbremsvermögen“ eines Zuges verbindlich vor. Zusammen mit den vorhandenen Bremshundertsteln ist die Bestimmung der Höchstgeschwindigkeit möglich, bei der der Zug innerhalb des Vorsignalabstandes noch sicher zum Halten kommt. Welche Bremshundertstel bei welchem Vorsignalabstand, bei welchem Gefälle und bei welcher Geschwindigkeit nötig sind, ist der jeweiligen vom Bundesminister für Verkehr genehmigten Bremsstafel zu entnehmen.

Wenn z. B. für einen Zug mit 66 Brh nach Längen- und Massenrestriktionen bei einer geforderten Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h die 1.000 m- Bremsstafel zugrunde zu legen ist, ergibt sich bei einem maßgeblichen Gefälle von beispielsweise 10‰ eine Geschwindigkeitseinbuße von 5 km/h.

Mit einer anrechenbaren ep- oder Zugbusbremse hingegen, könnte diese Einschränkung entfallen und wie oben beschrieben sogar ein Zuschlag gewährt werden.

4.5 Bremsprobe

Die EBO schreibt vor, dass eine Bremsprobe vorzunehmen ist, bevor ein Zug den Anfangsbahnhof verlässt. Ziel der Bremsprobe ist die Identifizierung der funktionstüchtigen Bremsen im gesamten Zug sowie der Nachweis der Funktionstüchtigkeit der kompletten Befehls- und Ausführungskette für das Bremsen und Lösen im gesamten Zug für alle funktionstüchtigen Bremsen, die im Stillstand getestet werden können. Auch nicht auf das Bremsgewicht angeordnete bzw. anrechenbare Bremsen müssen zur Vermeidung von Störungen im Betrieb in die Bremsproben mit einbezogen werden.

Grundsätzlich wird zwischen voller und vereinfachter Bremsprobe unterschieden.

Die volle Bremsprobe hat eine Gültigkeitsdauer von 24 Stunden und wird im Allgemeinen beim Aufrüsten bzw. nach der Zugzusammenstellung durchgeführt. Sie umfasst alle bei der Zugfahrt eingesetzten Bremsen und besteht aus folgenden Hauptarbeitsgängen:

- Prüfen des Zustandes der Bremsen
- Bremse füllen - Lösezustand feststellen
- Dichtheit prüfen
- Bremsen anlegen - Bremszustand feststellen
- Bremse lösen - Lösezustand feststellen

Die vereinfachte Bremsprobe umfasst alle im täglichen Betrieb vorkommenden Veränderungen in der Befehlskette der Bremsen (Übernahme nach Abstellung oder Entkuppeln, Kontrolle hinterer Zugteil nach Kuppeln, Kontrolle neuer Führerstand nach Wenden). Sie umfasst mindestens die Überprüfung:

- der neuen Mensch-Maschine-Schnittstelle des Triebfahrzeugführers (Tf)
- der Integrität der veränderten technischen Schnittstellen,
- der Durchgängigkeit der Steuerleitungen bis zum Zugende und
- im Fall der veränderten Zugbildung die Aktualisierung der Bremsberechnung.

Im Normalfall ist die Bremsprobe manuell durchzuführen, wobei die entsprechenden Bremszustände nacheinander einzunehmen sind und die jeweilige Reaktion der einzelnen Bremsen darauf durch Kontrollieren der entsprechenden Anzeigeeinrichtungen bzw. des Bremszustandes festzustellen ist. Eine manuelle Bremsprobe bedarf deshalb eines beträchtlichen Zeit- und Personalaufwandes.

Sind an den Fahrzeugen eines Zuges die entsprechenden technischen Voraussetzungen vorhanden, können sowohl die vereinfachte als auch die volle Bremsprobe automatisiert ausgeführt werden.

Als automatische Bremsprobe gilt dabei ein vom System selbsttätig durchgeführter Prüflauf, dessen Ablauf und Ergebnis sich auf entsprechenden Anzeigeeinrichtungen offenbart. Die automatische Bremsprobe ist durch eine zusätzliche Funktionsprüfung zu ergänzen, bei welcher die Betätigung der Bremsbedienelemente für die anschließende Zugfahrt und die Überprüfung deren Wirkung anhand der bremsbetrieblichen Melde- und Anzeigeeinrichtungen für den Regelbetrieb unter Anwesenheit eines Tf geprüft wird.

Darüber hinaus gibt es noch die Benutzergeführte Bremsprobe, bei welcher dem Tf auf einem Display schrittweise die durchzuführenden Handlungen dargestellt werden, die er selbst auszuführen hat. Die benutzergeführte Bremsprobe schließt durch die erforderliche Betätigung der Bedienelemente die Funktionsprüfung mit ein.

Werden während des Betriebes einzelne Bremsen als gestört registriert, so sind sie ggf. auszuschalten. Die Bremsberechnung ist dann entsprechend zu korrigieren. Werden Bremsen wieder eingeschaltet, so dürfen sie erst nach erfolgter voller Bremsprobe, die ihre Funktion nachweisen, in Betrieb genommen und ihr Bremsgewicht angerechnet werden.

5 Bauteile, Charakteristika und Auslegung von Güterwagenbremsen

Güterwagenbremsen müssen sich durch eine einfache, kostengünstige Bauweise hoher Zuverlässigkeit und Lebensdauer auszeichnen und international frei verwendbar sein, das heißt, daß die Alpentauglichkeit und die Instandhaltbarkeit durch Verwendung von genormten Bauteilen zu gewährleisten ist.

Die Bremsausrüstung muß das große Leer/Beladen-Verhältnis von ca. 1:4 ausgleichen können. Güterwagen verkehren je nach ihrer lauf- und bremstechnischen Eignung mit einer Höchstgeschwindigkeit von 100 oder 120 km/h (s- bzw. ss-Fähigkeit) und besitzen in der Regel Klotzbremsen.

5.1 Hauptbauteile

- Hauptluftleitung (HL) zum Steuern der Brems- und Lösevorgänge und zum Auffüllen der Luftbehälter (Durchmesser: 1" bei Reisezugwagen und 1¹/₄" bei Güterwagen),
- Luftabsperrhähne mit Endlagensicherung und vorauseilender kupplungsseitiger Entlüftung zum Öffnen und Schließen der Hauptluftleitung (HL) an den Wagenenden,
- Bremskupplungen an den Wagenenden zum Verbinden der Hauptluftleitungen (HL) der einzelnen Wagen,
- Steuerventile oder Steuerapparate zum Regeln des Bremszylinderdruckes in Abhängigkeit vom Druck in der Hauptluftleitung (HL),
- Vorratsluftbehälter (R-Behälter) zum Speichern der Druckluft für das Füllen der Bremszylinder,
- Bremsabsperreinrichtungen zum Ein- und Ausschalten der Bremse,
- Bremsartwechsel zum Einstellen der verschiedenen Bremsarten (z.B.: G, P, R, R+Mg),
- Lösezug zum Lösen der Druckluftbremse und zum Beseitigen starker Überladungen,
- Bremszylinder zum Erzeugen von Kolbenkraft durch den eingesteuerten Luftdruck (C-Druck),
- Bremsgestängesteller zum Konstanthalten des Bremsklotz- bzw. Bremsbelagspieles

- Bremsgestänge zum Verstärken und zum möglichst gleichmäßigem Übertragen der Kolbenkraft auf die Bremsklötze bzw. Bremsbeläge,
- Bremsklotzschuhe bzw. Bremsbelaghalter für die Aufnahme der Reibelemente,
- Bremsklötze bzw. Bremsbeläge zum Erzeugen der Bremskraft durch Reibung auf den Radlaufflächen bzw. Bremsscheiben (Umwandeln der kinetischen Energie in Wärme).

5.2 Hand-, Feststell- oder Federspeicherbremse

Alle Trieb- und Reisezugwagen sowie die Güterwagen für das Befördern bestimmter Ladungen wie lebende Tiere, Fahrzeuge, Säuren, brennbare Flüssigkeiten usw. erhalten eine vom Wagen aus bedienbare Handbremse. Von den übrigen Güterwagen müssen mindestens 20% mit einer Handbremse ausgerüstet sein. Ist diese nur von außen (vom Boden) aus bedienbar, spricht man von einer Feststellbremse. Neuerdings finden bei Triebfahrzeugen und Triebzügen Federspeicherbremsen Verwendung, die die Bremse mittels Federkraft zum Anlegen bringen und mittels Systemdruck gelöst werden.

Die Handbremsen wirken auf das Bremsgestänge der Druckluftbremse, müssen im angezogenen Zustand selbsthemmend sein und das Fahrzeug mit ausreichender Sicherheit gegen Abrollen und Abrutschen im Gefälle sichern.

5.3 Lastabbremung

5.3.1 Notwendigkeit der Lastabbremung

Die Bremsen der Fahrzeuge müssen so ausgelegt sein, daß einerseits im Leerzustand die Radsätze nicht überbremst werden und andererseits im Lastzustand noch ausreichende Bremsleistung für die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit vorhanden sind. Wenn bei gleichbleibender Bremskraft das Fahrzeuggewicht durch die Beladung zunimmt, so verringert sich die Bremswirkung. Dies macht sich um so stärker bemerkbar, je geringer das Leergewicht und je größer die Zuladung ist, also insbesondere bei Triebwagen und Reisezugwagen im Nahverkehr sowie vor allem bei Güterwagen.

Bei diesen Fahrzeugen ist die Anpassung der Bremskraft (Lastabbremung) an den Lastzustand der Wagen stufenweise (Lastwechsel) oder kontinuierlich (automatische Lastabbremung) erforderlich.

5.3.2 Der Lastwechsel

Der Lastwechsel erfolgt durch einen Wechsel der Bremsgestänge-Übersetzung (Leer-/Laststange) oder durch stufenweise Veränderung des Bremszylinderhöchstdruckes. Die Umschaltung in die Stellungen „Leer“ bzw. „Beladen“ wird bei Über- bzw. Unterschreiten des Umstellgewichtes entweder manuell oder automatisch durch ein Schalt- oder Wiegeventil vorgenommen.

Das Umstellgewicht ist zusammen mit den Bremsgewichten „Leer“ und „Beladen“ auf dem Schildlager der Lastwechsel-Umstelleinrichtung angegeben.

5.3.3 Die automatische Lastabbremung

Die automatische Lastabbremung ist im Gegensatz zum Lastwechsel eine selbsttätig geregelte kontinuierliche Anpassung der Bremskraft an das Gesamtgewicht des Fahrzeugs und ermöglicht über den ganzen Lastbereich bzw. einen großen Teil davon eine proportional zum Fahrzeuggewicht ansteigende Bremsleistung und somit annähernd konstante Bremsleistung.

Die Veränderung der Bremskraft erfolgt pneumatisch nach Maßgabe eines lastabhängigen T-Druckes, welcher in Wiege- oder Einstellventilen aus dem Fahrzeuggewicht gebildet wird oder sich aus dem Balgdruck bei luftgederten Fahrzeugen ergibt.

In Lastbremsventilen wird der aus dem Steuerventil kommende, mit dem HL-Druck korrespondierende Vorsteuerdruck entsprechend dem anstehenden T-Druck korrigiert und meist leistungsverstärkend übersetzt (Relaisventil), so daß entweder ein lastkorrigierter Bremszylinderdruck (RLV 11) entsteht oder ein zusätzlicher Bremszylinder (RLV 12) gefüllt wird.

5.4 Die Klotzbremse

Die Klotzbremse war und ist die am häufigsten verwendete Reibungsbremse in Güterfahrzeugen, aufgrund ihres einfachen Aufbaus und ihrer Kostengünstigkeit, denn als Reibfläche wird die Radlauffläche genutzt. Die Auslegung und die Konstruktion wird wesentlich durch das Reibwertverhalten zwischen Bremsklotzsohle und Rad beeinflusst.

5.4.1 Grauguß-Bremsklotzsohlen

Die Graugußsohle P10 ist die UIC-Standardsohle mit einem Phosphorgehalt von 1%. Daneben wurden bei einigen Bahnen auch andere Sohlen für spezielle Einsätze verwendet, wie die P14- oder die P30-(Samson-)sohle. Es haben sich unterschiedliche Bremsklotzformen für die verschiedenen Anforderungen herausgebildet, die Ausführungen Bg und Bgu für Güterwagen und die Ausführung Bdg für klotzgebremste Reisezugwagen.

Der Reibwert ist von der Anpreßkraft, der Temperatur und der Geschwindigkeit abhängig. Im oberen Geschwindigkeitsbereich ist der Reibwert von Grauguß-Bremsklotzsohlen gering, so daß eine schlechte Ausnutzung des verfügbaren Kraftschlusses festzustellen ist, wenn im Bereich kleiner Geschwindigkeiten ein Überbremsen vermieden werden soll.

Daher wird bei Hochleistungsklotzbremsten (Rapid- oder R-Bremsen mit $\lambda > 135\%$) durch geschwindigkeitsabhängige Stufung der Bremsklotzkraft die Bremswirkung im Bereich höherer Geschwindigkeit verstärkt und bei einer Geschwindigkeit, bei der die Bremskraft sich der Kraftschlußgrenze nähert, automatisch verringert. Dazu wird ein geschwindigkeitsabhängiger Bremsdruckregler am Radsatz angebaut, welcher auf ein am Steuerventil angebrachten Druckübersetzer wirkt.

Der Leistungsfähigkeit der GG-Bremsklotzsohle sind allerdings Grenzen gesetzt. Die Klotzkraft kann nicht beliebig erhöht werden, um Überhitzungen der Radlauffläche sowie ein „Schmieren“ des Klotzes zu vermeiden. Als kritisch sind vor allem lange Gefällefahrten (Gotthard-Rampe) anzusehen. Bei Wagen, die nur gußeiserne Klötze haben, darf daher das Bremsgewicht B jedes einzelnen Radsatzes 18 t nicht überschreiten.

5.4.2 Verbundstoffsohlen

Ein gravierender Nachteil der Graugußsohle ist die Riffelbildung auf der Radlauffläche die zu beträchtlichen Lärmemissionen führt. Mit der Entwicklung von Verbundstoffsohlen sowohl hohen (K- Sohlen) als auch niedrigen Reibwertes (L-Sohlen) wird dieser Erscheinung begegnet und somit ein wichtiger Beitrag zur Lärmreduktion geleistet. Erhöhten Beschaffungskosten und ein größerer Verschleiß des Reibpartners Rad steht dabei ein ca. 3-4 mal geringerer Eigenverschleiß entgegen.

Verbundstoffsohlen und –beläge bestehen aus mehreren Komponenten:

- Reibmaterialien: Eisenspäne, Messingwolle, mineralische Fasern
- Bindemittel: Phenolharze, Melaminharze, synthetischer Kautschuk
- Füllstoffe: Glimmer, Kreide, Talkum
- Gleitmittel: Graphit, Sulfide, Koks
- Reibstützer: Harze, Gummimehl
- Hilfsstoffe: Weichmacher, Lösemittel, Vulkanisationsbeschleuniger

Die genaue Zusammensetzung variiert je nach Produkt und unterliegt im Allgemeinen dem Fabrikationsgeheimnis des Herstellers.

Da der Reibwert der Bremsklötze aus Verbundstoff sowie der Bremsbeläge der Scheibenbremse eine ähnliche Charakteristik wie der Kraftschlußbeiwert μ_H zwischen Rad und Schiene aufweist, kann auch bei konstanter Bremsbelag- bzw. Bremsklotzkraft der verfügbare Kraftschluß im ganzen Geschwindigkeitsbereich gleichmäßig ausgenutzt werden. Die unterschiedliche Reibwertcharakteristik von Verbundstoff- und P10-Sohlen gleichen Reibwertniveaus erschwert die freie Tauschbarkeit dieser Sohlen. Derzeit befinden sich sogenannte LL-Sohlen in der Entwicklung, welche ohne Änderungen an der Fahrzeugbremsausrüstung die freie Tauschbarkeit mit GG-Sohlen ermöglichen sollen.

Problematisch bei den z.Z. laufenden Entwicklungen ist die Reibwertstabilität bei unterschiedlichen Anpreßkräften sowie dem Einwirken von Nässe, Eis und Schnee und die geringere Wärmeleitfähigkeit der Sohlen verbunden mit höherer thermischer Belastung des Rades.

5.5 Auslegung von Güterwagen und Bremsberechnung

Die Bedingungen, die s- bzw. ss-fähige Güterwagen einzuhalten haben, sind im UIC-Mb 541-04 bzw. 543 festgelegt. Danach müssen ss-fähige Güterwagen ($v_{\max} = 120$ km/h) über eine automatische Lastabbremung verfügen, die bis zu einer maximalen Radsatzlast von 18 t 100 Brh einregelt und bei der höchstzulässigen Radsatzlast von 20t noch 90 Brh ergibt. Die ss-Fähigkeit erfordert besondere, kostenintensive Instandhaltungsmaßnahmen.

Der s-fähige Güterwagen ($v_{\max} = 100$ km/h) hat bei maximaler Radsatzlast (22,5 t) noch $\lambda = 65\%$ zu erbringen, was bei automatischer Lastabbremung ein Bremsgewicht von 14,5 t je Radsatz ergibt. Bei zweistufiger Lastabbremung dürfen $\lambda = 125\%$ nicht überschritten und im Umstellbereich $\lambda = 55\%$ nicht unterschritten werden.

Für klotzgebremste Reisezug- und Güterwagen wird die gesamte rechnerische Bremsausrüstung mit der Festlegung der Bremszylindergröße, den Bremszylinderdrücken, den Übersetzungs- und Abmessungsverhältnissen des Bremsgestänges, den Klotzkräften und den Bremsgewichten bzw. -hundertstel auf einem besonderen Bremsberechnungsblatt nach UIC-Mb 544-1 übersichtlich zusammengestellt. Zur Berechnung der Bremsgewichte werden dabei empirisch gewonnene k-Werte benötigt. Diese sind abhängig von der Bauart der Bremsklötze (Einzel- oder Doppelbremsklotz) sowie von der Klotzkraft.

Für Verbundstoffsohlen und Scheibenbremsen existieren solche Faktoren nicht, so daß die Bremsgewichte durch Versuchsfahrten zu bestimmen sind.

6 Bauteile, Charakteristika und Auslegung von Reisezugwagenbremsen

Moderne Reisezüge verkehren mit Geschwindigkeiten von über 140 km/h. Dazu sind wesentlich größere Bremsleistungen nötig, als sie mit einer Klotzbremse zu realisieren wären. Daher trifft man dort auf Scheibenbremsen.

6.1 Scheibenbremsen

Scheibenbremsen werden als Rad- oder Wellenbremsscheiben ausgeführt. Erstere sind dabei aufwendiger und stärker den Umwelteinflüssen Feuchtigkeit und Schnee ausgesetzt.

Vorteile der Scheibenbremse gegenüber der Klotzbremse:

- bessere Ausnutzung der Kraftschlußgrenze (kürzere Bremswege, gleichmäßige Bremsverzögerung, keine Neigung zu Flachstellen bei geringen Geschwindigkeiten)
- höhere Bremsleistungen bei gleichzeitiger Vermeidung thermischer Überbeanspruchungen der Radlaufflächen
- geringere Lärmemission: keine Riffelbildung, geringeres Rollgeräusch, geringere Quietschneigung, kein klapperndes Gestänge durch Kompaktbauweise,
- höherer Belagreibwert (kleinere Bremszylinder, geringerer Luftverbrauch),

- geringerer Verschleiß als bei Graugußsohlen (Bremsstaub, Sohlenwechselintervalle).

Als Nachteile der Scheibenbremse ist die schlechte Einsehbarkeit und Zugänglichkeit zu nennen, die Anzeigeeinrichtungen bzw. eine Grube zum Belagwechsel erforderlich macht, erhebliche Mehrkosten gegenüber einer Ausrüstung mit GG-Klotzbremsen sowie eine Erhöhung der unabgefederten Massen und eine Lüfterverlustleistung durch die Bremscheiben.

Die Scheiben sind aus Kugelgraphit-, Grau- oder Stahlguß sowie neuerdings auch aus Aluminium. Als Beläge kommen Verbundstoff- oder Sinterbeläge zum Einsatz.

6.2 Gleitschutz

Gleitschutzeinrichtungen verringern die Bremswirkung der Druckluftbremse durch Auslassen von Luft und erfüllen somit bei vermindertem Haftwert Rad/Schiene wichtige Aufgaben:

- Die Bremskraft muß so geregelt werden, daß die Haftreibung optimal ausgenutzt wird und möglichst kurze Bremswege erreicht werden.
- Das Blockieren der Radsätze und lang anhaltender starker Schlupf zwischen Rad und Schiene müssen verhindert werden, um Schäden an den Radlaufflächen zu vermeiden.
- Bei der Funktion der Gleitschutzeinrichtungen soll möglichst wenig Druckluft verbraucht werden, damit die Bremse nicht erschöpft wird.

Die Entwicklung von Gleitschutzeinrichtungen erfolgte bei der Bahn lange bevor sich die Automobilindustrie dem Thema zuwandte. Die zunächst entwickelten, rein mechanischen Schwungmassenregler sollten vorrangig Flachstellen verhindern. Bei modernen mikroprozessorgesteuerten Gleitschutzeinrichtungen wird dagegen besonderer Wert auf die Schlupfregelung gelegt, um einerseits möglichst hohe Bremskräfte übertragen zu können und andererseits die Radlaufflächen nicht zu überbeanspruchen.

6.3 Magnetschienenbremse (Mg-Bremse)

Zur sicheren Einhaltung des Bremsweges aus hohen Geschwindigkeiten ($v > 140\text{km/h}$) auch bei schlechten Haftwertverhältnissen sind vom Haftwert Rad/Schiene unabhängige Mg-Bremsen erforderlich. Da sie nicht regelbar sind, wirken sie nur bei Schnellbremsungen, wo die Bremsmagnete aus der Hochlage auf die Schienen abgesenkt, elektrisch erregt und durch das sich aufbauende Magnetfeld auf die Schiene gepreßt werden. Die Bremskraft ist das Produkt aus der magnetischen Zugkraft und dem Reibwert zwischen den Polschuhen und der Schiene. Sie wird durch Mitnehmer auf das Fahrzeug übertragen. Aufschweißungen und Polschuhverschleiß mindern die Bremskraft der Mg-Bremse.

Da die Bremskraft zum Halt hin sehr stark ansteigt, wird die Mg-Bremse unterhalb von 50 km/h abgeschaltet. Das Einschalten erfolgt bei Reisezugwagen im hohen Geschwindigkeitsbereich durch eine vom HL-Druck gesteuerte Zusatzeinrichtung, das Ausschalten über einen drehzahlabhängigen Signalgeber.

Die fortschreitende Entwicklung von Permanentmagneten führte bei der SBB zum Einsatz von Permanentmagnetschienenbremsen (PMg-Bremse), deren Wirkungsweise der der Mg-Bremse entspricht.

6.4 Wirbelstrombremse (WB)

Die Wirbelstrombremse ist wie die Mg-Bremse haftwertunabhängig und besteht aus hintereinander angeordneten Elektromagneten, die abwechselnd Nord- und Südpole bilden. Zur Bremsung werden die Wirbelstrommagnete bis auf einen geringen Abstand auf die Schienen abgesenkt und erregt. Dadurch werden Wirbelströme induziert, die entgegengesetzt gerichtete Magnetfelder aufbauen und somit eine mit abnehmender Geschwindigkeit zunehmende und abzuregelnde Bremskraft erzeugen. Die Wirbelstrombremse ist regelbar und arbeitet verschleißfrei. Nachteilig ist der hohe Energiebedarf für die Erregung, die Erwär-

mung der Schiene sowie die Beeinflussung von Signalstromkreisen. Zur Anwendung kommt die Wirbelstrombremse im ICE3.

6.5 Fahrgastnotbremseinrichtung

Für Personenwagen ist der Einbau von Fahrgastnotbremsen verbindlich vorgeschrieben. Deren Betätigung wirkt über eine Steuerleitung oder einen Drahtzug auf die HL und entlüftet diese.

Bei Fahrzeugen, die in Tunnelabschnitten verkehren, hat der Triebfahrzeugführer die Möglichkeit eine eingeleitete Fahrgastnotbremsung aufzuheben (Notbremsüberbrückung- NBÜ). Dazu nimmt er am Fbv die Füllstoßstellung ein, die elektrisch über das ep-Kabel das Notbremsventil schließt. Dadurch ist ein gefahrloses Anhalten außerhalb des Tunnels möglich.

Neuerdings kommen Systeme zum Einsatz, die im Bahnsteigbereich sofort eine Schnellbremsung bewirken und während der Zugfahrt keine Bremsung, sondern lediglich eine Signalisierung beim Triebfahrzeugführer bewirken, so dass es auch aus geringen Geschwindigkeiten nicht zu einem unzeitigen Halt kommen kann (NBÜ/ep-System „Minden 2004“).

6.6 Hauptluftbehälterleitung (HBL) und ep-Bremse

Alle neueren Reisezugwagen sind neben der Hauptluftleitung HL mit einer Hauptluftbehälterleitung HBL, die unter 10 bar steht, ausgestattet. Sie übernimmt die Funktion der Druckluftversorgung von der HL, die somit nur noch Steuerungsaufgaben wahrnimmt (Zweileitungsbremse) und versorgt Verbraucher wie Türsteuerung, Mg-Bremse, Luftfederung usw..

Das Vorhandensein einer durchgängigen Elektro-Energieversorgung und einer HBL in Reisezugwagen ermöglicht auch die Nutzung der Vorteile der ep-(NBÜ)-Bremssteuerung.

6.7 Auslegung von Reisezugwagen und Bremsberechnung

Reisezugwagen müssen in der Bremsstellung P mindestens 105 Brh aufweisen. In der Bremsstellung R sind minimal 135 und maximal 170 Brh zulässig. Die Auslegung erfolgt nach DIN 25008. Die Bremsgewichte in den verschiedenen verfügbaren Bremsstellungen (G,P, R, R+Mg) sind durch Bremsbewertungsfahrten zu bestimmen.

Die gesamte rechnerische Bremsausrüstung mit der Festlegung der Bremszylindergröße, den Bremszylinderdrücken, den Übersetzungs- und Abmessungsverhältnissen des Bremsgestänges, den Belagkräften und den Bremsgewichten bzw. -hundertsteln wird auch hier auf einem besonderen Bremsberechnungsblatt nach UIC-Mb 544-1 übersichtlich zusammengestellt.

7 Bauteile, Charakteristika und Auslegung von Triebfahrzeugbremsen

Neben den Bauteilen zur Druckluft- und Energieerzeugung, -aufbereitung, -trocknung und -speicherung, dem Führerbremventil als Bremsbetätigungsorgan für das Triebfahrzeug und den Zug und der direkten Zusatzbremse sind weitere Bremsbauteile auf einem Triebfahrzeug erforderlich.

7.1 Elektrodynamische Bremse

Zur verschleißlosen Bremsung können die Fahrmotoren von angetriebenen Fahrzeugen herangezogen und als Generatoren geschaltet werden. Die erzeugte elektrische Energie kann in Widerständen in Wärme umgewandelt und über Lüfter an die Umgebung abgeführt (Widerstandsbremse - W) oder in das Netz zurückgespeist werden (Netzbremse - N). Die elektrodynamische Bremse kann je nach Erregung darüber hinaus fahrdrahtabhängig (BR 110/112/143 - W; 101/120 - N) oder fahrdrahtunabhängig (BR 103 - W) sein.

Sie wird über den Fahrschalter oder über einen Bremssteller, der mit dem Führerbremventil gekuppelt ist, bedient. Die Kupplung mit dem Fbv kann aufgehoben werden, so daß bei Be-

darf Druckluft- und elektrodynamische Bremse unabhängig voneinander betätigt werden können.

7.2 Hydrodynamische Bremse

Bei Triebfahrzeugen mit hydraulischer Kraftübertragung kann eine besondere Bremskupplung als verschleißlose zusätzliche Bremse genutzt werden. Die Bremskraft wird durch Regelung der Füllung gesteuert.

Für die Zusammenarbeit mit der Druckluftbremse gibt es ähnliche Möglichkeiten wie bei der elektrodynamischen Bremse, auch sie kann im einfachsten Fall völlig unabhängig betätigt werden und wirken.

7.3 Blending

Beim Zusammenwirken von Druckluft- und dynamischer Bremse darf die Haftwertgrenze nicht überschritten werden. Vorrangig wird stets die dynamische Bremse eingesetzt. Wegen ihrer mit abnehmender Fahrgeschwindigkeit abfallenden Charakteristik muß dann die pneumatische Bremse hinzugeschaltet werden (Blending). Da die Druckluftbremse keine beliebig kleinen Bremskräfte aufbringen kann, wird im kritischen Bereich die dynamische Bremskraft reduziert bis die Druckluftbremse ganz weggeschaltet werden kann.

7.4 Sicherheitsfahrschaltung (Sifa)

Die Sifa löst eine Zwangsbremmung (Schnellbremsung) aus, wenn durch fehlende Betätigung von der Dienstunfähigkeit des Triebfahrzeugführers ausgegangen werden muß.

7.5 Induktive Zugbeeinflussung (Indusi)

Die Indusi bewirkt eine Zwangsbremmung, wenn der Triebfahrzeugführer nicht entsprechend der Signalisierung reagiert. Dazu sind an den entsprechenden Streckenpunkten im Gleis sowie an den Triebfahrzeugen Magnete verlegt bzw. angebracht, welche auf die gleiche Frequenz abgestimmt sind.

7.6 Sandstreueinrichtungen

Sandstreueinrichtungen sind zur Verbesserung ungünstiger Haftwertverhältnisse zwischen Rad und Schiene an führenden bzw. angetriebenen Fahrzeugen vorzusehen, so daß sicher angefahren und gebremst werden kann.

Mittels Druckluft gelangt der Sand aus dem Sandvorratsbehälter durch das Sandrohr zur Sandstredüse. Dabei ist die Rieselfähigkeit bei allen Witterungen, sowie der punktgenaue Eintrag des Sandes in den Radaufstandspunkt sicherzustellen.

8 Normen und Literaturhinweise

8.1 UIC-Merkblätter

540	Druckluftbremsen für Güter- und Personenzüge
541	Bauteile
541-03	Führerbremssventilanlage
541-04	Bremse-Vorschriften für den Bau der verschiedenen Bremsteile
541-05	Bremsteile:Gleitschutzanlage
541-06	Bremsteile:Magnetschienenbremse
541-07	Bremsteile:Druckbehälter
541-1	Vorschriften für den Bau der verschiedenen Bremsteile
541-2	Abmessungen der Schlauchverbindungen und elektrischen Leitungen; Die Arten der Luft- und Elektroanschlüsse und ihre Anordnung an Güterwagen und Reisezugwagen mit automatischer Kupplung
541-3	Bremsbeläge für Fahrzeuge mit Scheibenbremse

541-4	Bremsklotzsohlen aus Verbundstoff mit hohem Reibwert (K-Sohlen)
541-5	Elektropneumatische Bremsen für Güter- und Reisezüge
542	Austauschbarkeit der Bremsteile
543	Vorschriften über die Ausrüstung und Verwendung der Fahrzeuge
544-1	Bremsleistung
544-2	Von dynamischen Bremsen der Lokomotiven und Triebwagen, deren Bremskraft auf das Bremsgewicht angerechnet wird, zu erfüllende Bedingungen
545	Anschriften, Merk- und Kennzeichen
546	Hochleistungsbremsen für Personenzüge
547	Druckluftbremsen - Normalprogramm für Versuche
549	Handbremsausrüstung an den Güterwagen für den internationalen Verkehr, die in Großbritannien laufen dürfen
580	Anschriften und Kennzeichen sowie Wagenlauf- und Nummernschilder für im internationalen Verkehr eingesetzte Fahrzeuge des Personenverkehrs
830	Bremskupplungsköpfe
832	Bremssohlen
833	Bremshebel und Bremsdreiecke

8.2 DS der DB

300	EBO
408	Fahrdienstvorschrift
915 01	Bremsvorschrift-Bedienen, Prüfen, Warten
915 02	Bremsen instandhalten

8.3 Literaturhinweise

- Janicki, Fahrzeugtechnik Teil 1: Bremseinrichtungen, Güter- und Reisezugwagen, Eisenbahn-Fachverlag Heidelberg, Mainz, 2000
- Janicki, Fahrzeugtechnik Teil 2: Triebfahrzeuge und Triebwagen, Eisenbahn-Fachverlag, Heidelberg, Mainz, 2001
- Kuper, Janicki, Meffert: Bremstechnik und Bremsproben, Eisenbahn-Fachverlag Heidelberg, Mainz, 2. Auflage, 1992
- Sauthoff, F.: Bremskunde für den technischen Wagendienst, Eisenbahn-Fachverlag Heidelberg, Mainz, 1978
- Sauthoff, F.: Bremskunde für Triebfahrzeugführer, Josef Keller Verlag Starnberg, 5. Auflage, 1973
- Sachs, K.: Elektrische Triebfahrzeuge, Band I, 2. Auflage, Springer-Verlag Wien, New York 1973
- Autorenkollektiv: Grundausrüstungen, Reihe Schienenfahrzeugtechnik, Transpress-Verlag Berlin, 1983, S. 113- 215
- Braun, Ottersbach: Neue Führerbremssventilanlagen der DB für Streckenlokomotiven, Sonderdruck Elsners Taschenbuch der Eisenbahntechnik 1984, Tetzlaff-Verlag Darmstadt, 1984
- Knorr-Bremse AG: Handbuch Bremstechnische Begriffe und Werte, 1990
- Gralla, Dietmar: "Eisenbahnbremstechnik", Werner-Verlag Düsseldorf, 1999
- Sonder: Elektronische Bremsabfrage und -Steuerung <EBAS>, ZEV+DET Glas. Ann. 122 (1998) Heft 9, S. 481ff
- Witte, Minde, Engelmann: Zentrale Komponenten eines Intelligenten Güterzuges, ETR 11/2000
- Minde, Witte: FEBIS: Kommunikationsbasierte elektronisch gesteuerte Bremse, ETR 05/2001
- Meier-Credner, W.-D.: Die lineare Wirbelstrombremse-Entwicklung und Einsatz im ICE3, ETR-Eisenbahntechnische Rundschau 49 (2000) Heft 6
- Jaxthaimer: Die Bremsen und Luftanlagen, R. Pflaum-Verlag, 1952

- Gräber, J.; Meier-Credner, W.-D.: Die lineare Wirbelstrombremse im ICE 3 - Betriebskonzept und erste Erfahrungen, ETR-BahnReport 2002