

Skript „Bremsen der Fahrzeuge des SPNV“ Version 1.2

Dr.-Ing. Martin Kache

17. Januar 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Die Bremsausrüstung der Fahrzeuge des SPNV - Fallbeispiele	5
2	Grundlagen	19
2.1	Spezielle Randbedingungen	19
2.2	Regelwerke für die Bremsausrüstung von Fahrzeugen nach BOStrab	21
2.2.1	Rechtlicher Rahmen	21
2.2.2	Regelungen nach § 36 BOStrab	22
2.2.3	Regelungen der „Technischen Regeln Bremsen“ (TR Br)	27
2.2.4	Festlegungen der DIN EN 13452-1	28
3	Physik der Bremsung	37
3.1	Kinematik von Bremsungen	37
3.2	Fahrdynamik der Bremsung	39
4	Bremssystem	43
4.1	Grundaufbau	43
4.2	Grundkomponenten	44
4.2.1	Bedienelemente	44
4.2.2	Bremssteuerung	44
4.2.3	Energieversorgung und Bremskraftregelung	45
4.2.4	Bremskrafterzeuger	45
4.2.5	Überwachung und Diagnose	45
4.2.6	Weitere Bestandteile von Bremssystemen	46
5	Bremskrafterzeugung	47
5.1	Bremsbauarten	47
5.2	Elektrodynamische Bremsen	49
5.3	Aufgaben und Charakterisierung mechanischer Bremsen im SPNV	52
5.4	Integration der Rad(satz)bremsen	52
5.5	Elektropneumatische Bremsen	58
5.6	Elektrohydraulische Bremse	60
5.6.1	Systemeigenschaften	60
5.6.2	Systemaufbau	61
5.6.3	Aktiv- vs. Passivbremse	65
5.6.4	Hydrogeräte	66
5.7	Elektromechanische Bremsen	71
5.8	Bremsbeläge	72

5.9	Magnetschienenbremsen	76
6	Energiespeicher im SPNV	79
6.1	Motivation zur Energiespeichernutzung	79
6.2	Anwendungsbeispiele	83
6.2.1	RNV-Bahnen mit „Energysaver“	83
6.2.2	Vossloh Tramlink Rostock	84
6.2.3	Tramway de Nice	85
6.2.4	Straßenbahn Nanjing	86
	Literatur	87

1 Die Bremsausrüstung der Fahrzeuge des SPNV - Fallbeispiele

Aufgabenstellung

Bitte lesen Sie sich die folgenden Fallbeispiele aufmerksam durch und machen Sie sich Notizen zur Beantwortung folgender Fragen:

1. Welcher der folgenden Fahrzeugkategorien ist das Beispielfahrzeug zuzuordnen?
 - a) Straßen- oder Stadtbahnfahrzeug
 - b) Zweisystemfahrzeug (BOStrab/EBO oder EBO/BOStrab)
 - c) U-Bahn-Fahrzeug
 - d) S-Bahn-Fahrzeug
2. Welche Bestandteile des Bremssystems werden im Text erwähnt?
3. Welche Funktionalitäten des Bremssystems werden im Text erwähnt?
4. Welche Bremsausrüstungen besitzt das Fahrzeug und wann kommen diese jeweils zum Einsatz?
5. Welche der erwähnten Funktionalitäten oder Eigenschaften des Systems empfanden Sie als bemerkenswert?
6. Sammeln Sie alle Termini, Fragen oder unklaren Zusammenhänge, die aus Ihrer Sicht im Rahmen der Vorlesung noch geklärt werden müssen.

Beispiel 1: Baureihe C der U-Bahn München



Abbildung 1.1: U-Bahn-Fahrzeuge des Typs C1 (links) und C2 (rechts) der Münchner Verkehrsgesellschaft (MVG)

„Jeder Wagen ist mit einer elektro-pneumatischen (EP-) Reibungsbremse der Bauart KBGM-P der Knorr Bremse AG, München, sowie einer automatischen Bremsluftleitung/Notbremsleitung ausgerüstet und verfügt zusätzlich über eine Federspeicherbremse.

Die EP-Bremse dient zur Halte-, Fahrerüberwachungs-, Zwangs-, Abreiß- und Notbremsung, und die Federspeicherbremse hat die Aufgabe, das Fahrzeug im Stillstand festzuhalten.

Am Drehgestell ist jeweils ein Bremszylinder der mechanischen Bremse mit einer Federspeichereinheit ausgestattet. Im Fehlerfall kann die Federspeicherbremse mit einer pneumatischen Notlöseeinrichtung gelöst werden.

Jeder Radsatz ist mit einem Bremszylinder mit einer Bremszangeneinheit und einer belüfteten Aluminiumbremsscheibe ausgestattet. Die Bremszylinder der mechanischen Bremse werden mit Druckluft betätigt. Die Steuerung der Druckluftbremse erfolgt elektro-pneumatisch, d. h. es werden im Zugverband alle Bremsventile elektrisch angesteuert.

Zusätzlich kann die EP-Bremse als Ersatzbremse genutzt werden. Dieser Fall tritt nur auf, wenn mehrere Antriebe ausgefallen sind und die restlichen Antriebe thermisch entlastet werden müssen, während sie die Bremsfunktion ausüben. Da dies in einigen Fällen auch zur thermischen Überlastung der Bremsscheibe führen könnte, wurde ein Temperaturmodell für die mechanische Bremse entwickelt. Dazu berechnet der Computer der Bremssteuerung aus den durchgeführten Bremsungen und dem Beladungszustand die thermische Belastung der Bremsscheibe. Beim Überschreiten von Grenzwerten wird eine Geschwindigkeitsbeschränkung vorgenommen. Bei 200 °C errechneter Scheibentemperatur ist unter Berücksichtigung aller Toleranzen immer noch eine Geschwindigkeit von 70 km/h für einen voll beladenen Zug möglich.“

Auszug aus: Erler, Gerald und Radtke, Jan: „U-Bahn-Züge Typ C 1.9 für München - Mechanischer Teil“ in: ZEVrail Glasers Annalen, Bd. 129 (2005), H. 6-7 (Juni-Juli), S. 216-225

„Der Zug wird primär durch die verschleißarme Bremsung mit Hilfe des Antriebssystems verzögert. Die beim generatorischen Bremsen von den Motoren rückgewandelte kinetische Energie wird bei aufnahmefähigem Fahrstromnetz ressourcensparend und kostensenkend ins Fahrstromnetz zurückgespeist. Der ins Traktionssystem eingebundene Bremswiderstand dient dem elektrischen Bremssystem nur bei nicht aufnahmefähigem Netz als Ohmsche Last. Unterhalb einer Geschwindigkeit von 1 km/h fordert die Antriebssteuerung die Haltebremse an. Dies ist eine pneumatische Scheibenbremse mit eigener Bremssteuerung. Sie wirkt, solange der Zug nicht abgeschaltet ist. Bei abgestelltem Zug halten bei der Hälfte der Radsätze fernbedienbare Federspeicher die Bremsbacken an den Scheibenbremsen. [...]

Der Druck der Haltebremse wird von der Bremssteuerung bei geöffneten Fahrgastraumtüren - also im Bahnhof - vermindert. Das verkürzt die Lösezeit vor dem Anfahren und beschleunigt deshalb den Zugumlauf. Nach Aufbau des Fahrmoments durch die Fahrmotoren löst die Bremsteuerung die Haltebremse, wobei ein Rückwärtsrollen verhindert wird.

Beim Ausfall eines Antriebs wird die Bremsleistung der übrigen Antriebe anteilig erhöht. Erst wenn beim Ausfall mehrerer Antriebe die thermische Belastung der verbleibenden Traktionssysteme zu groß wird, wird die elektro-pneumatische Scheibenbremse zur Unterstützung herangezogen. In dieser Situation wird aus dem Beladungszustand und der Menge der von den noch aktiven Traktionssystemen abzuführenden Bremsenergie des Gesamtzugs die noch mögliche thermische Belastung der verbleibenden Traktionseinheiten berechnet und die Bremsenergie auf diese verteilt.“

Auszug aus: Birnfeld, Bernhard und Mayer, Bernhard: „Neue U-Bahn-Wagen der dritten Generation vom Typ C für München - Zugkonzept und elektrische Ausrüstung“ in: ZEVrail Glasers Annalen, Bd. 129 (2005), H. 6-7 (Juni-Juli), S. 226-245

Beispiel 2: Leoliner



Abbildung 1.2: Leoliner der Leipziger Verkehrsbetriebe (LVB)

„Der LEOLINER verfügt über drei von einander unabhängige Bremssysteme. Der wirtschaftlich bedeutendste Bremsbetrieb ist die elektrodynamische Bremse mit generatorisch arbeitenden Fahrmotoren. Dabei wird die Bewegungsenergie in elektrische Energie gewandelt und ins Oberleitungsnetz zurückgespeist. Ist dies nicht möglich, wird die Elektroenergie im Bremswiderstand in Wärmeenergie umgewandelt. Die elektrodynamische Bremse wirkt auf alle vier Radsätze der Triebdrehgestelle, arbeitet verschleißfrei und ist gleitschutz- und gewichtsabhängig geregelt.

Ebenfalls auf jeden Treibradsatz wirkt die Federspeicherbremse. Sie dient einerseits als Zusatzbremse bei niedrigen Geschwindigkeiten und andererseits als Feststellbremse bei Fahrzeugstillstand. Im Wesentlichen besteht sie aus einem Federspeicher mit Magnetspule, der Bremsscheibe, dem Bremsattel und dem Bremsgestänge.

Bei Ausfall der Elektromechanik kann sie notfalls durch Betätigen des Handlösehebels am Federspeicher gelöst werden.

Zur Unterstützung der Bremse im Gefahrfall werden sowohl bei den Triebdrehgestellen als auch bei dem Laufdrehgestell Magnetschienenbremsen eingesetzt. Sie bestehen aus Elektromagneten, die beweglich zwischen den Rädern an den Drehgestellen aufgehängt sind, und besitzen eine Reibkraft von 70 kN je Triebdrehgestell und 55 kN je Laufdrehgestell.

Eine Betriebsbremse für das Laufgestell ist für die Leipziger Einsatzbedingungen nicht erforderlich und deshalb auch nicht vorgesehen. Die konstruktive Auslegung des Laufgestells lässt bei Bedarf die Nachrüstung eines elektrohydraulischen Bremssystems aber ohne weiteres zu. [...] Die Drehgestelle für die Halberstädter Fahrzeuge sind wegen der Anforderungen aus den grundlegend anderen Platzverhältnissen eine Neukonstruktion. [...] Aufgrund der kleinen Spurweite war von der Innenlagerung der Radsätze auf die Außenlagerung überzugehen. Ebenfalls den veränderten Einbaubedingungen folgend, wurde das elektromechanische durch ein elektrohydraulisches Federspeicher-Bremssystem ersetzt. Eine Betriebsbremse für das Laufdrehgestell ist auch unter den topografischen Bedingungen in Halberstadt nicht erforderlich, so dass analog zu Leipzig hier die Magnetschienenbremse als Unterstützung der Gefahrenbremse ausreichend ist.“

Auszug aus: Jacob, Dietmar: „LEOLINER-Straßenbahnfahrzeug - vom Prototyp zum Serienfahrzeug“ in: eb - Elektrische Bahnen, Bd. 104 (2006), H. 3 (März), S. 104-113

„Der „Leoliner“ verfügt über drei voneinander unabhängige Bremssysteme. Der Fahrmotor wirkt beim Bremsbetrieb als generatorische Bremse. Dabei wird die Bewegungsenergie in elektrische Energie gewandelt und ins Oberleitungsnetz zurückgespeist. Ist dies nicht möglich, wird die Elektroenergie innerhalb des Bremswiderstandes in Wärmeenergie umgewandelt. Die elektrodynamische Bremse wirkt auf alle Achsen der Triebdrehgestelle, arbeitet verschleißfrei und ist gleitschutz- und gewichtsabhängig geregelt.

Die Federspeicherbremse besteht im Wesentlichen aus einem Federspeicher mit Magnetspule, der Bremsscheibe, den Bremsklötzen und dem Bremsgestänge. Sie dient einerseits als Zusatzbremse bei niedrigen Geschwindigkeiten sowie als Feststellbremse bei Fahrzeugstillstand. Jede getriebene Achse ist mit einer Federspeicherbremse ausgerüstet. Die Notlösung der Federspeicherbremse erfolgt durch Betätigen des Handlösehebels am Federspeicher.

Zur Unterstützung der Gefahrenbremse werden sowohl bei den Triebdrehgestellen als auch bei dem Laufdrehgestell Schienenbremsen eingesetzt. Sie bestehen aus Elektromagneten, die beweglich zwischen den Rädern an den Drehgestellen aufgehangen sind. Werden die Magnete vom 24 V DC System mit Strom versorgt so ziehen sie sich mit ihren Bremschuhen an die Schiene an und reiben mit einer Haftkraft von 70 kN/Triebdrehgestell bzw. 55 kN/Laufdrehgestell auf der Schiene.“

Auszug aus: Jacob, Dietmar: „Der „Leoliner“- ein Produkt aus Leipzig“ in: v+t - Verkehr und Technik, Bd. 56 (2003), H. 12 (Dezember), S. 479-488

Beispiel 3: Stadtbahn Karlsruhe



(a) Zweissystemfahrzeug GT8-100D/2S-M



(b) Niederflurfahrzeug GT8-70D/N

Abbildung 1.3: Stadtbahnfahrzeuge Karlsruhe

„Alle Triebdrehgestelle und die Lauffahrwerke besitzen einheitliche MG-Bremsen mit 67 kN Anzugskraft [...].

Die Bremsanlagen bestehen aus elektrodynamischer (ED-) und Magnetschienen-(MG-)Bremse sowie beim 2S¹-Fahrzeug aus elektro-pneumatischer (EP-), beim N²-Fahrzeug elektrohydraulischer (EH-)Bremse.

Beim ersten und vorletzten Treibradsatz sind bei allen Fahrzeugen baugleiche, beheizbare, druckluftbetätigte, richtungsabhängig angesteuerte Sandstreu Düsen am Drehgestell angebracht. Sie werden automatisch bei Schleuder- und Gleitvorgängen betätigt. Die Sandkästen können sowohl von innen wie von außen über staubdichte Verschlüsse befüllt werden und haben ein Schauglas sowie eine Inspektionsöffnung. [...]

In die PWR³-Behälter sind Bremswiderstände integriert. Soweit Bremsenergie nicht zum Heizen genutzt wird, wird sie dort in Wärme umgesetzt, wenn sie nicht vom DC-Fahrleitungsnetz aufgenommen werden kann. [...]

Die vier 127-kW-Fahrmotoren jedes Fahrzeugs sind voll gekapselt und treiben über ein zweistufiges Stirnradgetriebe und eine zweigelenkige Kardanholzwellen-Keilpaketkupplung den Radsatz an. [...]

Das komplette Aggregat wird im Drehgestellrahmen voll abgefedert aufgehängt. Auf der Hohlwelle sitzt eine innenbelüftete Brems Scheibe, die von einem hydraulisch betätigten, zweistufigen Federspeicher gebremst wird. Das zugehörige Hydrogerät sitzt mitsamt Membranspeicher ebenfalls auf dem Drehgestellrahmen.“

Auszug aus: Ludwig, Dieter; Forcher, Peter; Schlitter, Kai und Himme, Claus: „Niederflur- und Zweissystem-Mittelflurfahrzeuge für S-Bahnnetz Karlsruhe“ in: eb - Elektrische Bahnen, Bd. 98 (2000), H. 4 (April), S. 142-151

¹2S: Zweissystem (750 V DC und 15 kV 16 2/3 Hz)

²N: Niederflur

³PWR: Pulswechselrichter

Bezüglich der als GT6-70 D/N bezeichneten Kurzvariante des GT8-70 D/N liefert die Fachliteratur folgende Informationen:

„Der quer aufgehängte, wassergekühlte und gekapselte ABB-Asynchron-Fahrmotor, dessen größte Drehzahl nahezu 6000 U/min beträgt, ist mit seinem zweistufigen BSI-Getriebe und der Scheibenbremse am Fahrgestellrahmen aufgehängt und treibt die Hohlwelle an. Der Radsatz selbst wird über eine BSI-Paketkupplung angetrieben. Als Bremse wird eine hydraulische Knorr Federspeicher-Not- und Parkbremse verwendet. [...]

Die Scheibenbremsen sind als stufenlose Aktivbremsen mit Gleitschutz ausgeführt. Alle Räder werden mit VSG-Schallabsorbern ausgerüstet. Jedes Triebdrehgestell hat in der Hauptfahr- richtung zwei pneumatisch bediente Sandstreuer mit einer elektrischen Heizung der Rohre. Die zwei Umrichter pro Drehgestell sind in einem Container auf dem Dach über den Dreh- gestellen untergebracht, in dem sich auch der Bremswiderstand und die Kühlanlage für die beiden Motoren und die Wechselrichter befinden. [...]

Die kombinierte Netz-Widerstandsbremse ist, wie üblich, die Betriebsbremse. Sechs Magnet- schienenbremsen der Fa. Knorr-Bremse, München, mit einer Bremskraft von 67 kN vervoll- ständigen die Ausrüstung.“

Auszug aus: Hondius, Harry: „Vergleich der neuen Mittelflur-Stadtbahnwagen der Verkehrsbetrie- be Karlsruhe und der Kölner Verkehrsbetriebe“ in: ZEV + DET Glasers Annalen, Bd. 120 (1996), H. 11/12 (November/Dezember), S. 448-460

Beispiel 4: Fahrzeuge der Dresdner Verkehrsbetriebe (DVB AG)



(a) NGT D8 DD



(b) NGT D12 DD

Abbildung 1.4: Fahrzeuge der zweiten Generation von Niederflur-Straßenbahnen der Dresdner Verkehrsbetriebe

„Leider konnte für die Fahrzeugbremsen noch kein elektromechanisches System geordnet werden. Hier würde vielleicht ein breiteres Interesse der Verkehrsunternehmen die Industrie zum Handeln anregen. Die nun doch wieder zur Anwendung gelangte elektrohydraulische Bremsanlage ist auf Grund der technischen Weiterentwicklung jedoch kompakter und näher am Einsatzort. Zweistufige Federspeicherbremsen an den Treibachsen und gleitschutzgeregelte Aktivbremsen an den Losrädern kommen zum Einsatz.

Das Hilfslösen und Wiedereinbremsen der Federspeicher ist durch elektrische Hilfslöse-Hydrogeräte vom Wageninneren aus möglich. Ein mechanisches Notlösen pro Drehgestell ist von außen über Seilzug realisiert. Zusätzlich kann eine hydraulische Fremdeinspeisestelle zur Erzeugung des Notlösedruckes mittels externer Handpumpe genutzt werden.

Weitere Masseeinsparungen konnten bei den Laufdrehgestellbremsen realisiert werden. Die Anzahl der verbleibenden bremsbaren Achsen und der Schienenbremsen ermöglichte es, nur eine Achse pro Laufgestell mit beidseitigen Aktivbremsen auszurüsten.

Ergänzt wird das Bremssystem durch jeweils zwei 64 kN Schienenbremsen pro Drehgestell und einer mit Nachblaseinrichtung versehenen Sandungsanlage vor den führenden Achsen der Triebdrehgestelle. [...]

Jedes Gelenk wird mittels Endschalter auf unzulässige Knickwinkel überwacht. Bei Auslenkung über den kritischen Bereich lösen diese Schalter eine Gefahrenbremsung aus. [...]

Für den in Reichweite des Fahrers angeordneten NOT-AUS-Schlagschalter wurden von der DVB AG besondere Forderungen zur Funktion erhoben. So darf der NOT-AUS-Schalter keine vorher mit dem Sollwertgeber eingeleiteten Bremsfunktionen in ihrer Wirkung vermindern. Er ist beim intakten Fahrzeug zur Gefahrenbremsstellung des Sollwertgebers funktionell parallel geschaltet.

Zusätzlich bietet der NOT-AUS-Schalter im Störfall dem Fahrer die Möglichkeit zur softwareunabhängigen Einleitung einer Bremsung mit der entsprechend dem Störungszustand des Fahrzeuges noch abrufbaren maximalen Bremskraft der noch verfügbaren Bremssysteme. Die Federspeicherbremsen wirken dabei als letzte sichere Rückfallebene im Störfall.“

Auszug aus: Jacob, Ulrich: „NGT D12 DD: Die zweite Stadtbahngeneration für Dresden“ in: v+t - Verkehr und Technik, Bd. 56 (2003), H. 3 (März), S. 84-88

Hinweis: Die beiden Typen NGT D8 DD und NGT D12 DD sind eng miteinander verwandt. Sie unterscheiden sich vor allem in der Fahrzeuglänge (29.265 mm vs. 45.090 mm) sowie in der

Radsatzkonfiguration (NGT D8 DD: Bo'Bo'2'Bo' vs. NGT D12 DD: Bo'Bo'2'2'Bo'Bo'). Die kürzere Fahrzeugvariante verfügt somit nur über vier Drehgestelle und damit über 8 statt 12 Magnet-schienenbremsen, die jeweils eine Anzugskraft von 64 kN aufweisen.

Beispiel 5: Stadtbahntriebwagen DT8 der Stuttgarter Straßenbahnen AG



Abbildung 1.5: Stadtbahnwagen S-DT 8.10/8.11 der Stuttgarter Straßenbahnen AG
(Quelle: Wikipedia -gemeinfrei-)

„Der S-DT 8.10 ist mit drei unabhängigen Bremssystemen ausgerüstet:

- einer elektrodynamischen Bremse,
- einer druckluftgesteuerten Federspeicherbremse,
- den Magnetschienenbremsen.

Die selbsterregte elektrodynamische Bremse ist die Betriebsbremse. Die elektrodynamische Bremse wird von den Antriebssteuergeräten sollwertgeberabhängig und zuladungsabhängig angesteuert und gleitschutzoptimiert geregelt. Basis sind die acht Antriebe, die in diesem Einsatzfall generatorisch betrieben werden. Beim Bremsen wird im Regelfall ins Netz zurückgespeist. Dies sind bis zu 2000 A. Nur wenn das Netz nicht aufnahmefähig sein sollte, wird auf den Bremswiderstand geschaltet.

Neben der elektrodynamischen Bremse übernimmt die druckluftgesteuerte Federspeicherbremse die Aufgaben der Sicherheits-, der Haltestellen- und Ersatzbremse. Die Druckluftanlage ist mit der Antriebssteuerung steuerungstechnisch verknüpft.

Beim Ausfall von bis zu zwei Antrieben bremsst die Druckluftbremse nur bei der Gefahrenbremse lastkorrigiert mit. Sind drei und mehr Antriebe ausgefallen, wird der Zug sowohl bei Betriebsbremsungen und Gefahrenbremsungen 100 Prozent mechanisch über die acht Federspeicher gebremst. Die Geschwindigkeit wird auf 30 km/h begrenzt.

Als Haltebremse wird die Druckluftbremse von den Antriebssteuergeräten bei etwa 7 km/h aktiviert und die elektrodynamische Bremse abgeschaltet. Sie durchläuft danach ein bestimmtes Programm, um den Halteruck zu minimieren.

Die Druckluftbremse verfügt über zwei Lösesysteme. Über eine Hilfslöseleitung kann ein defekter Zug über ein Schleppfahrzeug gelöst und wieder eingebremst werden. Beim zweiten Lösesystem wird über eine im Führerstandsboden untergebrachte hydraulische Handpumpe das sogenannte Notlösen durchgeführt. Dieses System wirkt direkt auf die Federspeicher des zugeordneten Wagens. Bei einem vollständig gestörten S-DT 8.10 müssen die Notlösepumpen in beiden Fahrerständen betätigt werden. Die Federspeicher können auch einzeln am Drehgestell mechanisch geöffnet werden. Nicht gelöste Federspeicher können am Fahrerdisplay angezeigt werden.

Als Zusatzbremse besitzt der S-DT 8.10 acht Magnetschienenbremsen mit einer Haftkraft von jeweils 66 kN. Die Magnetschienenbremsen werden bei der Gefahrenbremse wie bei der Zwangsbremse/Notbremse zugeschaltet. Bei der Zwangsbremse wird bei einer Geschwindigkeit 1 km/h die Magnetschienenbremse wieder abgeschaltet.“

Auszug aus: Moser, Thomas: „SBB-Stadtbahnwagen Typ S-DT 8.10“ in: Der Nahverkehr, Bd. 17 (1999), H. 7-8 (Juni-Juli), S. 32-38

„Das Fahrzeug verfügt über acht elektrische Antriebe, die sowohl das Fahrzeug beschleunigen, als auch beim Bremsen als Generator benutzt werden und die entstehende Energie in die Oberleitung zurückspeisen. Diese Energie kann von anderen Fahrzeugen entsprechend aufgenommen werden. Sollte die Oberleitung beim Bremsen nicht „aufnahmefähig“ sein, so wird die Energie über den Bremswiderstand auf dem Dach geführt. [...]

Gemäß den Anforderungen für die Zulassung (BOStrab) ist der Einsatz von drei verschiedenen Bremssystemen vorgeschrieben. Hierbei handelt es sich um eine:

- elektrodynamische Bremse (ED-Bremse),
- elektropneumatische Bremse (EP-Bremse),
- Magnetschienenbremse (MG-Bremse)

Die Betriebsbremse wird im Normalbetrieb bis kurz vor Stillstand rein über die elektrodynamische Bremse realisiert. Die pneumatische Bremsanlage wird im regulären Betrieb nur als Haltebremse benutzt bzw. dient als Rückfallebene bei Ausfall der elektrischen Bremse.“

Auszug aus: Jost, Matthias: „Das neue Stadtbahnfahrzeug DT8.12 für Stuttgart“ in: M. Bargende, J. Wiedemann, H.-C. Reuss (Hrsg.), 14. Internationales Stuttgarter Symposium, DOI 10.1007/978-3-658-05130-3_57, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Beispiel 6: Niederflurstraßenbahntriebwagen GT 6-94 (Berlin)



Abbildung 1.6: Niederflurstraßenbahntriebwagen GT 6-94 der Berliner Verkehrsgesellschaft (BVG)

„Der Fahrmotor ist am Wagenkasten aufgehängt und treibt die Fahrwerke über eine Gelenkwelle mit Kegelradgetriebe an. An der Fahrmotorwelle sitzt auch die stufenlos geregelte, hydraulisch wirkende Federspeicherscheibenbremse. [...]

Das Fahrzeug ist mit elektrodynamischer Bremse (ED), elektrohydraulischer Bremse (EH) und Magnetschienenbremse (MG) ausgestattet.

Die Scheibe der Bremse ist auf der Motorwelle befestigt, der Bremssattel am Motorgehäuse. Sie arbeitet als Aktivbremse stufenlos, lastkorrigiert, gleitschutzgeregelt und als einstufige Federspeicherfesthaltebremse. Sie ist mikroprozessorgesteuert und in das Fahrzeugbussystem integriert, um eine Fehlerdiagnose über die Leittechnik zu ermöglichen. Sie kann für jeden Wagenteil einzeln ferngesteuert und bei Ausfall des gesamten Systems mittels Handpumpe im Fahrerstand notgelöst werden.

Bei Betriebsbremsungen setzt die EH-Bremse etwa bei 5 km/h Geschwindigkeit als Haltebremse ein.

Steht das Fahrzeug, wird automatisch die Festhaltestufe eingelegt, die das Fahrzeug auch in der größten Steigung hält.

Bei Ausfall einer oder mehrerer ED-Bremsen wirkt die EH-Bremse als Ersatzbremse bei eingeschränkten Betriebsbedingungen.

Bei der Fahrgast- oder Fahrernotbremsung wirken die EH-Bremse über Notbremsventile in den Hydrogeräten und redundant über Analogventile mit einem fest voreingestellten Wert, in diesem Fall also ohne Lastkorrektur und ohne Gleitschutz sowie zusätzlich die MG-Bremse. Bei der Zugtrennung wirkt sie ebenfalls über einen fest voreingestellten Wert der Notbremsventile.

Bei einer Gefahrenbremsung wirken ED-, EH- und MG-Bremse zusammen. Die EH-Bremse

ergänzt im oberen Geschwindigkeitsbereich die fehlende Bremskraft der anderen Bremsen, übernimmt also nur einen geringen Anteil der Bremskraft, da sie sonst thermisch überlastet würde.[...]

Direkt gespeiste Pulswechselrichter erlauben das Einstellen der Motorspannung und der Speisefrequenz in einem Gerät. Die Stromrichtung läßt sich zwischen Fahren und Bremsen durch Vorgabe eines negativen Schlupfes ohne Betätigung von Kontakten im Leistungskreis umkehren, [...]

Jedem Traktionsstromrichter ist ein Antriebssteuergerät (ASG) zugeordnet. [...]

Das ASG erkennt Gleit- und Schleudervorgänge und paßt die elektrische Brems- oder Zugkraft automatisch den Kraftschlußverhältnissen an. Sanden erfolgt automatisch.“

Auszug aus: Risch, Karsten: „Niederflur-Straßenbahnwagen Berlin Typ GT 6-94“ in: eb - Elektrische Bahnen, Bd. 94 (1996), H. 6 (Juni), S. 149-158



Resümee

1. Als Betriebsbremse wird bei Fahrzeugen des SPNV vorzugsweise die elektrodynamische Bremse (Antriebsmotoren im generatorischen Betrieb) genutzt. Sie ist verschleißfrei und ermöglicht eine Rückspeisung von elektrischer Energie, sofern das Netz aufnahmefähig ist oder entsprechende Energiespeicher auf dem Fahrzeug installiert sind. Als Rückfallebene verfügen die Fahrzeuge über Bremswiderstände, sodass auch im Falle eines nicht aufnahmefähigen Netzes elektrodynamisch und damit verschleißfrei gebremst werden kann.
2. Die mechanisch-rotatorischen Bremsen dienen bei Fahrzeugen des SPNV vor allem als Feststell- und Ergänzungsbremse sowie als Rückfallebene bei (Teil-) Ausfall der elektrodynamischen Bremsen. Sie lösen letztgenannte unterhalb einer fahrzeugspezifischen Ablösegeschwindigkeit (1-10 km/h) ab und bringen die erforderlichen Kräfte zur Stillstandssicherung der Fahrzeuge auf.
3. Die konkrete Ausführung der mechanisch-rotatorischen Bremsen ist bei Fahrzeugen des SPNV im Gegensatz zu Vollbahn-Fahrzeugen nicht einheitlich geregelt. Es lassen sich Beispiele für elektromechanische, elektrohydraulische oder elektropneumatische Lösungen finden. Elektrohydraulische Bremssysteme sind insbesondere bei Straßenbahnen heute sehr weit verbreitet, während elektropneumatische Bremssysteme vorwiegend in U-Bahn-Fahrzeugen und einigen Stadtbahnen vorzufinden sind.
4. Federspeicherelemente sind üblicherweise Bestandteil der mechanischen Bremsausrüstung, da diese durch die BOStrab explizit gefordert werden.
5. Magnetschienenbremsen gehören zur Standardausrüstung von Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen, da sich nur durch ihre Mitwirkung die erforderlichen kurzen Bremswege erzielen lassen. Überdies werden sie von der BOStrab (§36, Abs. 6, Nr. 1) für „straßenabhängige Bahnen“ auch gefordert.
6. Eine Gleitschutzausrüstung gehört heute ebenfalls zur Standardausrüstung von Fahrzeugen des SPNV. Bei unabhängigen Bahnen gemäß §4, Abs. 2 PBefG ist das Vorhandensein einer zeitgemäßen Kraftschlussregelung die Voraussetzung, um ggf. auf Magnetschienenbremsen verzichten zu können (z.B. bei U- Bahn-Fahrzeugen).
7. Die Brems- und Traktionskräfte von Fahrzeugen des SPNV werden in der Regel dem Beladungszustand angepasst, um ein möglichst konstantes sowie fahrgastfreundliches Anfahr- und Bremsverhalten der Fahrzeuge zu erreichen. Das Lastsignal wird dabei häufig über die oft als Luftfederung ausgeführte Sekundärfederung gewonnen.

2 Grundlagen

2.1 Spezielle Randbedingungen

Der Betrieb von Fahrzeugen im Schienenpersonennahverkehr ist fahrdynamisch durch kurze Haltestellenabstände gekennzeichnet. Damit verbunden kommt es zu häufigen Anfahr- und Bremsvorgängen bei einem vergleichsweise geringen Anteil von Beharrungsfahrten. Um eine hohe Reisegeschwindigkeit und damit kurze Fahrzeiten zu erzielen, müssen deshalb die Anteile der Anfahr- und Bremsvorgänge an der Gesamtfahrt auf ein Minimum reduziert werden (siehe Abb. 2.1). Dabei kann die Fahrzeuglängsbeschleunigung jedoch nicht beliebig gesteigert werden, da der Kraftschluss zwischen Rad- und Schiene, der zulässige Längsruck und die installierbare Leistung als begrenzende Faktoren wirken.

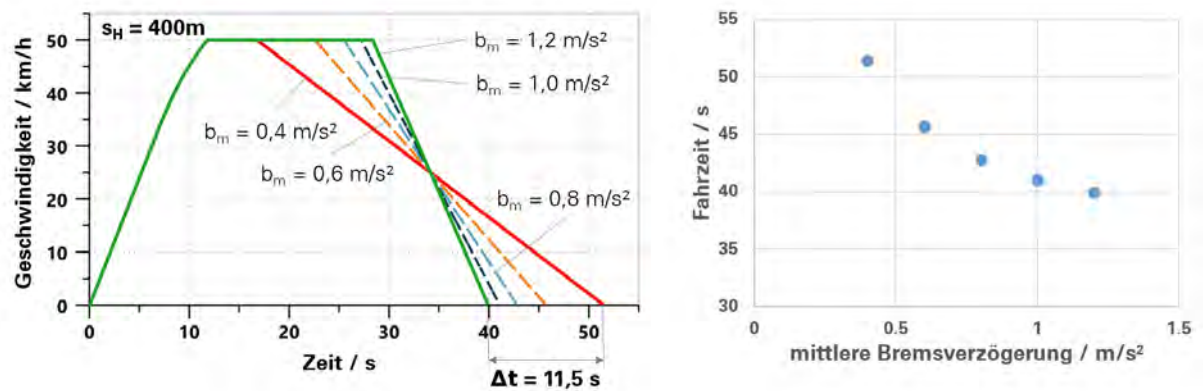
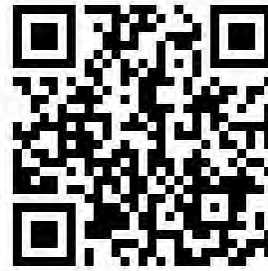
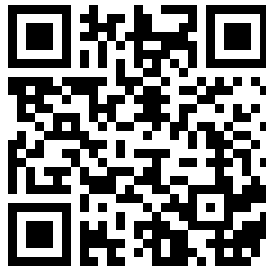
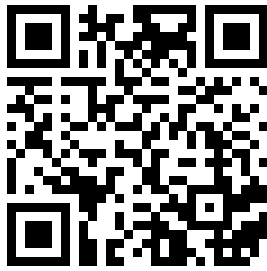


Abbildung 2.1: Einfluss der mittleren Bremsverzögerung auf die Fahrzeit bei gleicher Antriebsleistung und einem Haltestellenabstand von 400 Metern

Bei Straßen- und Stadtbahnen kommt hinzu, dass die Fahrt auf eigenen Trassen insbesondere in Innenstädten oder innenstadtnahen Bereichen häufig nicht realisiert werden kann und die Fahrzeuge sich deshalb den Verkehrsraum mit Fußgängerinnen und Fußgängern, Radfahrenden sowie dem motorisierten Individualverkehr (MIV) teilen müssen (siehe Abbildung 2.2). Ein Fahren im Raumabstand, wie es bei Vollbahnen üblich ist, kann in diesen Fällen nicht realisiert werden, sodass auf Sicht gefahren werden muss. Um das Risiko für Leib und Leben der übrigen Verkehrsteilnehmer zu minimieren und die Beschädigung der Schienenfahrzeuge durch Kollisionen zu verhindern, sind deshalb kurze Bremswege und somit leistungsfähige Bremsen unabdingbar.

 Videoclips zum Bremsweg von Straßenbahnen



Wie in den nachfolgenden Abschnitten noch genauer erörtert wird, muss ein Straßen- oder Stadtbahnfahrzeug bei einer Gefahrenbremsung aus 50 km/h nach maximal 39 m zum Stillstand kommen. Das entspricht einer mittleren Verzögerung von $2,47 \text{ m/s}^2$. Um diese bei einem Fahrzeug mit einer Masse von 50 t zu erreichen, muss eine Bremskraft von effektiv 123,5 kN erzeugt werden¹.



(a) Straßenbahn Bern



(b) Straßenbahn Bremen

Abbildung 2.2: Beispiele für den Verkehr von Straßenbahnen im geteilten Verkehrsraum - Konsequenz: Fahren auf Sicht und Anstreben kurzer Bremswege

Überschlägt man die momentane Bremsleistung, die sich für eine Gesamtbremskraft von 123,5 kN bei 50 bzw. 30 km/h ergibt, so erhält man im ersten Fall 1715 kW und im zweiten Fall 1030 kW. Die maximal von den Bremsanlagen in Summe erzeugte Leistung übersteigt damit die Gesamtleistung der Antriebsanlage in der Regel recht deutlich.

Während Vollbahnfahrzeuge freizügig einsetzbar sein müssen und damit Bremsausrüstungen benötigen, die mit anderen Vollbahnfahrzeugen unterschiedlichster Provenienz kompatibel sein sollen, verkehren Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge sowie U-Bahnen auf räumlich klar begrenzten Netzen² und müssen hinsichtlich ihrer Bremsausrüstung „nur“ mit den auf diesen Netzen verkehrenden Fahrzeugen kompatibel sein und auch nur für dieses Netz ausgelegt werden.

In Verbindung mit den für Straßen-, Stadt- und U-Bahn geltenden Regelwerken, die hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung der Bremsanlagen einen vergleichsweise großen Spielraum lassen (siehe Kapitel 2.2), haben sich bei der Bremsausrüstung dieser Fahrzeuge andere technische Lösungen durchgesetzt als bei Vollbahnfahrzeugen. [5]

¹Massenfaktor und Fahrzeugwiderstand vernachlässigt

²Eine Ausnahme bilden Stadtbahnfahrzeuge, die auf reguläre Eisenbahnstrecken übergehen und nach BOSTrab und EBO zugelassen sind.

2.2 Regelwerke für die Bremsausausrüstung von Fahrzeugen nach BOStrab

2.2.1 Rechtlicher Rahmen

Der gesetzliche Rahmen für die Ausgestaltung des (Schienen-)Personennahverkehrs bildet in Deutschland das Personenbeförderungsgesetz (PBefG). Auf dessen Grundlage wurde die *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen* (BOStrab) erlassen, die insbesondere in § 36 wesentliche Anforderungen an die Bremsen in allgemeiner Weise formuliert.

Die BOStrab bezieht sich u.a. in § 2, Abs. 1, Nr. 2 auf die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“. Diese sind vor allem in Normen sowie den *Technischen Regeln für die Bemessung und Prüfung der Bremsen von Fahrzeugen nach der BOStrab* (kurz: „Technische Regeln Bremsen (TR Br)“) und Verbandsschriften³ zusammengefasst und bei der Projektierung von Fahrzeugen als verbindlich anzusehen. Diese Verbindlichkeit wird eingeschränkt durch § 2, Abs. 2 der BOStrab, in dem es heißt: „Von den allgemein anerkannten Regeln der Technik kann abgewichen werden, wenn mindestens die gleiche Sicherheit gegenüber der Technischen Aufsichtsbehörde nachgewiesen wird“. Damit werden Innovationen unter dem Vorbehalt eines Sicherheitsnachweises zugelassen.

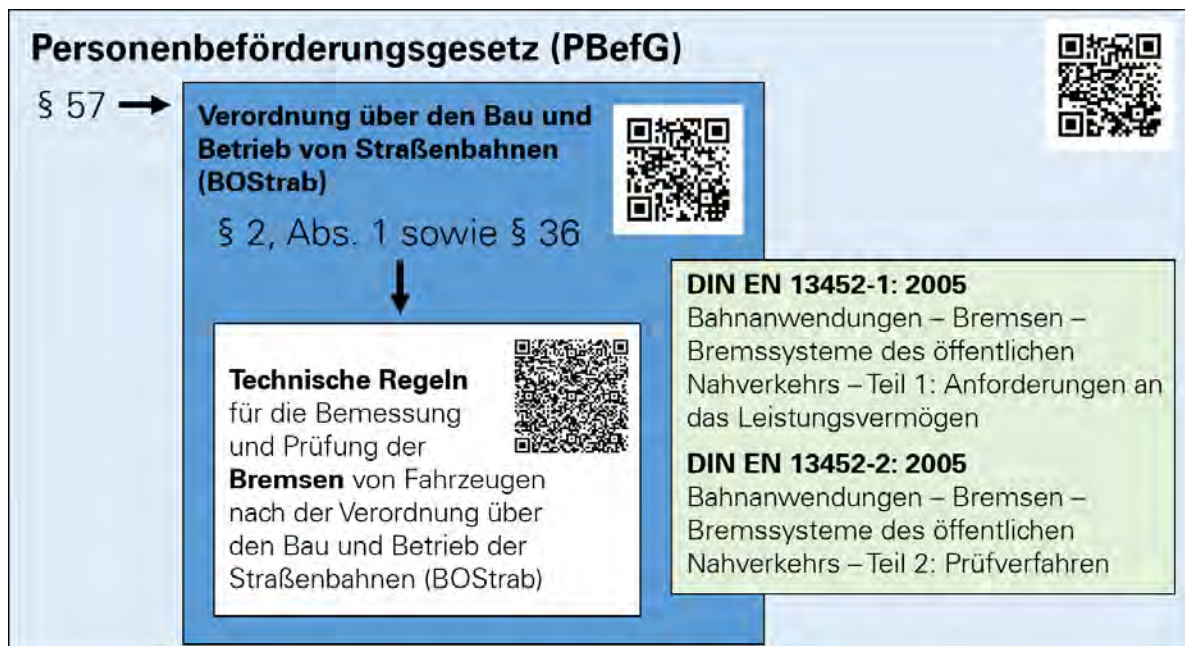


Abbildung 2.3: Rechtlicher Rahmen zur Auslegung und Konstruktion von Bremsen für Fahrzeuge des SPNV

Während die BOStrab nebst den dazugehörigen Richtlinien vor allem in Deutschland gilt und sich aus der nationalen Gesetzgebung entwickelt hat, existiert mit der DIN EN 13452 auch ein europäisches Normenwerk zu den Bremsen der Fahrzeuge des SPNV. Die „Technischen Regeln Bremsen“ berücksichtigen die genannte europäische Norm, sodass beide Werke eigentlich widerspruchsfrei nebeneinander existieren müssten. Allerdings ist eine vollständige Harmonisierung beider Werke bisher nicht erfolgt, sodass es beispielsweise unterschiedliche Begrifflichkeiten für identische Sachverhalte und auch weitere Abweichungen in beiden Regelwerken gibt.

³gemeint sind z.B. die Richtlinien des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)

Abbildung 2.3 enthält eine Übersicht über die erwähnten Regelwerke und deutet ihre Beziehungen untereinander an.

Die wichtigste Grundlage zur Auslegung und Projektierung der Bremsen von Fahrzeugen im SPNV ist die BOStrab. Den dort aufgeführten Regelungen ist das folgende Unterkapitel gewidmet.

2.2.2 Regelungen nach § 36 BOStrab

Die BOStrab enthält insgesamt acht Abschnitte und vier Anlagen. Der fünfte Abschnitt enthält die Paragraphen 33 bis 48 und ist ausschließlich den Fahrzeugen gewidmet. Der für die Bremsausrüstung relevante Paragraph 36 enthält elf Absätze, die im folgenden kurz zitiert (Boxen) und anschließend diskutiert werden.



§ 36, Abs. 1:

„Fahrzeuge müssen mindestens zwei Bremsen haben. Diese müssen so voneinander unabhängig sein, daß bei Störungen innerhalb der einen Bremse die Wirksamkeit der anderen Bremse erhalten bleibt; ihre Wirksamkeit muß auch bei Ausfall der Fahrleitungsspannung gesichert sein.“

Anmerkung 1:

Es wird also eine redundante Bremsausrüstung gefordert, die eine Bremsung im Ausnahmefall auch unabhängig von der elektrischen Energieversorgung realisieren können muss. Die Rückfallebene wäre also beispielsweise eine rein mechanische Bremse, die nach dem Feder-speicherprinzip arbeitet.

Für reguläre Bremsungen könnte die elektrodynamische Bremse (Einsatz der Fahrmotoren als Generatoren) genutzt werden, sodass die Forderung nach mindestens zwei voneinander unabhängigen Bremsen erfüllt ist.

Entscheidend ist, dass hier auch andere Lösungen als die oben umrissene denkbar wären. Die Verordnung schreibt keine konkreten Bremsarten vor, sondern definiert „nur“ die Funktionalitäten und Abhängigkeiten.



§ 36, Abs. 2:

„Die Bremsen müssen so gebaut und einschließlich ihrer Steuereinrichtungen so aufeinander abgestimmt sein, daß

1. Fahrzeuge und Züge ohne Gefährdung der Fahrgäste mit möglichst geringem Ruck bis zum Stillstand verzögert werden können (Betriebsbremsung),
2. der Kraftschluß zwischen Rad und Schiene im betriebsnotwendigen Umfang ausgenutzt werden kann,
3. sie im Zusammenwirken Bremskräfte und Dauerleistungen aufweisen, die den Neigungsverhältnissen im Streckennetz und den betrieblichen Verhältnissen angepaßt sind.“

Anmerkung 2:

In Absatz 2, Nr. 1 wird ein „möglichst geringer“ Ruck gefordert, ohne dass ein expliziter Grenzwert angegeben oder auf ihn verwiesen wird. Auch in den „Technischen Regeln Bremsen“ werden keine Anhalts- oder Grenzwerte für den Längsruck bei Bremsungen angegeben.

Allerdings enthält die DIN EN 13452-1:2003 in den Abschnitten 6 bis 9 dynamische Grenzwerte, worunter auch die Maximalwerte für den mittleren Ruck in Abhängigkeit der Fahrzeug- und der Bremsungsart zählen. Die folgende Tabelle enthält eine auszugsweise Zusammenstellung der dort angegebenen Werte:

Tabelle 2.1: Grenzwerte für den mittleren Ruck nach DIN EN 13452-1:2005

	maximaler mittlerer Ruck in m/s^3 bei:	
	Betriebsbremsung	Schnellbremsung
Straßen- und Stadtbahnen	1,5	8,0
U-Bahnen mit Stahlrädern	1,5	4,0
U-Bahnen mit Gummirädern	2,0	6,0
S-Bahnen	1,0	4,0

Anmerkung 3:

Absatz 2, Nr. 2 fordert eine bestmögliche Ausnutzung des Kraftschlusses zwischen Rad und Schiene durch das Bremssystem. Angaben zur Höhe des ausnutzbaren Kraftschlusses werden an der genannten Stelle nicht gemacht. Zudem werden keine genauen Festlegungen getroffen, wie die hohe Kraftschlussausnutzung erreicht werden soll. Die Installation einer Gleitschutzeinrichtung ist somit nicht verbindlich vorgegeben. Da die größte Bremskraft bei Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen auch bei Gefahrenbremsungen in der Regel durch die elektrodynamische Bremse aufgebracht wird, wäre ein „klassischer“ Gleitschutz, wie man ihn für mechanische Radbremsen im Vollbahnbereich kennt, auch nur bedingt relevant.

Zur Frage des ausnutzbaren Kraftschlusses enthalten die Technischen Richtlinien Bremsen unter Punkt 2.2.4 folgende Regelung:

„Beim rechnerischen Nachweis der Gefahrenbremsung ist von einem Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene von höchstens 0,33 auszugehen.“ Das bedeutet, dass in der Praxis für alle Gefahrenbremsfälle nachgewiesen werden muss, dass der ausgenutzte Kraftschlussbeiwert kleiner oder gleich 0,33 ist. Dabei sind alle Lastzustände und Bremssystem-Ausfall-Szenarien zu berücksichtigen.



§ 36, Abs. 3:

„Bei Ausfall einer Bremse müssen mit den übrigen Bremsen mindestens die mittleren Bremsverzögerungen nach Anlage 2 Tabelle 1 erreicht werden.“

Tabelle 1 in Anlage 2 enthält die folgenden Werte:

v_0 in km/h	b_m in m/s^2	s_B in m
20	0,77	20
30	0,87	40
40	0,95	65
50	1,03	94
60	1,06	131
70	1,07	177
80	1,07	230
90	1,08	290
100	1,09	355

mit:

v_0 - Bremsausgangsgeschwindigkeit,

b_m - über den Weg gemittelte Bremsverzögerung,

s_B - Bremsweg



§ 36, Abs. 4:

„Bei Ausfall jeglicher elektrischer Energieversorgung der Bremsen muss das Fahrzeug bei Nutzlast in allen im Streckennetz vorhandenen Neigungen aus der örtlich festgelegten Streckenhöchstgeschwindigkeit wenigstens einmal angehalten und gegen Abrollen gemäß § 36 Absatz 5 gesichert werden können.“

Anmerkung 4:

Festzuhalten ist, dass „lediglich“ konstatiert wird, dass ein Fahrzeug mit Nutzlast an jedem Punkt der befahrenen Strecke aus der örtlichen Höchstgeschwindigkeit zum Stillstand gebremst und anschließend festgehalten werden muss, auch wenn keine Spannungsversorgung für das Bremssystem zur Verfügung steht. Das Bremsvermögen, also die Frage *wie stark* bzw. *auf welcher Distanz* das Fahrzeug bis zum Stillstand gebremst werden muss, wird nicht definiert.

Anmerkung 5:

Eine weitere Frage, die bezüglich dieses Absatzes geklärt werden muss, ist die, wie eigentlich die „Nutzlast“ eines Fahrzeuges definiert ist. Auch in diesem Punkt helfen die „Technischen Regeln Bremsen“ weiter, in denen unter Punkt 2.3.2 bestimmt wird, dass als Nutzlast pro festem Sitzplatz 750 N ($\hat{=}$ 76,5 kg) und pro Quadratmeter Stehplatzfläche 5000 N ($\hat{=}$ 509,68 kg) anzusetzen seien. Dies entspricht ungefähr der Laststufe „EL 6.67“ der EN 13452-1 (siehe Abschnitt 5.2 der EN 13452-1:2005).

**§ 36, Abs. 5:**

„Eine der Bremsen muß ein Abrollen des mit Nutzlast stillstehenden Fahrzeugs auf der größten im Streckennetz vorhandenen Neigung verhindern können. Diese Bremse muß nach dem Federspeicherprinzip wirken; ihre Bremskraft muß ausschließlich durch mechanische Mittel erzeugt und übertragen werden.“

Anmerkung 6:

Vollbesetzte⁴ Fahrzeuge müssen also an jedem beliebigen Punkt der Strecke von einer automatisch anlegenden mechanischen Bremse am Abrollen gehindert werden, deren Bremskraft zeitlich invariant ist (kein Bremskraftverlust durch Druckverlust bzw. Leckagen) und die nur gelöst werden kann, wenn Energie dafür aufgewendet wird („Federspeicherprinzip“).

**§ 36, Abs. 6:**

„Bei Fahrzeugen *straßenabhängiger* Bahnen, ausgenommen bei Betriebsfahrzeugen nach Absatz 7, müssen

1. eine Bremse vom Kraftschluß zwischen Rad und Schiene unabhängig sein,
2. die anderen Bremsen durch Sandstreueinrichtungen ergänzt sein,
3. mit den Bremsen mindestens die mittleren Bremsverzögerungen nach Anlage 2 Tabelle 2 erreicht werden (Gefahrbremsung).“

Tabelle 2 in Anlage 2 enthält die folgenden Werte:

v_0 in km/h	b_m in m/s ²	s_B in m
20	1,71	9
30	2,04	17
40	2,29	27
50	2,47	39
60	2,57	54
70	2,73	69

Anmerkung 7:

Dieser Absatz gilt für Straßen- und Stadtbahnen, sofern sie sich den Verkehrsraum mit anderen Verkehrsmitteln teilen (was die Regel ist). Er gilt *nicht* für U-Bahnen, da diese gemäß BOStrab unabhängige (d.h. nicht *straßenabhängige*) Bahnen sind.

Anmerkung 8:

Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge sind demnach zwingend mit Schienenbremsen und Sandstreueinrichtungen auszurüsten.

⁴Die Definition, wann ein Fahrzeug als „vollbesetzt“ anzusehen ist, kann variieren. Das Spektrum reicht in Europa von 3 bis 5 Personen je Quadratmeter Stehplatzfläche. Fahrzeuge die, die Laststufe EL 6.67 nach EN 13452-1:2005 aufweisen, gelten deshalb unter Umständen auch als „übevoll“.



§ 36, Abs. 7:

„Betriebsfahrzeuge, die mit nur *einer* Bremse ausgerüstet sind, dürfen

1. bei *unabhängigen* Bahnen höchstens 40 km/h und
2. bei *straßenabhängigen* Bahnen höchstens 30 km/h

fahren. Dabei müssen mindestens die mittleren Bremsverzögerungen nach Anlage 2 Tabelle 1 erreicht werden.“

Anmerkung 9:

Dieser Absatz bezieht sich zum Beispiel auf Zweiwege-Fahrzeuge bei Schienenfahrt.



§ 36, Abs. 8:

„Die Bremsen der Fahrzeuge, die im Zugverband betrieben werden, müssen so gesteuert sein, dass der Zug die für Fahrzeuge vorgeschriebenen Bremseigenschaften nach den Absätzen 2 bis 7 erreicht.“

Anmerkung 10:

Durch die Zugbildung darf sich das Bremsverhalten also im Vergleich zu einem Einzelfahrzeug nicht verschlechtern.



§ 36, Abs. 9:

„Bei unbeabsichtigter Zugtrennung müssen sich mindestens die nicht mit Fahrbediensteten besetzten Zugteile selbsttätig abbremsten; die Zugtrennung muß dem Fahrzeugführer oder einer besetzten Betriebsstelle erkennbar sein.“

Anmerkung 11:

Es ist anzustreben, dass im Falle einer unbeabsichtigten Zugtrennung das folgende Fahrzeug stärker abbremst als das führende ($\Delta b_m \approx 0,1 \text{ m/s}^2$). So soll die Gefahr einer Kollision vermieden werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Leittechnik der Fahrzeuge erkennt, ob das Fahrzeug führt oder folgt („Master/Slave“).



§ 36, Abs. 10:

„In Personenfahrzeugen müssen Einrichtungen vorhanden sein, mit denen Fahrgäste im Notfall eine Bremsung einleiten können (Fahrgast-Notbremsung). Die Betätigung dieser Einrichtungen darf auf Strecken ohne Sicherheitsraum und in Tunneln außerhalb von Haltestellen nicht zum Halten führen (Notbremsüberbrückung).

Die Betätigung der Fahrgastnotbremsung ist dem Fahrzeugführer anzuzeigen.

Auf bestimmten weiteren Streckenabschnitten darf diese Notbremsüberbrückung wirksam bleiben, wenn der Betriebsleiter hierfür eine Dienstanweisung nach § 8 Absatz 2 eingeführt hat.“



§ 36, Abs. 11:

„Bei einem Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer muss im Fall einer Entgleisung das Fahrzeug unmittelbar selbsttätig bis zum Stillstand abbremsen können.“

Anmerkung 12:

Konstruktiv kann dies zum Beispiel mittels Winkelsensoren in den Gelenken zwischen den Wagenteilen oder über eine Überwachung der Drehgestellauslenkung in der x-y-Ebene realisiert werden.

2.2.3 Regelungen der „Technischen Regeln Bremsen“ (TR Br)

Die „Technische(n) Regeln Bremsen“ (TR Br) sind in sechs Hauptabschnitte gegliedert, deren wichtigste die Abschnitte zwei bis fünf sind, die im folgenden aufgelistet werden:

- Abschnitt 2: Begriffsbestimmungen
- Abschnitt 3: Anforderungen
- Abschnitt 4: Messungen und Funktionsprüfungen
- Abschnitt 5: Grenzwerte für Bremsungen

Begriffsbestimmungen in den TR Br

Wie es die Überschrift bereits erkennen lässt, werden in Abschnitt 2 der TR Br wichtige Begriffe definiert und erläutert. Dabei wird den folgenden Fragen nachgegangen:

- Was ist eine Bremse/ein Bremssystem/eine Bremsausrüstung?
- Was ist eine Bremsung?
- Welche Arten von Bremsungen gibt es?
- Wann spricht man vom „Ausfall einer Bremse“?
- Welche Fahrzeuglasten sind bei Bremsungen zu unterscheiden?
- Welche Verzögerungsarten sind bei Bremsungen zu unterscheiden?
- Welche Zeitanteile/-abschnitte sind bei Bremsungen zu unterscheiden?

Anforderungen nach TR Br

Abschnitt 3 der TR Br dient der Präzisierung und Erläuterung der in der BOStrab bezüglich der Bremse getroffenen Festlegungen. Dies betrifft insbesondere die folgenden Aspekte:

- Unabhängigkeit von Bremsen (Abs. 3.1)
- Ausfall einer Bremse (Abs. 3.2)
- Ausfall jeglicher elektrischer Energieversorgung der Bremsen (Abs. 3.3)
- Betriebsbremsungen (Abs. 3.4)
- Schienenbremsen (Abs. 3.5)

- Sandstreueinrichtungen (Abs. 3.6)
- Fahrgast-Notbremseinrichtungen (Abs. 3.7)
- Bremsung in geeigneten Streckenabschnitten (Abs. 3.8)
- Bremsung von Betriebsfahrzeugen (Abs. 3.9)

Messungen und Funktionsprüfungen nach TR Br

Um die Funktionsfähigkeit und Wirksamkeit der Bremsen zu kontrollieren, müssen Messungen und Prüfungen durchgeführt werden. Erstere dienen der quantitativen und letztere der qualitativen Überprüfung. Um ein größtmögliches Maß an Sicherheit und Verbindlichkeit zu erreichen, werden die Randbedingungen der durchzuführenden Prüfungen sowie ihr Umfang in Abschnitt 4 der TR Br festgelegt.

Grenzwerte für Bremsungen

Abschnitt 5 der TR Br enthält wichtige Anmerkungen zu den gültigen Grenzwerten für Bremswege bzw. mittlere Verzögerungen und ist mit den Anhängen 2A bis 2C assoziiert. Diese enthalten einerseits die aus der BOStrab bekannten Tabellen für maximale Bremswege und Mindestverzögerungen im Falle von Gefahrenbremsungen sowie bei Ausfall einer Bremse.

Andererseits ist aber in Anhang 2B auch eine ergänzende Tabelle enthalten, in der die anzustrebenden Bremswege und Verzögerungen für solche Bremsungen festgehalten sind, bei denen ausschließlich die Schienenbremsen wirken.

Ferner enthält der 5. Abschnitt der TR Br einige die BOStrab ergänzende Regelungen bezüglich des Lastzustandes der Fahrzeuge, die im Zuge des Nachweises der Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte bei der Fahrzeugtypprüfung zur Erlangung der Inbetriebnahmegenehmigung gemäß § 62 BOStrab relevant sind. So wird beispielsweise festgelegt, dass die Mindestbremswege bei Gefahrbremsungen nicht nur von leeren Fahrzeugen, sondern auch von solchen eingehalten werden müssen, die mit Zweidrittellast⁵ beladen sind.

2.2.4 Festlegungen der DIN EN 13452-1

Die DIN EN 13452-1:2005 trägt den Titel „Bahnanwendungen - Bremsen - Bremssysteme des öffentlichen Nahverkehrs - Teil 1: Anforderungen an das Leistungsvermögen“ und ist in neun Kapitel gegliedert, deren umfangreichste die Abschnitte 3 „Begriffe“ und 5 „Konstruktionsgrundlagen“ sind.

Die Norm bezieht sich explizit auf „Fahrzeuge für Nahverkehrssysteme“, also Straßen- und Stadtbahnen, U-Bahnen (mit Stahl- oder gummbereiften Rädern), sowie S- und Regionalbahnen. Sie gilt damit sowohl für Fahrzeuge nach BOStrab als auch für solche, die der EBO unterliegen.

Während die Kapitel 1 bis 5 Definitionen und Festlegungen enthalten, die weitgehend von der Fahrzeugart unabhängig sind, werden in den Abschnitten 6 bis 9 spezifische Anforderungen, Merkmale und Grenzwerte für Straßen- und Stadtbahnen (Kap. 6), U-Bahnen mit Stahlrädern (Kap. 7), U-Bahnen mit Gummireifen (Kap. 8) sowie S- und Regionalbahn-Fahrzeuge (Kap. 9) definiert.

Von besonderem Interesse sind die in Kapitel 3.2 der DIN EN 13452-1 charakterisierten Bremsungsarten, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen werden soll.

⁵Der Begriff „Zweidrittellast“ entspricht der in Abschnitt 2.3.4 der TR Br definierten Laststufe II und umfasst die Masse des leeren Fahrzeuges zuzüglich 2/3 der Nutzlast.

Bremsungsarten nach DIN EN 13452-1 und TR Br

Bedauerlicherweise verwenden DIN EN 13452-1 und TR Br teilweise unterschiedliche Termini für gleiche Sachverhalte - ein Umstand der geeignet ist, Verwirrung zu stiften. Im Folgenden sollen deshalb in Ergänzung zu der in den TR Br enthaltenen Tabelle 1, die eine kompakte Gegenüberstellung der jeweiligen Termini beinhaltet, die relevanten Bremsungsarten erläutert werden.

Bei der Unterscheidung der Bremsungsarten spielen vor allem folgende Unterscheidungskriterien eine Rolle:

- Auslösung: Wer oder was löst die Bremsung aus?
- Ziel: Was soll durch die Bremsung erreicht werden?
- Verzögerungsniveau: Wie hoch ist das angestrebte Verzögerungsniveau?



Betriebsbremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Betriebsbremsung
- Auslösung: Fahrzeugführer oder automatische Fahrsteuerung
- Ziel: Absenkung der Geschwindigkeit
- Verzögerungsniveau: variabel, aber unterhalb der Gefahrenbremsung

Straßen-/Stadtbahnen: $0 \dots 1,2 \text{ m/s}^2$

U-Bahnen mit Stahlrädern: $0 \dots 1,0 \text{ m/s}^2$

U-Bahnen mit Luftreifen: $0 \dots 1,5 \text{ m/s}^2$

S- und Regionalbahnen: $0 \dots 1,0 \text{ m/s}^2$



Maximale Betriebsbremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: keine
- Auslösung: Fahrzeugführer oder automatische Fahrsteuerung
- Ziel: Absenkung der Geschwindigkeit
- Verzögerungsniveau: maximale Verzögerung, die mit den auf die Räder wirkenden Bremsvorrichtungen erreicht werden kann

Straßen-/Stadtbahnen: $1,2 \text{ m/s}^2$

U-Bahnen mit Stahlrädern: $1,0 \text{ m/s}^2$

U-Bahnen mit Luftreifen: $1,5 \text{ m/s}^2$

S- und Regionalbahnen: $1,0 \text{ m/s}^2$

Anmerkung 1: Eine maximale Betriebsbremsung wird in der Literatur mitunter auch als „Vollbremsung“ bezeichnet.



Notbremsung 1 (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: SIFA-Bremsung
- Auslösung: Sicherheitsfahrschaltung (SIFA) oder automatische Fahrsteuerung
- Ziel: Herstellung größtmöglicher Sicherheit für Passagiere, Personal und Dritte
- Verzögerungsniveau:

Fahrzeugkategorie	minimale mittlere Verzögerung	maximale Momentan- verzögerung
Straßen-/Stadtbahnen:	1,2 m/s ²	2,5 m/s ²
U-Bahnen mit Stahlrädern:	1,0 m/s ²	2,0 m/s ²
U-Bahnen mit Luftreifen:	1,5 m/s ²	2,5 m/s ²
S- und Regionalbahnen:	1,0 m/s ²	2,0 m/s ²



Notbremsung 2 (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Fahrgast-Notbremsung
- Auslösung: Fahrgäste
- Ziel: Herstellung größtmöglicher Sicherheit für Passagiere, Personal und Dritte
- Verzögerungsniveau:

Fahrzeugkategorie	minimale mittlere Verzögerung	maximale Momentan- verzögerung
Straßen-/Stadtbahnen:	1,2 m/s ²	2,5 m/s ²
U-Bahnen mit Stahlrädern:	1,0 m/s ²	2,0 m/s ²
U-Bahnen mit Luftreifen:	1,7 m/s ²	3,5 m/s ²
S- und Regionalbahnen:	1,0 m/s ²	2,0 m/s ²

Anmerkung 2: Eine Fahrgast-Notbremsung muss nicht zwangsläufig zum unmittelbaren Aufbau einer Bremsverzögerung führen. Gegebenenfalls kann die Konsequenz der Betätigung der Fahrgast-Notbremse auch die Alarmierung des Fahrers sein, der situationsabhängig entscheidet, ob und an welchem Punkt das Fahrzeug angehalten wird. Ein solches Konzept wird Notbremsüberbrückung genannt.



Notbremsung 3 (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Gefahrbremsung
- Auslösung: Fahrzeugführer über besondere (meist rastierte) Stellung des Fahr-Brems-schalters oder automatische Fahrsteuerung
- Ziel: Herstellung größtmöglicher Sicherheit für Passagiere, Personal und Dritte
- Verzögerungsniveau:

Fahrzeugkategorie	minimale mittlere Verzögerung	maximale Momentan- verzögerung
Straßen-/Stadtbahnen:	2,8 m/s ²	5 m/s ²
U-Bahnen mit Stahlrädern:	1,0 m/s ²	2,5 m/s ²
U-Bahnen mit Luftreifen:	1,7 m/s ²	3,5 m/s ²
S- und Regionalbahnen:	1,0 m/s ²	2,5 m/s ²



Notbremsung 4 (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Notbremsung bei Fahrbetrieb ohne Fahrzeugführer
- Auslösung: autorisiertes Personal über ein von dem eigentlichen Fahr-Bremsschalter unabhängiges Bedienelement
- Ziel: Herstellung größtmöglicher Sicherheit für Passagiere, Personal und Dritte
- Verzögerungsniveau:

Fahrzeugkategorie	minimale mittlere Verzögerung	maximale Momentan- verzögerung
Straßen-/Stadtbahnen:	2,8 m/s ²	4,0 m/s ²
U-Bahnen mit Stahlrädern:	1,0 m/s ²	2,5 m/s ²
U-Bahnen mit Luftreifen:	1,7 m/s ²	3,5 m/s ²
S- und Regionalbahnen:	1,0 m/s ²	2,0 m/s ²



Sicherheitsbremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Sicherheitsbremsung
- Auslösung: Fahrzeugführer über gesondertes Bedienelement (z.B. Not-Aus-Taster)
- Ziel: Bereitstellung einer Rückfallebene für Bremsungen mit sehr hoher Verfügbarkeit
- Verzögerungsniveau:

Fahrzeugkategorie	minimale mittlere Verzögerung	maximale Momentan- verzögerung
Straßen-/Stadtbahnen:	1,0 m/s ²	4,0 m/s ²
U-Bahnen mit Stahlrädern:	0,7 m/s ²	2,5 m/s ²
U-Bahnen mit Luftreifen:	1,2 m/s ²	3,5 m/s ²
S- und Regionalbahnen:	0,7 m/s ²	2,5 m/s ²



Beharrungsbremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Beharrungsbremsung
- Auslösung: Fahrzeugführer oder automatische Fahrsteuerung
- Ziel: Geschwindigkeitsregulierung in Streckenabschnitten, die ein starkes Gefälle aufweisen
- Verzögerungsniveau: nahe 0 m/s²



Nicht aufhebbare Bremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: keine
- Auslösung: nicht definiert (Fahrzeugführer oder Leit- und Sicherungstechnik denkbar)
- Ziel: Erreichung des Fahrzeugstillstandes
- Verzögerungsniveau: maximal wie Notbremsung 3



Stillstandsbremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: keine
- Auslösung: automatisch (Federspeicherprinzip)
- Ziel: Verhinderung der ungewollten Bewegung eines haltenden Zuges unter zu definierenden Bedingungen
- Verzögerungsniveau: 0 m/s²



Haltebremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: keine
- Auslösung: automatisch
- Ziel: Stillstandssicherung eines Zuges mit definierter Besetzung in einer definierten Steigung **für eine bestimmte Zeitdauer** („Kurzzeitbremse“)
- Verzögerungsniveau: 0 m/s^2



Abstellbremsung (DIN EN)

- Entsprechung in TR Br: Feststellbremsung
- Auslösung: automatisch (Federspeicherprinzip)
- Ziel: Stillstandssicherung eines Zuges mit vorgegebener Last in einer definierten Steigung **für eine unbegrenzte Zeitdauer**
- Verzögerungsniveau: 0 m/s^2



Abreißbremsung (TR Br)

- Entsprechung in DIN EN 13452-1:2003: keine
- Auslösung: automatisch
- Ziel: Detektion einer Zugtrennung und Überführung aller Fahrzeugteile in den sichersten Zustand („Stillstand“)
- Verzögerungsniveau: wie „bei Ausfall einer Bremse“ - Tabelle 1, Anlage 2 BOStrab

Anmerkung 3: DIN EN 13452-1:2003 nimmt unter Punkt 5.4.1 Bezug auf den Fall von Zugtrennungen, definiert die „Abreißbremsung“ aber nicht explizit als Bremsungsart. Hinsichtlich des Verzögerungsniveaus wird an genannter Stelle auf die Mindestbremsverzögerungen für die Sicherheitsbremsung verwiesen.



Zugsicherungsbremsung (TR Br)

- Entsprechung in DIN EN 13452-1:2003: keine
- Auslösung: durch die Zugsicherungstechnik
- Ziel: Verhinderung von Geschwindigkeitsüberschreitungen und des Befahrens besetzter Gleisabschnitte
- Verzögerungsniveau: abhängig von zulässiger Geschwindigkeit und vorgegebenen Bremswegen

Lastfälle nach DIN EN 13452-1

Die Frage, welche Fahrzeugmasse für die Fahrzeuge bei der Auslegung und Prüfung der Bremsen angesetzt werden muss, ist von zentraler Bedeutung. Im Folgenden werden deshalb die Lastfälle nach DIN EN 13452-1:2003 dargestellt und den verschiedenen Bremsarten zugeordnet.

Die Lastfälle nach DIN EN 13452-1 werden mit dem Kürzel „EL“ bezeichnet, das für „European Load“ steht. Über eine Erweiterung wird deutlich gemacht, um welchen Lastfall es sich handelt. Folgende Lastfälle sind in der DIN EN 13452-1 definiert:

1. **EL E** - betriebsbereites Fahrzeug mit Fahrer oder Fahrerin und vollen Vorräten (z.B. Sand), jedoch ohne Fahrgäste (entspricht „Laststufe I/Betriebslast“ der TR Br, wenn für das Fahrpersonal 80 kg veranschlagt werden),
2. **EL S** - wie EL E sowie zusätzlich 75 kg pro regulärem Sitzplatz,
3. **EL T** - wie EL S sowie zusätzlich 75 kg pro Klappsitz,
4. **EL X** - wie EL S sowie zusätzlich 75 kg je X Personen pro Stehplatzfläche, multipliziert mit der Stehplatzfläche⁶

Die Norm erkennt an, dass Nahverkehrszüge, insbesondere U-Bahnen und Stadtbahnen im Vergleich zu Fernverkehrszügen sehr stark ausgelastet sein können. Die genaue Festlegung, wieviele Menschen maximal je Quadratmeter Stehplatzfläche für die Auslegung der Bremse zu veranschlagen sind, wird deshalb den Betreibern überlassen. Die Angabe von 6...6,67 Personen/Quadratmeter Stehplatzfläche wird jedoch als empfohlene Mindestlast angesehen.

Beispiel: NGT D8 DD der DVB AG



Die Fahrzeuge verfügen über 69 Sitze, von denen 24 theoretisch von eineinhalb Personen besetzt sein können, was sie jedoch in der Praxis kaum sind. Es steht ferner eine Stehplatzfläche von 25,75 m² zur Verfügung, sodass insgesamt maximal zwischen 172 (4 Pers./qm) und 224 (6 Pers./qm) Personen befördert werden können.

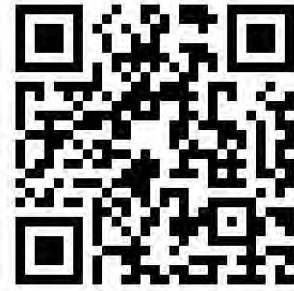
Für die einzelnen Lastfälle ergeben sich folgende Werte:

- **EL E:** 38.775 kg = **39 t**
- **EL S:** 38.775 kg + 69 · 75 kg = 43.950 kg = **44 t**
- **EL T:** = EL S (keine Klappsitze vorhanden)
- **EL 4:** 43.950 kg + 25,75 m² · 4 Pers./m² · 75 kg = 51.675 kg = **52 t**
- **EL 6:** 43.950 kg + 25,75 m² · 6 Pers./m² · 75 kg = 55.575 kg = **56 t**
- **EL 6.67:** 43.950 kg + 25,75 m² · 6,67 Pers./m² · 75 kg = 56.825 kg = **57 t**

⁶Es ergibt sich bei 4 Pers./m² eine Masse von 300 kg je Quadratmeter Stehplatzfläche und bei 6 Pers./m² erhält man 450 kg je Quadratmeter Stehplatzfläche.

 Lastannahmen im SPNV - Wie viele Menschen passen in eine U-Bahn?

Drei Videosequenzen von der U-Bahn in Tokio...



Weitere Festlegungen

Die Norm legt die grundsätzlichen **Randbedingungen** fest, auf die sich das geforderte Bremsvermögen der Fahrzeuge bezieht. So gilt zum einen, dass es sich bei den festgelegten Bremswegen eigentlich um „Anhaltewege“ handelt (Berücksichtigung der äquivalenten Ansprechzeit - siehe Kapitel 3.1, jedoch keine Berücksichtigung der Reaktionszeit des Fahrpersonals). Zum anderen wird festgehalten, dass diese Wege auf geradem und ebenem Gleis mit trockenen, sauberen Schienenköpfen erreicht werden sollen.

Neben Grenzwerten für mittlere Verzögerungen und Bremswege legt die DIN EN 13452-1 auch **Komfortwerte** im Sinne von maximalen Momentanverzögerungen und maximalen Längsruck fest. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass bei Notbremsungen von Schienenfahrzeugen, die stehende Personen befördern und über keinerlei Rückhaltesysteme (z.B. Gurte) verfügen, nicht nur an die Vermeidung von Kollisionen, sondern auch an die Sicherheit der Passagiere gegen Umfallen und Anprall gedacht werden muss.

Ferner stellt der hier betrachtete Standard unter Bezugnahme auf die DIN EN 50126 dezidierte Forderungen zur **Zuverlässigkeit** der Bremssysteme auf. So darf das Auftreten eines „Einzelfehlers“ nicht dazu führen, dass die durch die Norm, die BOStrab oder den Fahrzeugbetreiber festgelegten Grenzwerte über- bzw. unterschritten werden (je nach Kontext).

Um einen einwandfreien und sicheren Betrieb der Bremsanlage zu garantieren, fordert die DIN EN 13452-1 die Installation von **Überwachungseinrichtungen**, mit denen sich mindestens der Zustand der Notbremseinrichtung, ein vermindertes Bremsvermögen und eine feste Bremse detektieren lassen.

3 Physik der Bremsung

3.1 Kinematik von Bremsungen

Fahrdynamisch werden Bremsungen grundsätzlich durch die folgenden Parameter charakterisiert:

- Verzögerungsniveau (maximale Verzögerung, mittlere Verzögerung)
- Verzögerungsaufbau (Verzugszeit, Ansprechzeit, Aufbauzeit, Ruck)
- Verlauf der voll entwickelten Verzögerung (konstant, linear, progressiv, degressiv,...)

Das einfachste fahrdynamische Modell ist die Bremsung mit konstanter Verzögerung (siehe Abbildung 3.1 unten). Diese stellt eine grobe Näherung dar und nutzt eine „äquivalente Verzögerung“ a_e . Dabei handelt es sich um eine über den Weg gemittelte Verzögerung, die sich nach DIN EN 13452-1:2005 mit folgender Gleichung ermitteln lässt:

$$a_e = \frac{v_0^2}{2 \cdot (s_3 - v_0 \cdot t_e)}. \quad (3.1)$$

Benötigt werden also die Parameter **Bremsausgangsgeschwindigkeit** v_0 , **Anhalteweg** s_3 und **äquivalente Ansprechzeit** t_e . Letztere ergibt sich aus **Verzugszeit** t_{10} und **Ansprechzeit** t_{90} gemäß Gleichung 3.2:

$$t_e = t_{10} + \frac{t_{90} - t_{10}}{2}. \quad (3.2)$$

Die DIN EN 13452-1 legt in Abschnitt 6 fest, in welchem Rahmen sich die Parameter äquivalente Verzögerung, äquivalente Ansprechzeit, Momentanverzögerung und Ruck für die Fahrzeugkategorien Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge, U-Bahn-Fahrzeuge, U-Bahn-Fahrzeuge mit Luftreifen und S-Bahn/Regional-Bahn-Fahrzeuge bewegen sollen.

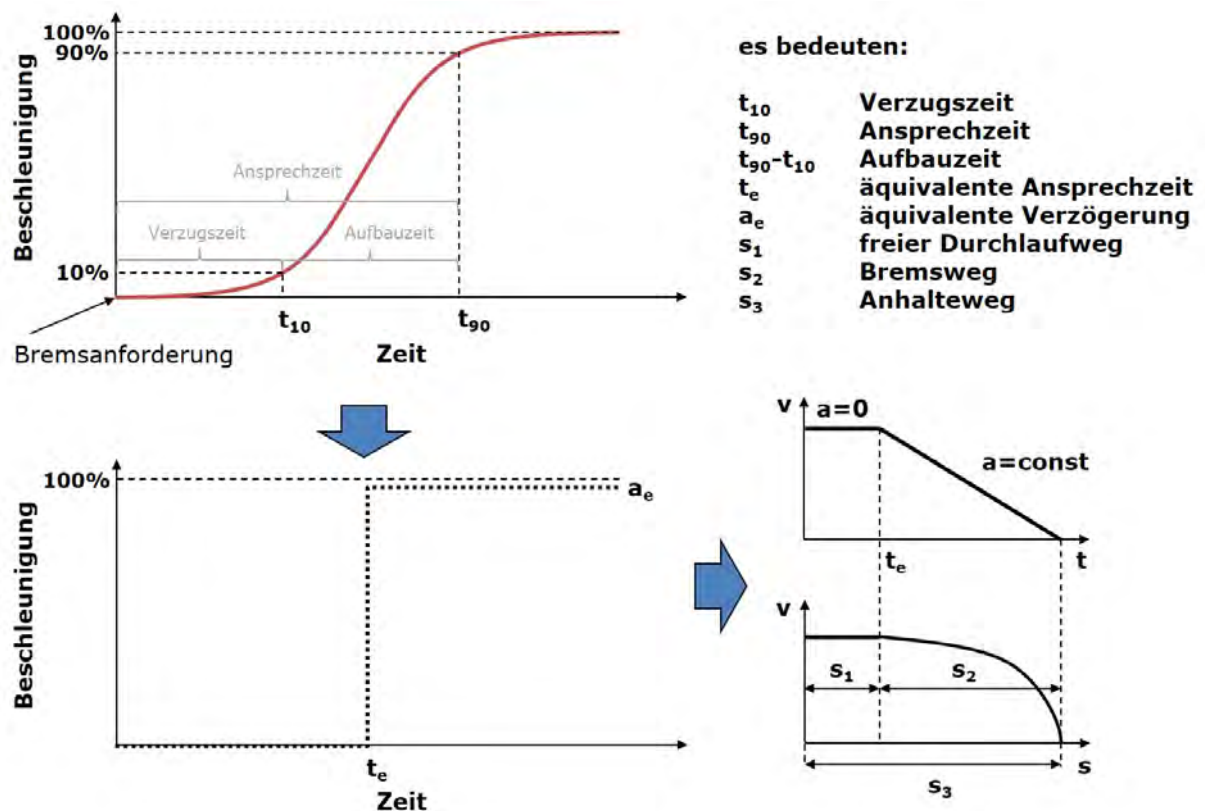


Abbildung 3.1: Kenngrößen einer Bremsung nach DIN EN 13452-1:2005

Exemplarisch werden im Folgenden einige **Grenzwerte** für Straßen- und Stadtbahnen angegeben (Details: siehe DIN EN 13452-1:2005):

- mittlere Verzögerung der Betriebsbremse: 0 bis $1,2 \text{ m/s}^2$,
- Minimalverzögerung bei Notbremsungen: $1,2 - 2,8 \text{ m/s}^2$ (je nach Art der Notbremsung),
- maximale äquivalente Ansprechzeit der Betriebsbremse: $1,5 \text{ s}$,
- maximale äquivalente Ansprechzeit der Notbremse: $0,85 - 2 \text{ s}$ (je nach Art der Notbremsung),
- maximale Momentanverzögerung der Betriebsbremse: 2 m/s^2 ,
- maximale Momentanverzögerung der Notbremse: $2,5 - 5 \text{ m/s}^2$ (je nach Art der Notbremsung),
- maximaler Ruck bei Betriebsbremsungen: $1,5 \text{ m/s}^3$,
- maximaler Ruck bei Notbremsungen: $4 - 8 \text{ m/s}^3$ (je nach Art der Notbremsung).

3.2 Fahrdynamik der Bremsung

Die im vorstehenden Abschnitt betrachteten Verzögerungen ergeben sich aus dem Wirken verschiedener Längskräfte am Fahrzeug, deren prinzipielle Kenntnis hier vorausgesetzt wird¹. Für Bremsungen gilt die fahrdynamische Grundgleichung in der folgenden Formulierung:

$$0 = -\xi \ddot{x} m - F_B - F_{WF} - F_{WS} \quad (3.3)$$

Der Fahrzeugwiderstand F_{WF} wird dabei in der Regel vernachlässigt und als zusätzliche Sicherheit betrachtet. Gleiches gilt für den Krümmungswiderstand, sodass sich der Term für den Streckenwiderstand F_{WS} auf den Längsneigungswiderstand beschränkt, der bei Neigungen $i \leq 10\%$ mit folgender Gleichung angenähert werden kann:

$$F_{WS} = m \cdot g \cdot i \quad (3.4)$$

Die wirkenden Bremskräfte setzen sich aus der Summe der Bremskräfte am Rad $\sum F_{B,R}$ und der Summe der Bremskräfte der Schienenbremse $\sum F_{B,S}$ zusammen:

$$F_B = \sum F_{B,R} + \sum F_{B,S} \quad (3.5)$$

Die Bremskräfte am Rad können elektrodynamisch $F_{B,R,ED}$ oder mechanisch $F_{B,R,mech}$ erzeugt werden.

Die **elektrodynamisch erzeugte Bremskraft** ist abhängig von dem erzeugten Bremsmoment der elektrischen Fahrmotoren $M_{B,ED}$, dem mechanischen Übersetzungsverhältnis der Rad(satz)-getriebe i_{RG} und deren Wirkungsgrad η_{RG} , dem Radius der angetriebenen Räder r_T (ungünstigster Zustand: neu - kleinste Kraft bei bestimmtem Drehmoment) sowie der Anzahl von Fahrmotoren z_{FM} . Gleichung 3.6 zeigt die entsprechenden Zusammenhänge.

$$F_{B,R,ED} = \frac{M_{B,ED}(v) \cdot i_{RG}}{r_T \cdot \eta_{RG}} \cdot z_{FM} \quad (3.6)$$

Mechanisch werden die Bremskräfte am Rad heute hauptsächlich mit Scheibenbremsen erzeugt. Historische Straßenbahnen weisen mitunter auch Klotz- oder Trommelbremsen auf (siehe Abbildung 3.2). Im Folgenden wird jedoch ausschließlich auf Scheibenbremsen Bezug genommen.

¹vgl. u.a. Lehrveranstaltung „Fahrdynamik der Schienenfahrzeuge“



(a) Klotzbremse an einem Straßenbahnwagen des Typs F 2.10 (München)



(b) Solenoidbremse (als Trommelbremse wirkend) an einem Tatra T4



(c) Scheibenbremse an einer Bombardier Flexity-Straßenbahn

Abbildung 3.2: Beispiele für ausgeführte mechanische (Rad-)Bremsen

Die Berechnung der **mechanischen Bremskräfte am Rad** $F_{B,R,mech}$ ist von der Anordnung der Scheibenbremsausrüstung im Fahrwerk abhängig. Aus den in Abbildung 3.3 gezeigten vier wichtigsten Varianten geht hervor, dass die Bremsscheibe grundsätzlich auf der Radwelle (Variante 1), am Rad (Variante 2), auf der Radsatzwelle (Variante 3) oder auf einer Bremswelle (Variante 4) sitzen kann.

Die erzeugte Bremskraft ist folglich abhängig von der Spannkraft des Bremssattels $F_{N,BS}$, dem Reibwert zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe μ_{BS} , dem Verhältnis von Reibradius der Bremsscheibe r_{BS} und Nennradius der Räder r_R , dem Übersetzungsverhältnis des Radsatzgetriebes i_{RG} sowie der Anzahl gleicher Bremssättel z_{BS} , wie die nachfolgend aufgeführte Gleichung 3.7 verdeutlicht.

$$F_{B,R,mech} = 2 \cdot F_{N,BS} \cdot \mu_{BS} \cdot \frac{r_{BS}}{r_R} \cdot i_{RG} \cdot z_{BS} \quad (3.7)$$

Der Reibradius stellt den ideellen Hebelarm dar, an dem die resultierende Belagreibrkraft angreift. Er lässt sich nach Wende² überschlägig aus dem Außen- ($r_{BS,a}$) und Innenradius ($r_{BS,i}$) des Reibrings der Bremsscheibe berechnen:

$$r_{BS} = 0,97 \cdot \sqrt{0,5 \cdot (r_{BS,a}^2 + r_{BS,i}^2)} \quad (3.8)$$

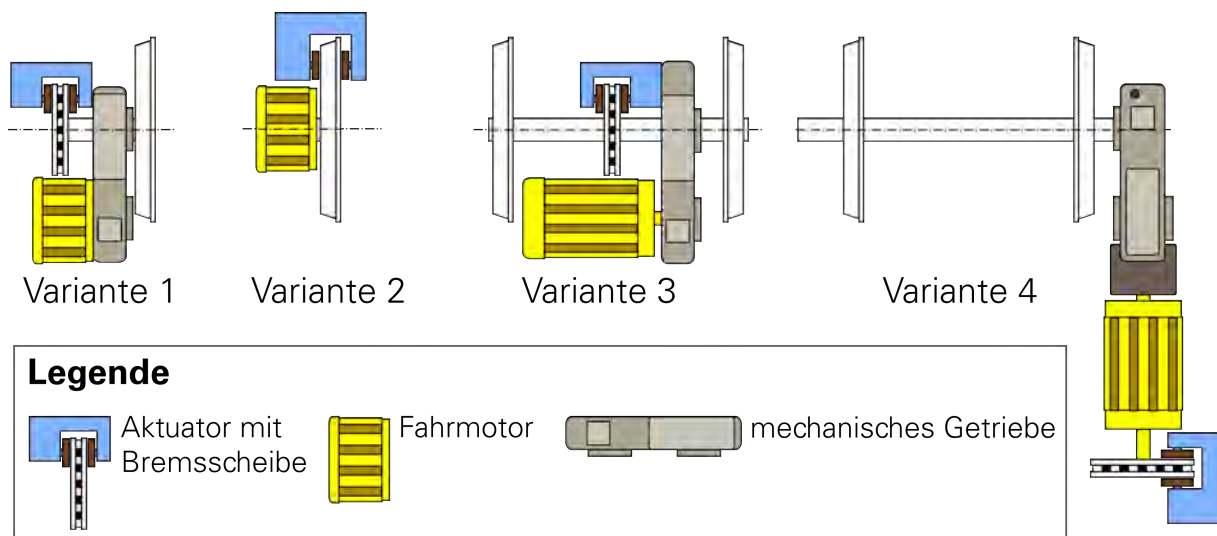


Abbildung 3.3: Mögliche Anordnungen der Scheibenbremse in Straßenbahn-Fahrwerken

Von zentraler Bedeutung ist bei mechanischen Radbremsen der Reibwert(verlauf) zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe. Dieser ist nicht konstant, sondern von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu zählen vor allem die drei Faktoren Gleitgeschwindigkeit (proportional zur Fahrgeschwindigkeit), Belagtemperatur und Belagpressung. Der Wertebereich kann typischerweise zu $\mu_{BS} = 0,3 \dots 0,4$ angenommen werden (siehe auch Abschnitt 5.8).

Es ist zu beachten, dass Bremsscheiben, die auf Bremswellen „hinter“ dem Radsatzgetriebe (vom Rad-Schiene-Kontakt aus gesehen) sitzen (wie zum Beispiel bei Variante 4 in Abb. 3.3), mit wesentlich höheren Drehzahlen rotieren als Rad(satzwellen)bremsscheiben. Gleichzeitig müssen bei gleicher Bremsleistung geringere Spannkräfte gewählt werden, da die Leistung

²Dietrich Wende: „Fahrdynamik des Schienenverkehrs“, 1. Auflage, B.G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003, S. 229

als Produkt aus Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit definiert ist. Gleitgeschwindigkeit und Belagpressung werden sich damit in einem anderen Wertebereich als bei Rad(satzwellen)bremsscheiben bewegen, sodass ggf. mit anderen effektiven Belagreibwerten und einem abweichenden thermischen Verhalten gerechnet werden muss.

Der zweite Summand zur Berechnung der Gesamtbremskraft (siehe Seite 39, Gleichung 3.5) repräsentiert die durch die **Schienenbremsen** generierten Bremskräfte $F_{B,S}$. Schienenbremsen sind bei Fahrzeugen des SPNV in der Regel Magnetschienenbremsen, deren Bremskraft sich aus dem Produkt von Normalkraft $F_{B,S,N}$, Gleitreibungsbeiwert zwischen Bremsmagnet und Schienenkopf μ_{MG} sowie der Anzahl der Magnete z_{MG} ergibt.

$$F_{B,S} = F_{B,S,N} \cdot \mu_{MG} \cdot z_{MG} \quad (3.9)$$

Die Normalkraft der Magnetschienenbremsen ist eine Nenngröße für die Bremsauslegung. Ihr Wert ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Der Gleitreibungsbeiwert μ_{MG} ist vor allem von der Geschwindigkeit abhängig und steigt mit abnehmender Geschwindigkeit progressiv an, was zu einem deutlich spürbaren Anhalteruck bei Einsatz der Magnetschienenbremsen führt (siehe Abschnitt 5.9).

Die in diesem Kapitel aufgeführten Gleichungen dienen vor allem der Dimensionierung der Bremsausrüstung. Eine geschlossene Lösung der einführend aufgestellten Bewegungsgleichung (Gl. 3.3) ist aufgrund der komplexen Abhängigkeiten wesentlicher Einflussgrößen (vor allem: der Reibwerte) nicht ohne weiteres möglich. Die Einhaltung der durch die BOStrab sowie die DIN EN 13452-1:2005 vorgegeben Grenzwerte wird durch Bremsversuche nachgewiesen, wie sie beispielsweise im Rahmen der Versuche zur Erlangung einer Inbetriebnahmegenehmigung gemäß § 62 BOStrab durchgeführt werden.

4 Bremssystem

4.1 Grundaufbau

Bevor verschiedene Arten von Bremsausrüstungen genauer betrachtet werden, wird in diesem Abschnitt zunächst untersucht, aus welchen prinzipiellen Elementen ein Bremssystem in Fahrzeugen des Schienenpersonennahverkehrs eigentlich besteht.

Wie Abbildung 4.1 illustriert, gehören die Grundkomponenten „Bedienelement“, „Bremssteuerung“, „Energieversorgung und Bremskraftregelung“, „Bremskraftherzeugung“ sowie „Überwachung und Diagnose“ dazu.

Was kann man sich nun unter diesen Grundkomponenten vorstellen und ist das wirklich schon alles? Diesen Fragen soll im Folgenden nachgegangen werden.

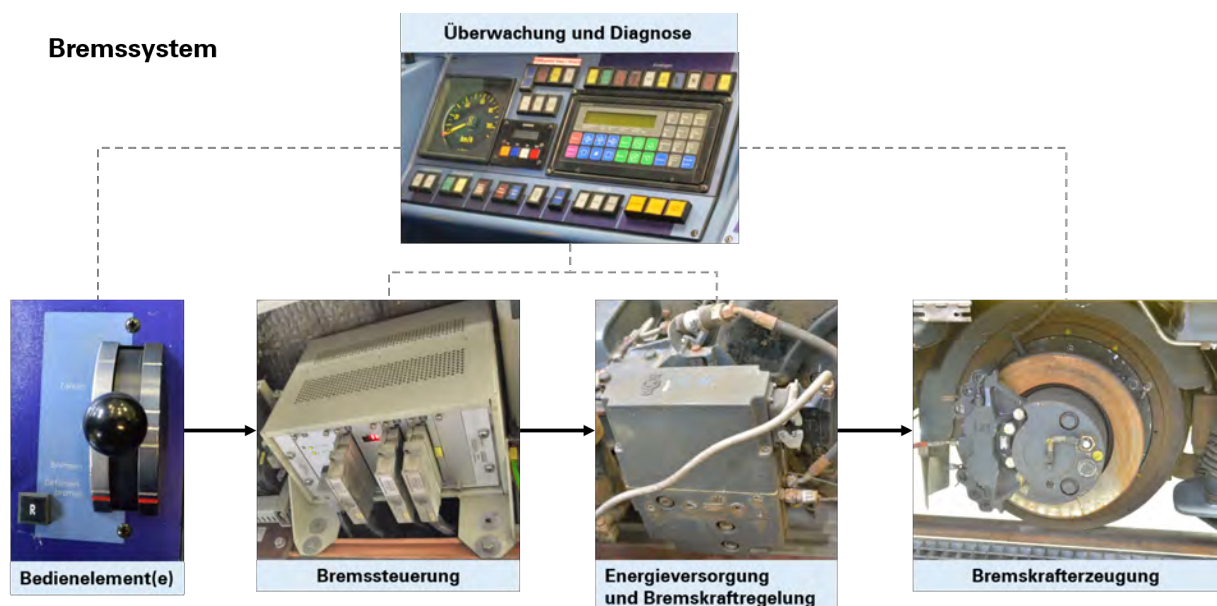


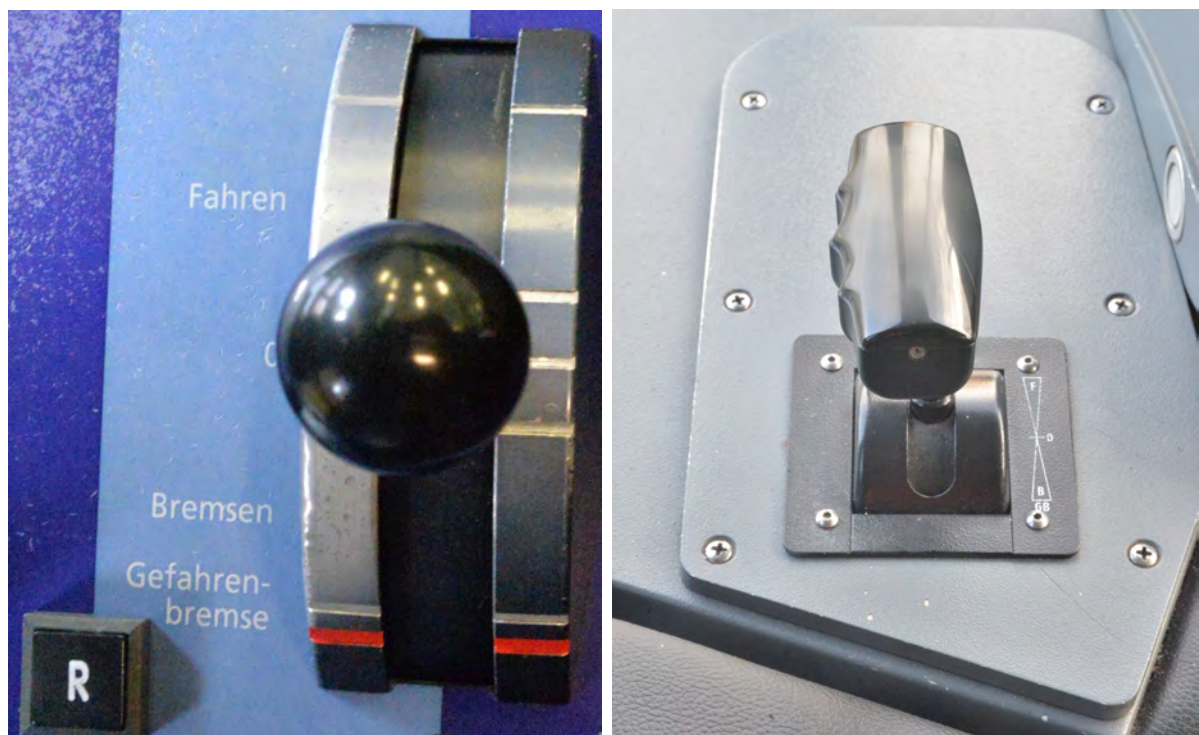
Abbildung 4.1: Prinzipieller Aufbau eines Bremssystems

4.2 Grundkomponenten

4.2.1 Bedienelemente

Die Bedienelemente stellen eine der Schnittstellen zwischen Fahrpersonal und Fahrzeug bzw. Bremssystem dar und müssen vorgegebene Bremsanforderungen in elektrische Signale überführen. Dies kann zum Beispiel eine stufenlose Gleichspannung sein, die vom Auslenkwinkel des Bedienhebels abhängig ist.

Im Gegensatz zu Vollbahn-Fahrzeugen, bei denen die Bedienelemente für Fahren (Traktions- sowie Geschwindigkeitsregelung) und Bremsen häufig getrennt ausgeführt werden, existiert auf Fahrzeugen des SPNV zumeist „nur“ ein einziger Fahr-Brems-Schalter (Abbildung 4.2). Dieser verfügt über eine rastierte Gefahrenbremsstellung und dient häufig auch der Überwachung der Anwesenheit und Handlungsfähigkeit des Fahrpersonals (Sifa-Taster oder auch „Totmann-Schalter“ genannt).



(a) Fahr-Brems-Schalter auf einem Stadtbahn-Triebwagen der Saarbahn (b) Fahr-Brems-Schalter einer Dresdner Straßenbahn des Typs NGT D8 DD

Abbildung 4.2: Beispiele für Fahr-Brems-Schalter auf Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen

4.2.2 Bremssteuerung

Da auf den Fahrzeugen in der Regel mehr als ein Bedienelement und mehr als eine Bremse vorhanden ist, müssen die erzeugten Signale gebündelt und koordiniert sowie die unterschiedlichen Bremsen situationsabhängig angesteuert werden. Diese Aufgaben übernimmt die Bremssteuerung, die ein Bestandteil der gesamten Fahrzeugsteuerung ist.

Einerseits **interpretiert** die Bremssteuerung die **Bremsanforderung** des Fahrpersonals (Vorliegen einer Betriebs- oder Voll- oder Gefahren- oder Notbremsung?) und **steuert** in Abhängigkeit des gewünschten und technisch möglichen Verzögerungsniveaus **gezielt die unterschiedlichen Bremssysteme an** („Blending“).

Sie sorgt ferner für die **Ablösung der elektrodynamische Bremse** durch die mechanischen Radbremsen bei kleinen Geschwindigkeiten sowie für die automatische **Sicherung des Fahrzeuges gegen Abrollen** und während des Haltes. Sie **verhindert** zudem **das Rückrollen des Fahrzeuges bei der Anfahrt** nach einem Fahrzeughalt.

Beim Anliegen mehrerer Bremsanforderungen (z.B. gleichzeitiges Betätigen von unterschiedlichen Bedienelementen) nimmt die Bremssteuerung eine **Priorisierung der Bremsbefehle** vor, um das größtmögliche Maß an Sicherheit zu gewährleisten.

Die Funktionalität einer **Notbremsüberbrückung** wird, falls sie betrieblich notwendig ist, ebenfalls von der Bremssteuerung zur Verfügung gestellt.

Der **Ausfall von Teilen der Bremsausrüstung** wird von der Bremssteuerung erkannt, angezeigt und, soweit wie möglich, durch das Ansteuern anderer Bremsen **kompensiert**.

Die Bremssteuerung wird heute in der Regel **von einer Gleitschutzregelung ergänzt**, die ein Blockieren einzelner Räder oder Radsätze detektiert und entsprechende Gegenmaßnahmen einleitet, um einerseits die Bildung von Flachstellen zu verhindern und andererseits die durch die Gleitvorgänge bedingte Bremswegverlängerung zu begrenzen.

Das Bremsverhalten der Fahrzeuge im SPNV soll für die Fahrzeugführer möglichst gut kalkulierbar und damit weitgehend unabhängig vom Besetzungsgrad sein. Die Bremssteuerung muss daher in der Lage sein, eine **lastabhängige Anpassung der Bremskräfte** vorzunehmen. Ferner soll ein **automatisches Ansprechen der Sandstreueinrichtung** sichergestellt werden, wenn der im Rad-Schiene-Kontakt ausnutzbare Kraftschluss so stark absinkt, dass die geforderten Bremsverzögerungen nicht eingehalten werden können.

4.2.3 Energieversorgung und Bremskraftregelung

Um aus den durch die Bremssteuerung erzeugten Signalen tatsächlich eine Bremskraft zu generieren, bedarf es in der Regel weiterer Komponenten, die zwischen Bremssteuerung und Aktuatorik geschaltet sind. Sie stellen die zum Bremsen benötigte Energie zur Verfügung und regeln den Leistungsfluss zu den Aktuatoren. Im Falle einer hydraulischen Bremse sind dies häufig sogenannte Hydrogeräte, in den das erforderliche Ölvolumen, eine Ölpumpe, ein Druckspeicher, Öl-Filter sowie die erforderlichen Hydraulikventile integriert sind (siehe Kapitel 5.6). Analog erfolgt im Falle der elektrodynamischen Bremse in den Umrichtern eine Umsetzung der Steuersignale in eine konkrete Speisespannung und -frequenz im Rahmen der Drehmomentregelung der Fahrmotoren (häufig als Flussteuerung ausgeführt).

Im Allgemeinen können diese Komponenten als Schnittstelle zwischen der Fahrzeugelektronik und der Fahrzeughydraulik bzw. -mechanik oder -elektrik betrachtet werden.

4.2.4 Bremskrafterzeuger

Die Bremskrafterzeuger bzw. Aktuatoren sind das letzte Glied der in diesem Abschnitt betrachteten Kette vom Bremsbefehl des Fahrzeugführers zur Erzeugung von Bremskräften. Die Bremskräfte werden auf Fahrzeugen des SPNV bevorzugt elektrodynamisch erzeugt (generatorischer Betrieb der Fahrmotoren), zusätzlich stehen mechanische Bremsen zur Verfügung, bei denen es sich heute vorwiegend um Scheibenbremsen handelt, die hydraulisch, pneumatisch oder elektromechanisch betätigt sein können.

4.2.5 Überwachung und Diagnose

Die Wichtigkeit einer fehlerfrei funktionierenden Bremse für die Sicherheit des Betriebes von Fahrzeugen kann gar nicht hoch genug bewertet werden. Es ist deshalb unerlässlich, geeignete Vorrichtungen zur Überwachung und Diagnose des Bremssystems auf den Fahrzeugen zu integrieren.

Es muss sichergestellt werden, dass der Ausfall oder Teilausfall von Bremsen zuverlässig detektiert und dem Fahrzeugführer entsprechend angezeigt wird. Gleiches gilt für das Auftreten kritischer Zustände wie etwa thermischer Überlastung oder ungewolltem Druckverlust.

4.2.6 Weitere Bestandteile von Bremssystemen

Wie eingangs erwähnt, sollten in diesem Kapitel die wesentlichen Bestandteile von Bremssystemen auf Fahrzeugen des SPNV betrachtet werden. Abschließend soll jedoch noch kurz auf die naheliegende Frage eingegangen werden, welche Komponenten gegebenenfalls noch zur Bremsausrüstung zu zählen wären.

Wichtig zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang die Notlöseeinrichtungen für die mechanischen Bremsen. Diese ermöglichen es, die mechanischen Bremsen der Fahrzeuge zum Beispiel mit Hilfe von hydraulischen Handpumpen zu lösen und damit ein Verschieben der Fahrzeuge (z.B. in der Werkstatt) zu ermöglichen.

Ferner ist die Interaktion mit dem Individualverkehr ein Spezifikum von Straßen- und Stadtbahnen, sodass diese, wie Kraft- und Nutzfahrzeuge auch, über eine Signalisierungseinrichtung verfügen müssen, die den nachfolgenden Verkehr warnt, wenn das Fahrzeug verzögert wird („Bremsleuchten“, d.h. Bremssignal Z3 gemäß Anlage 4 BOStrab).

5 Bremskrafterzeugung

5.1 Bremsbauarten

Die Fahrzeuge des SPNV werden heute überwiegend elektrisch angetrieben, sodass die Fahrmotoren als elektrodynamische Bremse den Hauptanteil der Bremsleistung bereitstellen. Sie werden stets ergänzt von Reibungsbremsen (i.d.R. Scheibenbremsen), die unter anderem für die Abbremsung bei kleinen Geschwindigkeiten und für die Sicherung der stillstehenden Fahrzeuge sorgen.

Fahrzeuge nach BOStrab weisen die Eigenheit auf, dass sie überwiegend auf klar definierten und abgegrenzten Netzen verkehren und meistens nur mit baugleichen oder konzeptionell ähnlichen Fahrzeugen bremstechnisch gekuppelt werden müssen. Im Gegensatz zu Vollbahnfahrzeugen, die gemäß UIC-Standards immer über eine pneumatische Bremse verfügen müssen, um freizügig einsetzbar zu sein, existiert bei Fahrzeugen nach BOStrab ein gewisser Spielraum, was die Ausführung der auf die Räder bzw. Radsätze wirkenden Bremsen betrifft. Abbildung 5.1 enthält eine Übersicht über die prinzipiell für den Einsatz auf Fahrzeugen im SPNV infrage kommenden Bremsbauarten, wobei die *tatsächlich* üblicherweise verbauten Bremsarten rot hervorgehoben sind.

In den folgenden Kapiteln werden diese Bremsbauarten näher beschrieben. Kenntnisse über

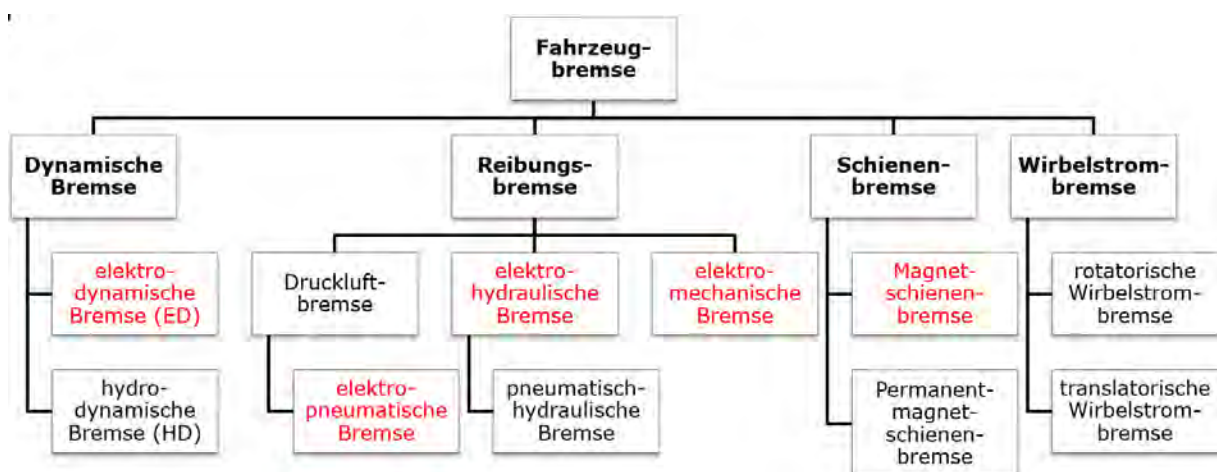


Abbildung 5.1: Theoretisch denkbare Bremsbauarten für Schienenfahrzeuge im SPNV

den Aufbau und die Funktionsweise von elektropneumatischen Bremsen werden an dieser Stelle vorausgesetzt, weshalb darauf nicht näher eingegangen wird. Der Darstellung der elek-

troch hydraulischen Bremse wird demgegenüber mehr Raum gegeben, da diese spezielle Bremsbauart im Schienenverkehr weniger geläufig und fast ausschließlich bei Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen anzutreffen ist.

Legende:

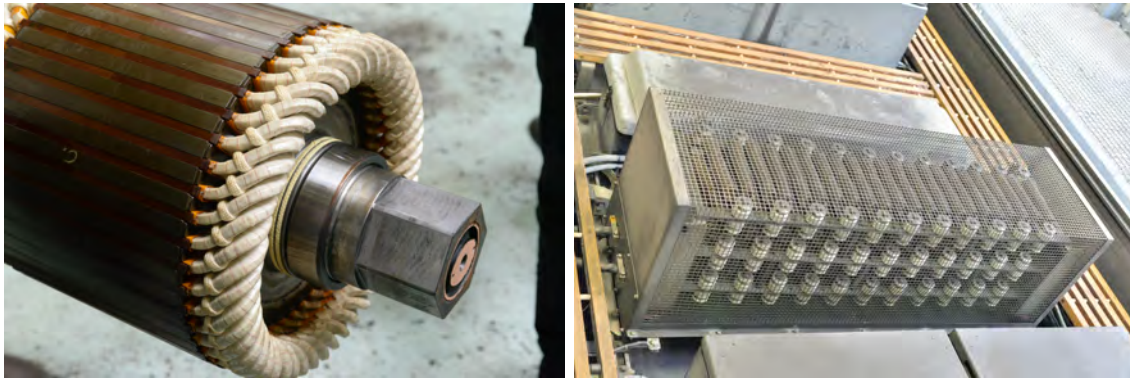
X - Standard
(X) - fallweise

		Druckluft- bremse	Direkte ep-Bremse	elektrohydr. Bremse	dynamische Bremse	Schienen- bremse	Federspeicher- bremse
	Straßen- bahnen			X	X	X	X
	Stadt- bahnen		(X)	(X)	X	X	X
	Unter- grund- bahnen		X		X		X
	lokbesp. Züge	X			(X)	X	X
	S-Bahn- Züge	(X)	X		X	(X)	X
	Regional- triebzug	(X)	X		X	X	X
	HGV- Züge	X	(X)		X	X	X

Abbildung 5.2: Übersicht der (üblichen) Bremsausrüstungen der verschiedenen Schienenfahrzeugkategorien

5.2 Elektrodynamische Bremsen

Elektrodynamische Bremsen (ED-Bremsen) dienen auf Fahrzeugen des SPNV als verschleißfreie Betriebsbremse sowie als leistungsfähige Gefahrenbremse, da sie über eine hohe Kurzzeitleistung verfügen. Durch ihren Einsatz ist es zudem möglich, einen großen Teil der bei den Bremsvorgängen umgewandelten Energie in das Oberleitungsnetz oder elektrische Speicher (siehe Kapitel 6) zurückzuspeisen.



(a) Rotor eines Fahrmotors

(b) Elektrischer Bremswiderstand

Abbildung 5.3: Ausgewählte Komponenten elektrodynamischer Bremsen

Zu den wesentlichen **Vorteilen der ED-Bremsen** zählen neben der bereits erwähnten Verschleißfreiheit und Rückspeisefähigkeit folgende Aspekte:

- + kurze Totzeiten ($< 0,4 \text{ s}$)¹,
- + kurze Aufbauzeiten ($< 0,2 \text{ s}$)²,
- + sehr effiziente Raumausnutzung durch Vereinigung von Antriebsmaschine und generatorischer Bremse in einem Aggregat³,
- + Erzeugung konstanter Bremskräfte über ein großes Geschwindigkeitsintervall möglich,
- + Überlastfähigkeit (Erzeugung von hohen Bremsdrehmomenten für kurze Zeit).

Dem stehen einige **Nachteile** gegenüber, die jedoch praktisch von den Vorteilen mehr als aufgewogen werden:

- Der Regelungsaufwand ist vergleichsweise hoch⁴.
- Es ist eine Zusatzbremse im Fahrzeugstillstand notwendig (keine Park- oder Haltebremsfunktion realisierbar⁵).

¹Es werden in diesem Kontext nur die Totzeiten der jeweiligen Bremsaktuatoren selbst betrachtet. Praktisch befinden sich diese am Ende einer Kette (Bedieneinrichtung, Bremssteuerung/Fahrzeugsteuerung, Leistungselektronik), deren Glieder die effektive Totzeit verlängern können.

²Gegebenenfalls muss eine Ruckbegrenzung vorgesehen werden.

³Hinzu kommt die Möglichkeit, Räder oder Radsätze getriebelos, also direkt anzutreiben (z.B. mit Radnabenmotoren).

⁴Dieser Punkt relativiert sich meistens, da die entsprechenden Umrichter und deren Peripherie auch für die Traktion benötigt werden und somit ohnehin vorhanden sind.

⁵Ein Bremsmoment kann heute mit der Drehstromantriebstechnik bis zu sehr kleinen Drehzahlen realisiert werden. Allerdings würde der Anhalteruck sehr groß werden, wenn keine Abregelung der ED-Bremse vor dem Fahrzeugstillstand erfolgen würde. Für die Stillstandssicherung der Fahrzeuge wird zudem eine Passivbremse gefordert, die sich elektrodynamisch nicht realisieren lässt.

- Die Funktionalität ist ggf. abhängig von einer externen Energiezufuhr (zur Erregung der Maschinen).

Den Prozess der Ablösung der ED-Bremse durch die mechanischen Bremsen zeigt zusammenfassend Abbildung 5.4. Es wird deutlich, dass im Falle einer Gefahrenbremsung alle verfügbaren Bremsen (gleitschutzunterstützt) bis zum Stillstand aktiv sind. Bei Betriebsbremsungen ist im Gegensatz dazu bis zur Ablösegeschwindigkeit, die fahrzeugabhängig zwischen 10 und 1 km/h liegen kann, nur die elektrodynamische Bremse aktiv, bevor die mechanische Bremse die Abbremsung bis zum Stillstand übernimmt, während gleichzeitig die elektrodynamische Bremskraft auf einen Wert von „0“ abgeregelt wird.

Die Abbildungen 5.5 und 5.6 zeigen beispielhaft die Verläufe der elektrodynamischen Brems-

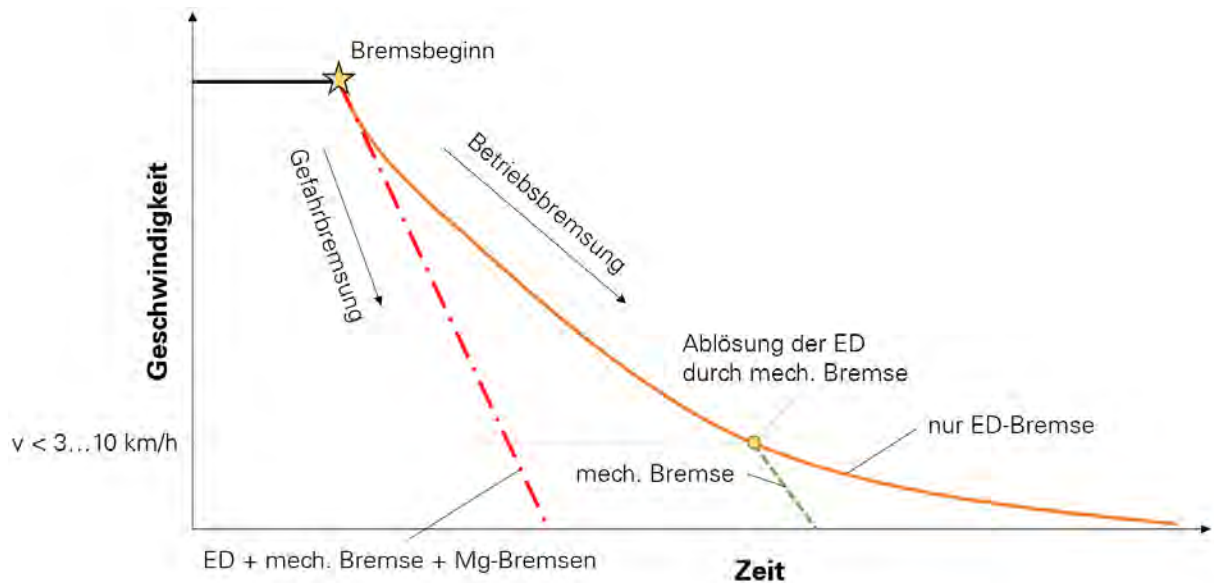


Abbildung 5.4: Zusammenwirken von elektrodynamischer und mechanischer Bremse bei Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen (in Anlehnung an [4])

kräfte über der Geschwindigkeit für ein Stadtbahn- und ein Straßenbahnfahrzeug. Es ist ersichtlich, dass typischerweise eine Regelung auf konstante Bremskraft bis zur Erreichung der maximalen Bremsleistung angestrebt wird, um annähernd konstante Bremsverzögerungen (und damit ein weitgehend ruckfreies Bremsen) über ein weites Geschwindigkeitsintervall zu erzielen.

Die maximale elektrodynamische Bremsleistung (Gefahrbremsung) des Stadtbahnfahrzeuges (Saarbahn-Triebzüge) liegt mit ca. 3100 kW deutlich (Faktor 3,2) über der Antriebsnennleistung (960 kW), aber auch bei Betriebsbremsungen kann kurzzeitig etwa der dreifache Betrag der Traktionsleistung zum Bremsen erzeugt werden.

Ermöglicht wird dies durch den Umstand, dass die Asynchronmaschinen beim Bremsen näher am Kippmoment auf dem stabilen Ast der natürlichen Kennlinien-Schar betrieben werden. Sie weisen dabei einen geringeren Wirkungsgrad als im Traktionsbetrieb auf, was jedoch aufgrund der Vorteile die das weitgehend elektrodynamische Bremsen bietet, akzeptiert wird.

Bei den Straßenbahn-Triebwagen der Nahverkehr Schwerin GmbH (siehe Abbildung 5.6) beträgt die Antriebsnennleistung der vier Fahrmotoren zusammen 500 kW, während von den gleichen Maschinen bei Betriebsbremsungen bis zu 1526 kW (Faktor 3) und bei Gefahrenbremsungen 1790 kW (Faktor 3,6) generiert werden können.

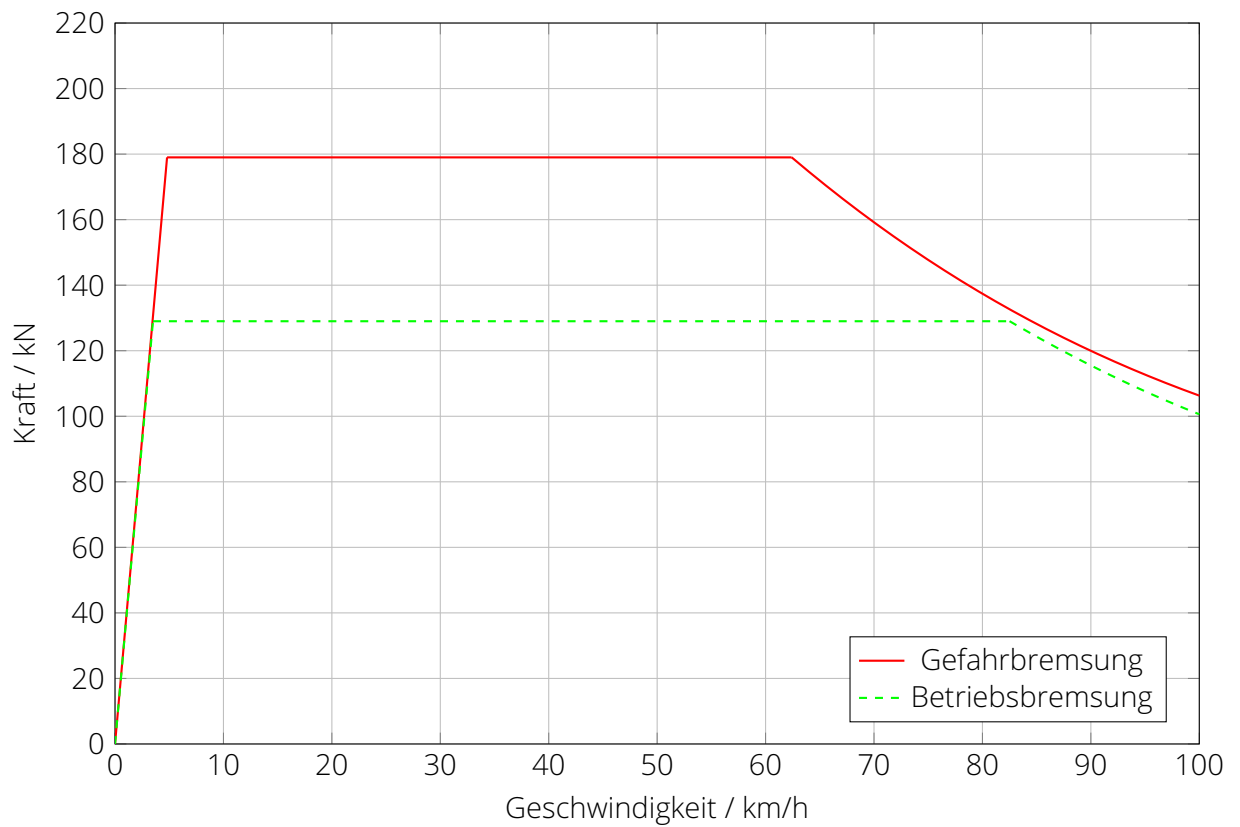


Abbildung 5.5: Bremskraft-Diagramm der Saarbahn-Triebzüge

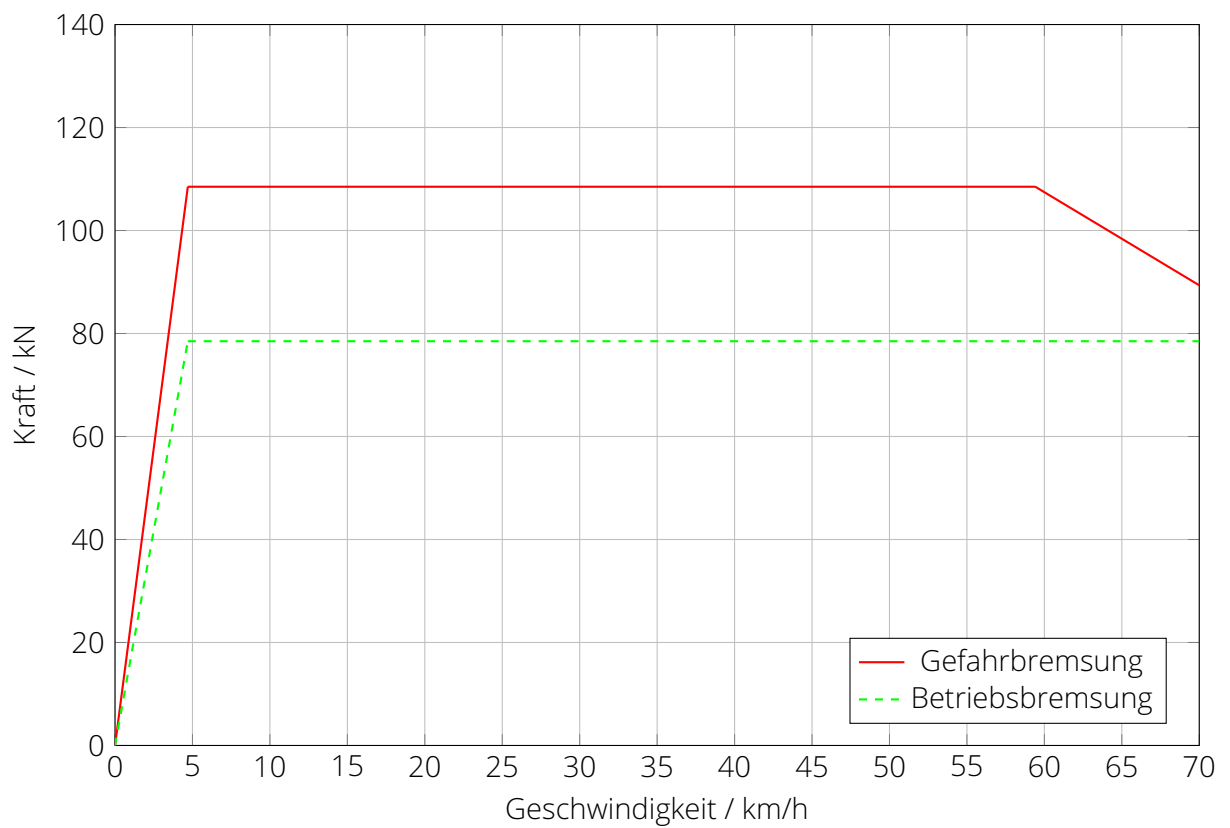


Abbildung 5.6: Bremskraft-Diagramm der Straßenbahn Triebzüge der Nahverkehr Schwerin GmbH (NVS)

5.3 Aufgaben und Charakterisierung mechanischer Bremsen im SPNV

Wie im voranstehenden Kapitel bereits erwähnt, wird bei Fahrzeugen des Schienenpersonennahverkehrs vorzugsweise die elektrodynamische Bremse als Betriebsbremse eingesetzt. Gleichwohl kann auf „klassische“ mechanische Radbremsen nicht verzichtet werden. Aufgrund der begrenzten Einbauträume, der geringeren Schallemissionen sowie des im Vergleich günstigeren Reibverhaltens⁶ haben sich heute **Scheibenbremsen** zur mechanischen Abbremsung der Räder bzw. Radsätze von Fahrzeugen im SPNV durchgesetzt. Diese werden in der Regel **elektrisch angesteuert**.⁷ Die eigentliche Bremskrafterzeugung kann pneumatisch, hydraulisch oder elektromechanisch erfolgen. Daher werden in den nächsten Abschnitten **elektrohydraulische, elektropneumatische und elektromechanische Bremsen** eingehend betrachtet. Grundlegende Kenntnisse zum Aufbau und zur Wirkungsweise pneumatischer (Eisenbahn-)bremsen werden dabei vorausgesetzt.

Bevor auf die einzelnen Bauarten von Scheibenbremssystemen eingegangen wird, sollen an dieser Stelle noch einige Aspekte aufgeführt werden, die für alle mechanischen Radbremsen auf Fahrzeugen des SPNV zutreffen, unabhängig davon, auf welche Art und Weise die Bremskräfte erzeugt werden.

Zunächst werden die Aufgaben mechanischer Rad(satz)bremsen diskutiert. Wie bereits im Kapitel 5.2 beschrieben, erfolgt bei niedrigen Geschwindigkeiten⁸ eine **Ablösung der elektrodynamischen** Bremse durch die mechanischen Bremsen. Diese übernehmen zudem die **Fahrzeugsicherung gegen Entrollen** im Stillstand (Parkbremse, Haltebremse, Stillstandsbremse). Genügen die durch die elektrodynamische Bremse in Kombination mit den Schienenbremsen erzeugten Bremskräfte bei Gefahrbremsungen nicht, um die gesetzlich (BOStrab) festgelegten Bremswege einzuhalten, werden die mechanischen Bremsen zur **Erhöhung des Verzögerungsniveaus** eingesetzt (man spricht in diesem Zusammenhang auch vom „Zubremser“). Schließlich dienen mechanische Bremsen bei Bedarf als **Ersatz der elektrodynamischen Bremse**, sollte diese einmal (teilweise) ausfallen.

5.4 Integration der Rad(satz)bremsen

Die Anordnung der mechanischen Rad(satz)bremsen ist vom Antriebs-, Fahrwerks- und Bremskonzept abhängig. Heutige Straßenbahnfahrzeuge weisen einen hohen Anteil niederfluriger Fahrzeugteile auf, sodass der Bauraum für die Fahrwerke sehr beschränkt ist und bisweilen sehr unorthodoxe Konzepte zur Anordnung der Fahrmotoren und der Scheibenbremsausrüstung gefunden werden (mussten). Die Abbildungen 5.7 bis 5.20 geben einen Überblick über die gebräuchlichsten Anordnungen von elektrodynamischen Bremsen (=Fahrmotoren) und Scheibenbremsen in angetriebenen und nicht angetriebenen Straßen- und Stadtbahnfahrwerken. Es wird deutlich, dass die Scheibenbremsen entweder auf die Räder direkt oder

⁶Bei Scheibenbremsen ist der Reibwertverlauf über der Geschwindigkeit annähernd konstant oder leicht linear ansteigend/abfallend, während bei Klotzbremsen mitunter (abhängig von der Sohlenart) ein deutlicher Anstieg der Reibwerte bei kleinen Geschwindigkeiten und damit einhergehend ein großer Anhalteruck zu verzeichnen ist. Zudem wird das tribologische System (Bremsbelag+Brems Scheibe) bei Scheibenbremsen nicht zusätzlich durch die periodisch wiederkehrende Überrollung der Kontaktfläche (Rad-Schiene-Kontakt) beeinflusst, wodurch die Reproduzierbarkeit der Reibwerte und damit auch des Bremsverhaltens bei Scheibenbremsen besser als bei Klotzbremsen ist.

⁷Fahrzeuge im SPNV (insbesondere Straßen- und Stadtbahnen) müssen innerhalb sehr kurzer Bremswege angehalten werden können. Die vergleichsweise träge pneumatische Ansteuerung würde sich entsprechend kontraproduktiv auswirken.

⁸„Niedrig“ bedeutet in diesem Zusammenhang ca. 1 bis 10 km/h. Die Ablösegeschwindigkeiten sind von Fahrzeugbaureihe zu Fahrzeugbaureihe verschieden.

Beispiel: Eurotram

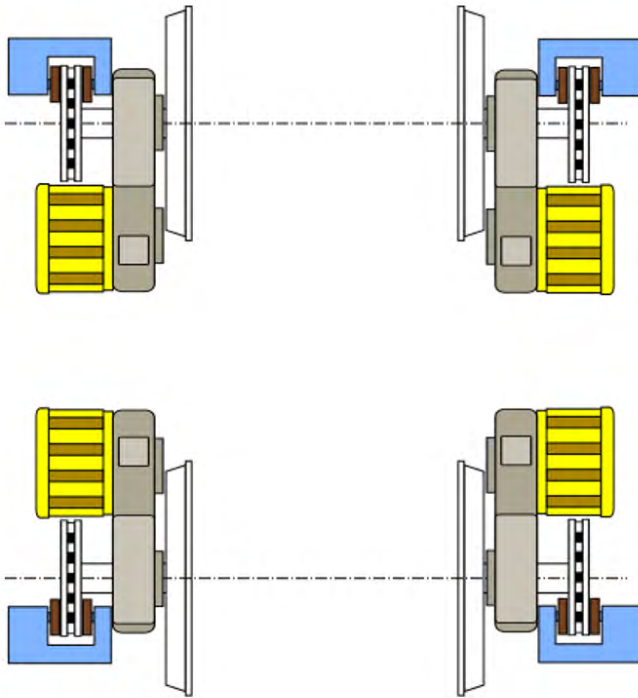


Abbildung 5.7: Außenliegende Einzelradantriebe - Variante 1

die Radsatzwellen bzw. die Motorwellen wirken können. Bei letztgenannter Anordnung befinden sich die Bremsscheiben vom Rad aus gesehen hinter der Rad(satz)getriebeübersetzung, wodurch sie mit wesentlich größeren Drehzahlen laufen als die mit den Rädern oder Radsätzen direkt verbundenen Bremsscheiben.

Die Bremsscheiben müssen dabei nicht unmittelbar auf der Radsatzwelle sitzen, zum Teil sind sie auch über elastische Kupplungselemente mit dieser verbunden. Entscheidend ist, dass hinsichtlich ihrer Drehzahl kein mechanisches Übersetzungsverhältnis berücksichtigt werden muss.

Beispiel: Adtranz/Stadler Variobahn

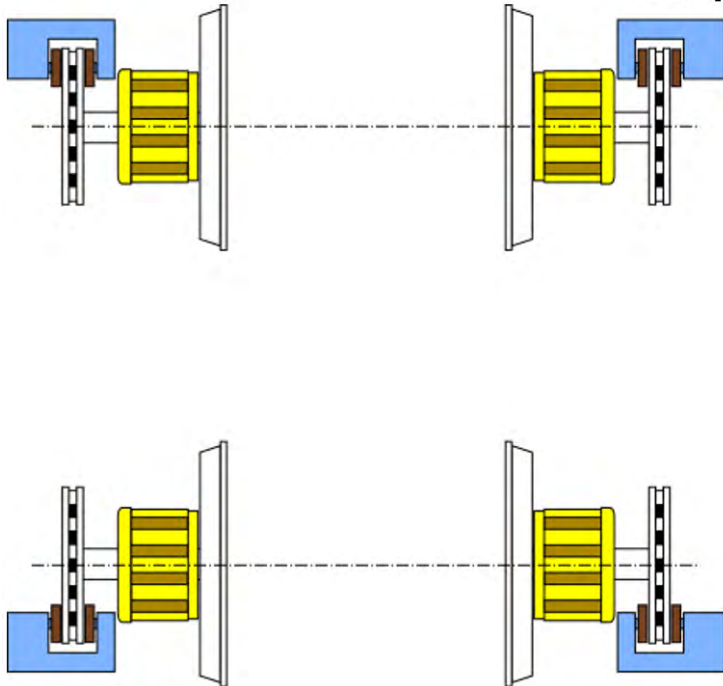
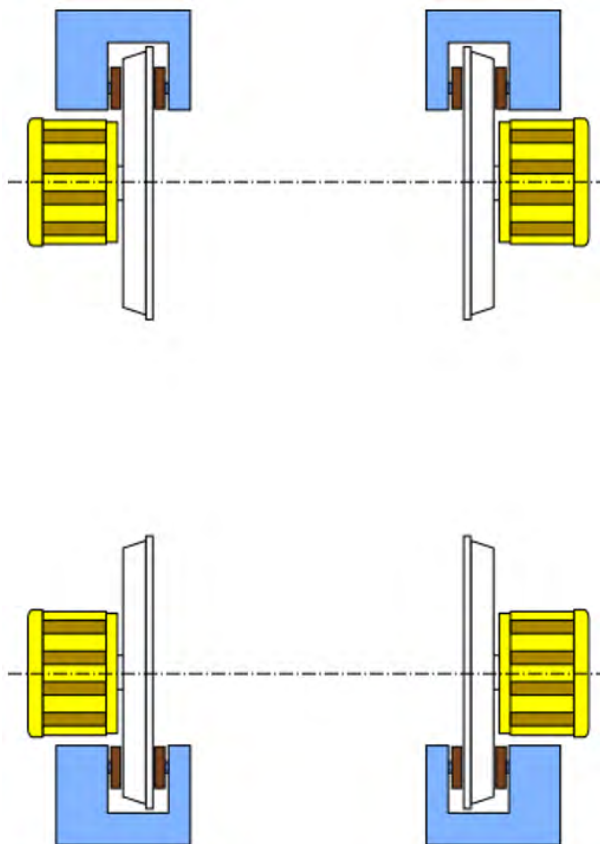


Abbildung 5.8: Außenliegende Einzelradantriebe - Variante 2



Beispiel: Škoda 15T



Abbildung 5.9: Außenliegende Einzelradantriebe - Variante 3

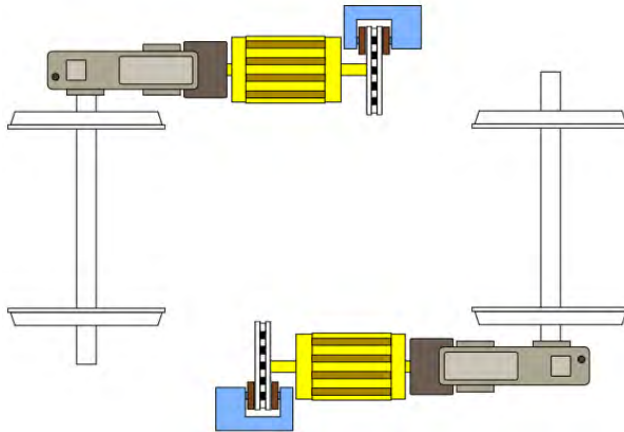


Abbildung 5.10: Außenliegende Längsantriebe - Variante 1

Beispiel: Škoda 26T



Foto: Škoda Transportation a.s.

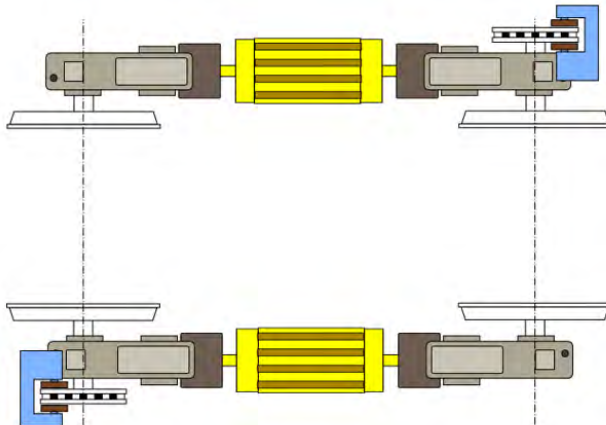
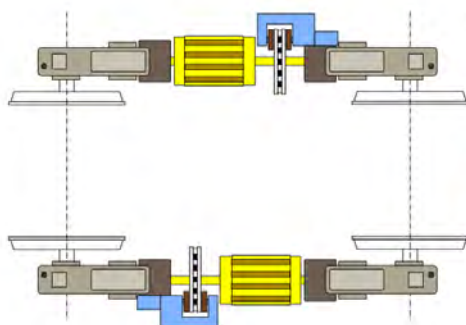


Abbildung 5.11: Außenliegende Längsantriebe - Variante 2

Beispiel: ALSTOM Citadis 302 C (mit Corège-Fahrwerken)



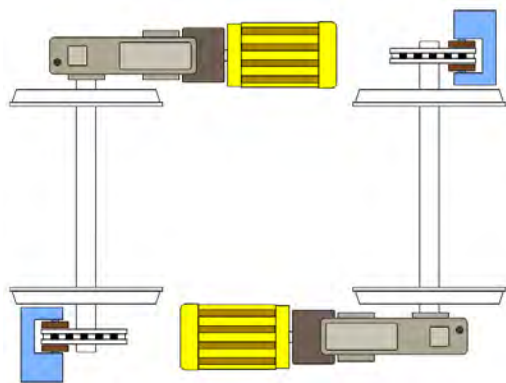
Foto: wikipedia (Maurits90)



Beispiele: Siemens Combino, Siemens Avenio



Abbildung 5.12: Außenliegende Längsantriebe - Variante 3



Beispiele:

ALSTOM Citadis X05 (Ixégo-Fahrwerke)

Bombardier Flexity-2
(FLEXX-Urban-3000 - Fahrwerke)

Vossloh Tramlink

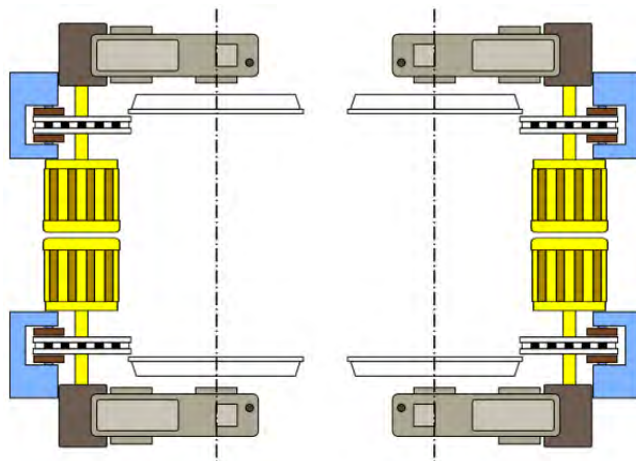
Caf Urbos

Transtech Artic Tram

Pesa Twist



Abbildung 5.13: Außenliegende Längsantriebe - Variante 4

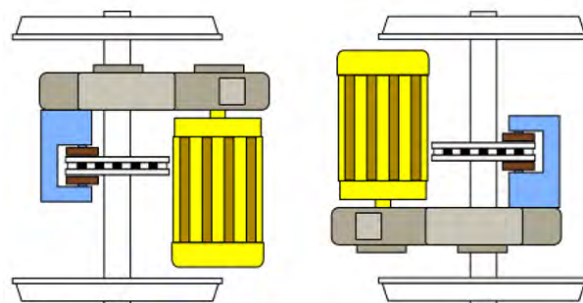


Beispiel: DUEWAG MGT6D



Foto: Alf van Beem

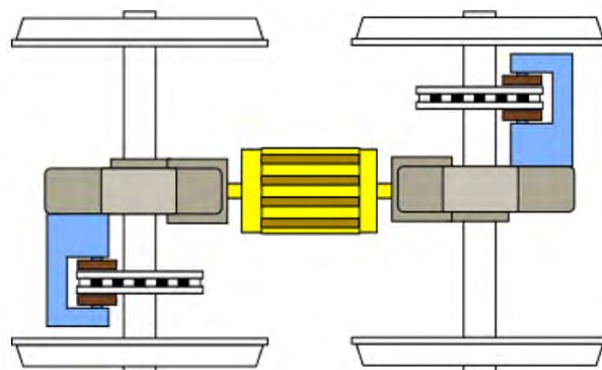
Abbildung 5.14: Innenliegende Querantriebe - Variante 1



**Beispiele: ALSTOM Regio Citadis,
Bombardier Flexity Swift**



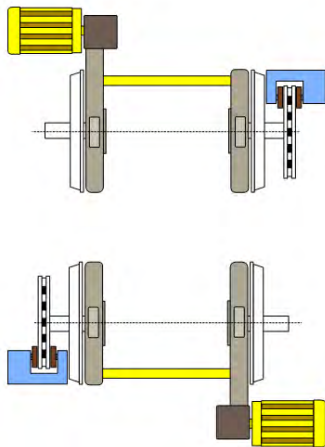
Abbildung 5.15: Innenliegende Querantriebe - Variante 2



Beispiel: Stadtbahnwagen, Typ M



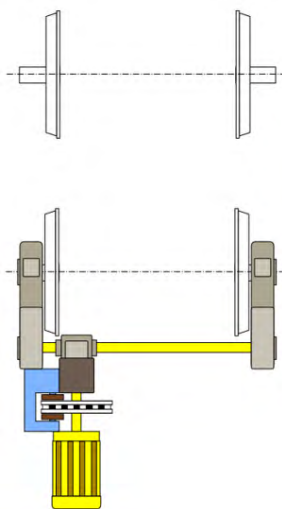
Abbildung 5.16: Innenliegender Längsantrieb



Beispiele: Alstom Citadis (1.-3. Generation)
301/401, 302/402 und 403 (Arpège-Fahrwerke)



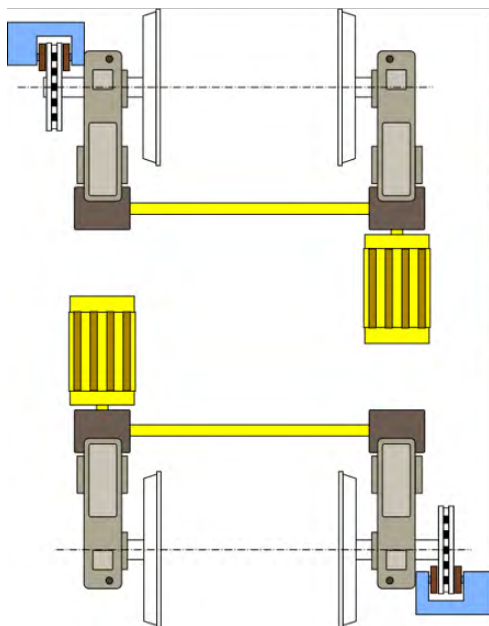
Abbildung 5.17: Fahrwerke mit gekoppelten Rädern - Variante 1



Beispiel: AEG/MAN GTx N/M/S



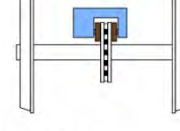
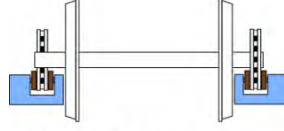
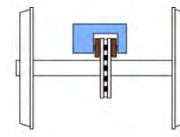
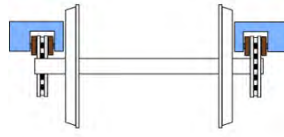
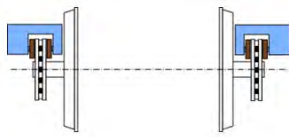
Abbildung 5.18: Fahrwerke mit gekoppelten Rädern - Variante 2



Beispiel: Ansaldo Breda Sirio



Abbildung 5.19: Fahrwerke mit gekoppelten Rädern - Variante 3



Beispiel:

Bombardier Flexity Classic

Beispiele:

Alstom Citadis X05
(Ixège-Lauffahrwerke)

Beispiel:

Bombardier Flexity Swift



Abbildung 5.20: Verschiedene Varianten für die Integration mechanischer Rad(satz)bremsen in Lauffahrwerke

5.5 Elektropneumatische Bremsen

Elektropneumatische Bremsen kommen auf Straßenbahnfahrzeugen aufgrund ihres vergleichsweise großen Platzbedarfes eher selten zur Anwendung, da die angestrebte Niederflrigkeit der Fahrzeuge nur wenig Bauraum für die Antriebs- und Bremsausrüstung der Fahrwerke zulässt.

Bei S- und U-Bahn-Fahrzeugen sowie Mittel- oder Hochflur-Stadtbahn-Fahrzeugen steht der fehlende Einbauraum etwas weniger stark im Vordergrund, weshalb elektropneumatische Bremsen bei den genannten Fahrzeugkategorien sehr stark verbreitet sind.

Die Bremsen ähneln hinsichtlich ihres prinzipiellen Aufbaus den aus Vollbahn-Fahrzeugen bekannten ep-Bremsen. Sie müssen bei solchen Fahrzeugen, die potentiell auf dem gesamten Schienennetz verkehren können⁹, ggf. UIC-konform sein.

Der genaue Aufbau von Druckluftbremsen wird an anderer Stelle behandelt¹⁰ und soll hier deshalb nicht weiter thematisiert werden. Vielmehr werden im Folgenden kurz und bündig die grundlegenden Vor- und Nachteile elektropneumatischer Bremsen im Rahmen ihres Einsatzes auf Fahrzeugen des SPNV einander gegenübergestellt, um eine Einordnung dieser Bremsbauart in den Gesamtkontext zu ermöglichen.

⁹Hier sind vor allem S-Bahnen und Stadtbahnfahrzeuge mit BOStrab/EBO-Zulassung gemeint.

¹⁰siehe Lehrveranstaltungen „Bremsen der Schienenfahrzeuge“ und „Bremsen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs“



(a) Stadtbahnwagen GT8-100C/2S



(b) U-Bahn-Zug Typ B der MVG

Abbildung 5.21: Beispielfahrzeuge mit ep-Bremsausrüstung

Zu den Faktoren, die den Einsatz von Druckluftbremsen im SPNV attraktiv erscheinen lassen, gehören:

- + die Nutzung eines günstigen Arbeitsmediums (Luft ist stets verfügbar),
- + Einsatz bewährter Technik/Technologien, deren Zuverlässigkeit und Betriebsverhalten aus dem Vollbahn-Bereich hinlänglich bekannt sind,
- + die Umweltfreundlichkeit (Hydrauliköl ist ein Umweltgift und kann Wasser und Böden kontaminieren)¹¹,
- + die Ausnutzung von Synergieeffekten, falls ohnehin Druckluft für die Sandstreuungrichtung, die Spurkranzschmierung, die Türen oder das Typhon erzeugt werden muss.

Dem stehen bedeutende Nachteile gegenüber, zu denen die folgenden Punkte zählen:

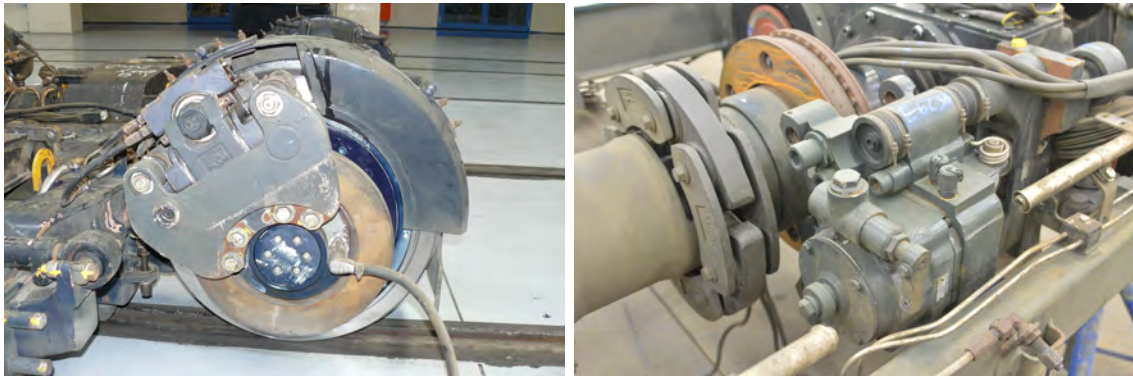
- ein relativ großer Bauraumbedarf, da die wesentlichen Baugruppen(Zylinder, Ventile und Übersetzungselemente) durch das im Vergleich zur Hydraulik niedrigere Druckniveau größere Abmessungen aufweisen,
- die Notwendigkeit der Luftaufbereitung (Verdichtung, Trocknung, Reinigung, Speicherung) und die damit verbundenen Anlagenkosten (Beschaffung, Instandhaltung) sowie der vergleichsweise hohe Bauraumbedarf dieser Ausrüstung und nicht zuletzt die durch die Luftverdichter eingebrachten Schwingungen und Geräuschemissionen,
- die vergleichsweise hohe Masse der Druckluftausrüstung sowie
- das vergleichsweise träge Zeitverhalten (Ansprech-, Schwell-, Aufbauzeit) auch bei elektrischer/elektronischer Ansteuerung (bedingt durch die Kompressibilität des Arbeitsmediums Luft).

¹¹Das bedeutet nicht, dass die Pneumatikausrüstung in jeglicher Hinsicht unbedenklich ist. So kann das Kondensat, das bei der Druckluftaufbereitung entsteht, ebenfalls Schadstoffe enthalten. Es muss deshalb sicher und vollständig aufgefangen und einer fachgerechten Entsorgung zugeführt werden.

5.6 Elektrohydraulische Bremse

5.6.1 Systemeigenschaften

Elektrohydraulische Bremsen stammen ursprünglich aus dem Nutzfahrzeugbau und wurden für Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge adaptiert, als die niederflurige Ausführung dieser Fahrzeuge zum Standard wurde. Da diese Art der Bremsausrüstung für Schienenfahrzeuge im Allgemeinen eher unüblich ist, wird der Darstellung elektrohydraulischer Bremsen in diesem Abschnitt etwas mehr Platz eingeräumt.



(a) Elektrohydraulische Bremse an einem Lauf- fahrwerk (b) Elektrohydraulische Bremse an einem Trieb- fahrwerk

Abbildung 5.22: Elektrohydraulische Bremsaktuatoren

Die prinzipiellen System**vorteile** elektrohydraulischer Bremsen können wie folgt zusammengefasst werden:

- + kurze Ansprechzeiten (wegen der Inkompressibilität des Öls),
- + kleine Abmessungen der Bremskrafterzeuger durch die Applikation hoher statischer Drücke,
- + Ermöglichung der Niederflrigkeit durch die Zusammenfassung von Komponenten in kleinen und kompakten Einheiten,
- + Implementierung einfacher Notlöseeinrichtungen möglich,
- + preisgünstig durch Übernahme von Komponenten aus dem Nutzfahrzeugbau.

Dem stehen folgende **Nachteile** gegenüber:

- eine Informationsübertragung mittels Hydrauliköl ist nicht ohne weiteres möglich (wg. dessen Inkompressibilität) - es werden immer parallel elektrische Steuersignale und -leitungen eingesetzt (Trennung von Signal- und Energiefluss),
- diese Bremsbauart erfordert ein zusätzliches Arbeitsmedium (Öl) auf dem Fahrzeug, das oft nur von der Bremse genutzt wird,
- die Verlegung der Druckleitungen kann sehr aufwendig sein,
- es existieren hohe Anforderungen an die Dichtheit des Systems wegen etwaiger Umwelt- folgeschäden beim Entweichen von Hydrauliköl,

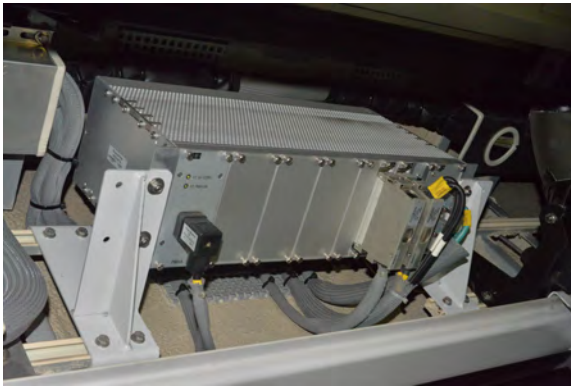
- die Alterung des Öls macht einen Öl- und Filterwechsel ca. alle 10.000 - 12.000 Betriebsstunden erforderlich,
- der Alterungszustand des Öls kann nur mit hohem Aufwand (chemische Analyse) genau bestimmt werden,
- der Instandhaltungsaufwand für die Steuerungselemente (Ventile) ist vergleichsweise hoch (teures und aufwändiges Spülen des Systems, um Reinheitskriterien einzuhalten),
- es entsteht zusätzlicher Instandhaltungsaufwand durch Dichtheits- und Druckbehälter-Kontrollen,
- die Anforderungen an die Reinheit des Öls sind oft extrem hoch (kostenintensiv, höchste Sauberkeits-Anforderungen an die Werkstatt- Umgebung, damit die Reinheitsklasse des Öls dauerhaft garantiert werden kann),
- Notwendigkeit des Einsatzes speziell ausgebildeter Mitarbeiter (Umgang mit und Prüfung von Druckbehältern, Montage von Verschraubungen u.a.),
- erhöhte Anforderungen an den Arbeitsschutz aufgrund des hohen Systemdruckes sowie im Falle von Undichtigkeiten.

5.6.2 Systemaufbau

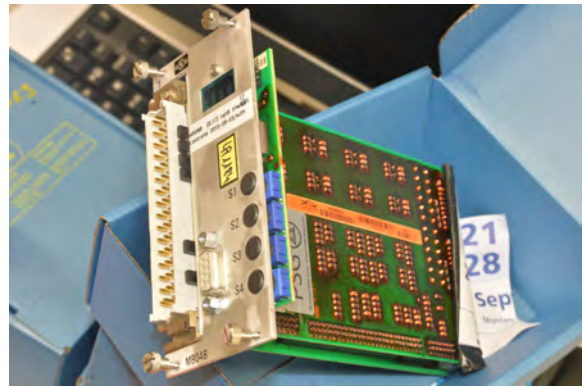
Prinzipiell besteht ein elektrohydraulisches Bremssystem aus den folgenden Baugruppen:

- Bremssteuerung
- Komponenten zur Druckerzeugung und -speicherung
- Komponenten zur Drucksteuerung
- Bremsaktuatoren und Reibbeläge
- Hilfslöseeinrichtung

Die Abbildungen 5.23a bis 5.23f zeigen Beispiele für die praktische Ausführung der genannten Baugruppen.



(a) Bremssteuerung



(b) Platine einer Bremssteuerung



(c) Federspeicherbremszange



(d) Reibbeläge



(e) Hydrogerät



(f) Notlösezug

Abbildung 5.23: Elemente elektrohydraulischer Bremssysteme

Die hydraulische Ausrüstung kann auf dem Fahrzeug sehr flexibel angeordnet werden. Die genaue Ausführung orientiert sich an den konkreten Platzverhältnissen sowie an der Frage, wie hoch die Verfügbarkeit der hydraulischen Bremsanlage sein soll. Grundsätzlich lassen sich vier Arten der **Anordnung hydraulischer Kreisläufe** auf Straßen- und Stadtbahnen unterscheiden:

1. die Zentralhydraulik,
2. die verteilte Hydraulik,
3. die Fahrwerkshydraulik und
4. die Nutzung intelligenter Aktoren.

Die Unterschiede zwischen den genannten Varianten werden mit Hilfe der Abbildung 5.24 deutlich.

Bei der Wahl einer **Zentralhydraulik** muss nur ein Hydrogerät für das gesamte Fahrzeug vorgesehen werden, was hinsichtlich der Anschaffung sowie der Unterhaltung dieser Baugruppe ein finanzieller Vorteil sein kann. Dieser wird allerdings damit erkaufte, dass auf Redundanz verzichtet wird und im Falle eines Defektes die *gesamte* elektrohydraulische Bremse ausfällt. Eine fahrwerks-selektive Regelung der Bremskraft ist nicht möglich. Zudem ist die Verlegung der Hydraulikleitungen aufwendig und im Bereich der Fahrzeuggelenke auch nicht unproblematisch (Elastizität vs. Dichtheit). Lange Leitungen haben zudem den Nachteil, dass sie bei einer Druckbeaufschlagung wie eine hydraulische Feder wirken und damit die Ansprechzeit sowie den Wirkungsgrad des gesamten Systems negativ beeinflussen. Eine solche Konfiguration wird deshalb aus den genannten Gründen nur äußerst selten gewählt.

Die **verteilte Hydraulik** ist hingegen etwas weiter verbreitet und stellt hinsichtlich der Kosten, der Regelbarkeit und der Redundanz einen Kompromiss zwischen Zentral- und Fahrwerkshydraulik dar.

Die **Fahrwerkshydraulik** ist die im Vergleich am häufigsten angewandte Lösung. Dies liegt einerseits in der Tatsache begründet, dass Straßen- und Stadtbahnen häufig unterschiedliche Fahrwerkstypen aufweisen (Lauf- vs. Triebfahrwerke) und sich aufgrund der (in bestimmten Grenzen) ungleichmäßigen Verteilung der Fahrzeugmasse sowie der Kraftschlussvorbeanspruchung (z.B. durch die elektrodynamische Bremse) die Notwendigkeit ergibt, die Bremskräfte der elektrohydraulischen Bremse fahrwerks-selektiv zu regeln. Andererseits wird mit dieser Konfiguration der hydraulischen Ausrüstung eine hohe Redundanz erreicht, sodass ein Teilausfall der elektrohydraulischen Bremse nicht zwangsläufig zur Stilllegung des Fahrzeuges führen muss. Die bei der Zentralhydraulik genannten Nachteile (große Leitungslänge, potentielle Dichtheitsprobleme an Gelenken und die ggf. verlängerte Ansprechzeit) können hier in ihr Gegenteil verkehrt und als weitere Vorteile der Fahrwerkshydraulik aufgeführt werden.

Sogenannte **Intelligente Aktoren**¹² stellen die Bauform der elektrohydraulischen Bremse mit dem höchsten Grad der Integration dar. Die Bremsaktuatoren sind zwar größer als bei den vorstehend diskutierten Hydraulikkonfigurationen, enthalten dafür aber bereits alle wesentlichen Komponenten (Tank, Motor, Pumpe, Filter, Ventile), die sonst im Hydrogerät verbaut sind, sodass sie jeweils ein in sich geschlossenes hydraulisches System darstellen, das lediglich über eine elektrische Schnittstelle zum Fahrzeug verfügt.

¹²Die Begriffe „Aktor“ und „Aktuator“ haben lt. Duden dieselbe Bedeutung und werden deshalb im Rahmen dieses Skriptes synonymisch verwendet.

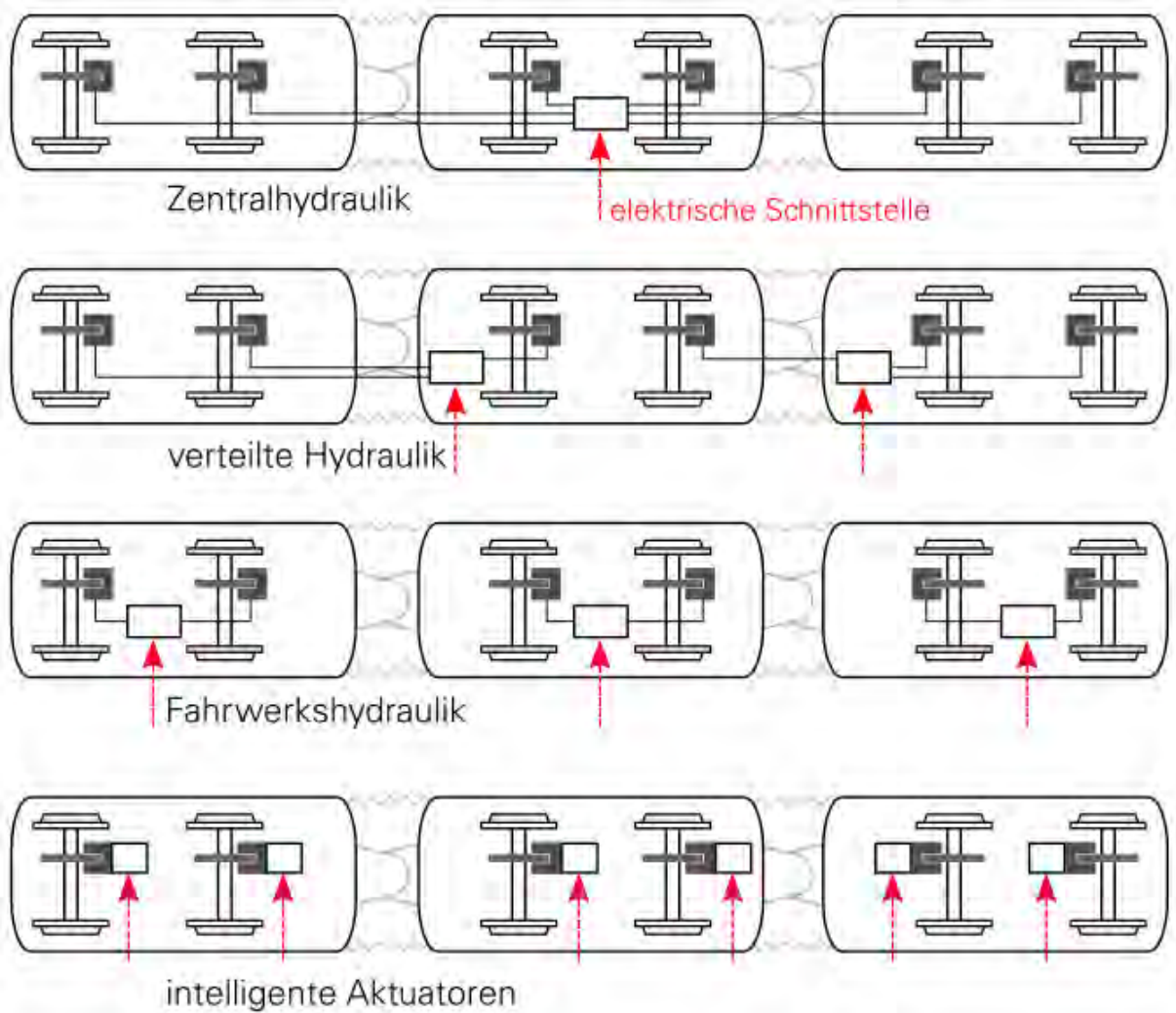


Abbildung 5.24: Mögliche Konfigurationen der hydraulischen Ausrüstung auf Straßen- und Stadtbahnen (in Anlehnung an [4])

5.6.3 Aktiv- vs. Passivbremse

Mechanische Rad(satz)bremsten können als „aktive“ oder als „passive“ Bremse ausgeführt werden¹³. Der Unterschied zwischen beiden Bremsbauarten ist in der Art der Bremskrafterzeugung zu suchen.

Bei **Aktivbremsen** wird die Anpresskraft der Bremsbeläge an die Bremsscheibe durch die Applikation des Öldruckes erzeugt. Das heißt, es muss ein Ölstrom vom Hydrogerät zum Bremsaktuator erzeugt werden, um eine Bremsung einzuleiten. Schwindet der Öldruck, lässt die Bremskraft entsprechend nach.

Bei einer **passiven Bremse** wird die Spannkraft des Bremssattels durch eine (vorgespannte) mechanische Feder erzeugt, sodass die Bremse stets angelegt ist, solange keine externe Energie zugeführt wird. Hier bewirkt ein Ölstrom vom Hydrogerät zum Bremsaktuator ein *Lösen* der Bremse.

Passivbremsen werden von der BOStrab explizit gefordert, da gemäß § 36 Abs. 5 eine „nach dem Federspeicherprinzip“ wirkende Bremse das Fahrzeug im Stillstand unter den dort definierten Randbedingungen gegen Abrollen sichern muss (siehe Kapitel 2.2.2).

Gleichwohl ist man stets bestrebt, die Anzahl der Passivbremsen pro Fahrzeug auf das erforderliche Minimum zu reduzieren, da Aktivbremsen im Vergleich leichter und preiswerter sind. Abbildung 5.25 illustriert die getroffenen Aussagen und zeigt überdies, dass bei Passiv-Bremsen zwei Untervarianten gebräuchlich sind - die „drückende“ und die „ziehende“ Ausführung. Dies bezieht sich auf die Krafrichtung am Kolben beim Bremsen und damit auf die Anordnung der Kolbenstange, die beim Bremsen entweder auf Druck oder auf Zug beansprucht werden kann. Die Bremskraft selbst kann in Abhängigkeit der Ausführung des Hydrogerätes (zwei)stufig oder stufenlos aufgebracht werden (siehe auch Abschnitt 5.6.4). Passivbremsen werden häufig zwei-stufig ausgeführt, weil sie lediglich der Ablösung der elektrodynamischen Bremse bei kleinen Geschwindigkeiten (siehe Kapitel 5.2) sowie als Parkbremse dienen.

Aktivbremsen werden demgegenüber meistens stufenlos angesteuert, weil sie im Falle einer Gefahrbremsung die übrigen Bremsen bestmöglich unterstützen und das Verzögerungsvermögen der Fahrzeuge erhöhen sollen.

¹³Die in diesem Unterabschnitt aufgeführten Sachverhalte treffen sinngemäß auch auf elektropneumatische und elektromechanische Bremsen zu.

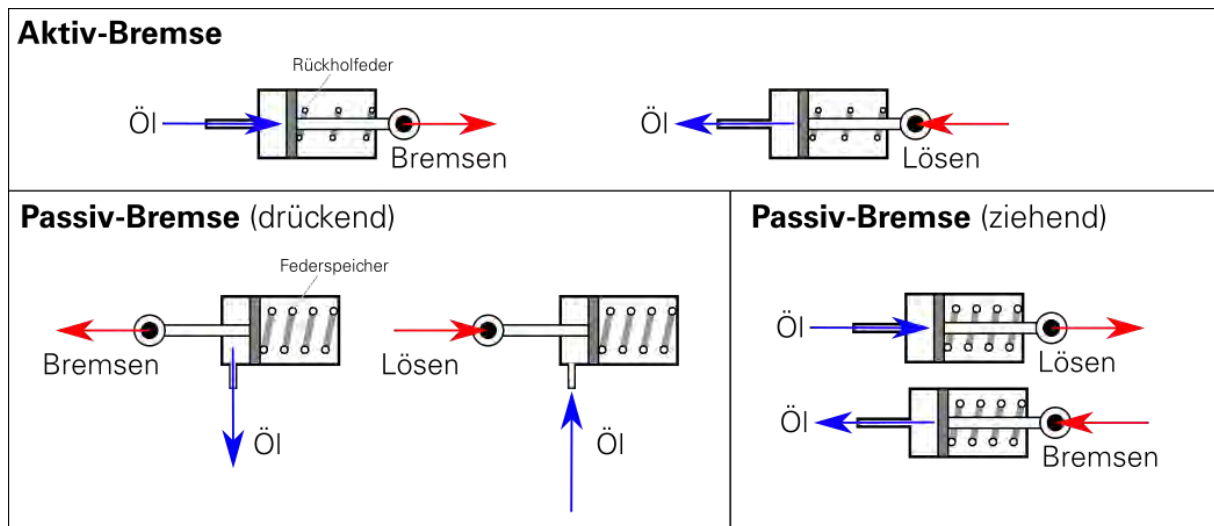


Abbildung 5.25: Abgrenzung von Aktiv- und Passivbremse

5.6.4 Hydrogeräte

Wie sich bereits aus den Ausführungen in Kapitel 5.6.2 ergibt, sind Hydrogeräte ein zentraler Bestandteil der elektrohydraulischen Bremse. Sie dienen im Wesentlichen der Bereitstellung des Arbeitsmediums, der Druckerzeugung sowie der Steuerung der Ölföhrungen zu und aus den Aktoren.

Die Geräte erscheinen dem ungeschulten Auge zunächst als kompakte „Kisten“, die über hydraulische und elektrische Anschlüsse verfügen (siehe Abbildung 5.26a). Aber selbst in geöffnetem Zustand (Abbildung 5.26b) eröffnet sich der Aufbau und die Funktionsweise nur sehr bedingt. Aufschlussreicher sind daher hydraulische Schemata, die Auskunft über den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise dieser Baugruppen geben.

Wie aus Abbildung 5.27 hervorgeht, lassen sich Hydrogeräte klassischerweise in eine Versorgung- und eine Steuereinheit unterteilen.

Die **Versorgungseinheit** beinhaltet eine elektrisch angetriebene Ölpumpe, die das Öl gegen ein Rückschlagventil aus dem Tank über einen Filter in einen Hydrospeicher oder direkt in den Steuerteil des Hydrogerätes fördert.

Die Hydrospeicher sind in der Regel als Membranspeicher ausgeführt, bei denen die Kompressibilität eines Speichergases (z.B. Stickstoff) ausgenutzt wird, um den erforderlichen Arbeitsdruck zu erzeugen. Der Speicher dient allgemein als „Puffer“ zwischen Ölpumpe und Bremsaktuator, der dafür sorgt, dass die Pumpe nur anlaufen muss, wenn der Speicherdruck unter einen Mindestwert sinkt. Würde bei jedem Bremsvorgang ein Einschalten der Pumpe nötig sein, ergäbe sich ggf. ein Betriebsregime, dass einer langen Lebensdauer von Pumpe und Elektromotor abträglich wäre.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der die Nutzung eines Hydrospeichers unumgänglich macht, ist der Wunsch nach einem Gleitschutz für die mechanisch abgebremsten Räder. Bei einem Ansprechen des Gleitschutzes erfolgt ein wiederholtes Anlegen und Lösen der Bremsen in sehr kurzen Zeitintervallen. Würden die dafür benötigten Ölströme jeweils mittels der elektrischen Pumpe direkt erzeugt werden, wäre das System bei Weitem zu träge für eine brauchbare Gleitschutzregelung.



(a) Hydrogerät an einem Triebfahrzeug



(b) Geöffnetes Hydrogerät (Werkstatt)

Abbildung 5.26: Hydrogerät für ein Straßenbahnfahrzeug

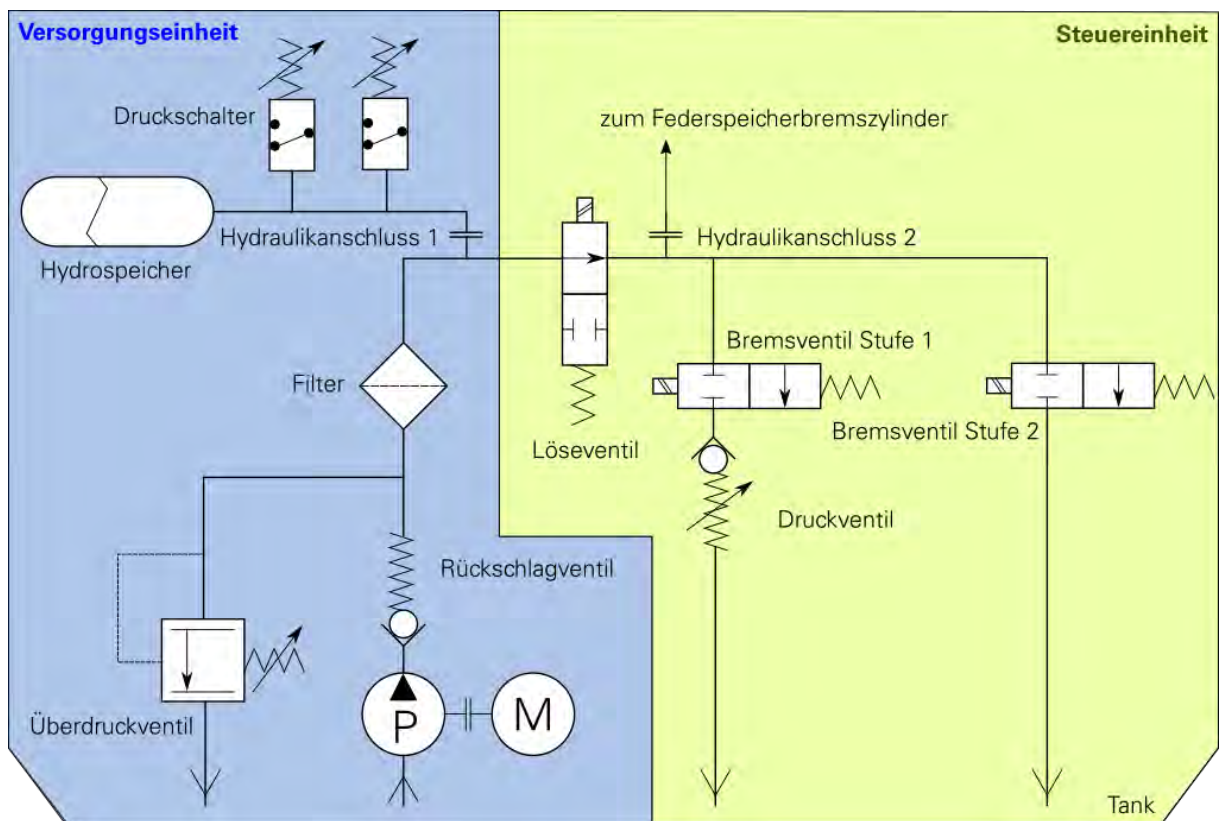


Abbildung 5.27: Prinzipieller Aufbau eines Hydrogerätes

Die Ausgestaltung der **Steuereinheit** ist abhängig davon, ob es sich um eine (zwei-)gestufte (Abbildungen 5.28-5.30) oder stufenlose (Abbildungen 5.31 und 5.32) elektrohydraulische Bremse handelt.

Bei den zweistufigen Ausführungen arbeiten Brems- und Löseventile binär, das heißt, sie werden elektrisch zwischen den Stellungen „Öffnen“ und „Sperren“ umgeschaltet. Der Bremsdruck für die erste Bremsstufe lässt sich über ein entsprechendes Druckregelventil und/oder Drosselventile an die Erfordernisse der jeweiligen Fahrzeugbaureihe anpassen, während die zweite Bremsstufe die Bereitstellung der maximalen Spannkraft an den Aktuatoren ermöglicht.

Stufenlose Hydrogeräte verfügen über spannungsproportionale Ventile, wodurch eine Bremsdruckregelung in Abhängigkeit eines analogen Spannungssignals (erzeugt vom Bremssteuergesetz) ermöglicht wird. Wie aus den Abbildungen 5.31 und 5.32 hervorgeht, ist die Anordnung von Brems- und Löseventil im hydraulischen Kreislauf davon abhängig, ob es sich um eine Aktiv- oder eine Passivbremse handelt.

Nicht immer ist der Energiespeicher in dem Hydrogerät integriert, sondern es existieren auch Ausführungen, bei denen der Hydrospeicher an einem anderen Einbauort untergebracht ist. Eine solche Lösung kann in den Fällen günstig sein, in denen das Hydrauliköl auch für andere Komponenten (etwa eine hydropneumatische Federung) benötigt wird oder wenn nicht genügend Bauraum vorhanden ist.

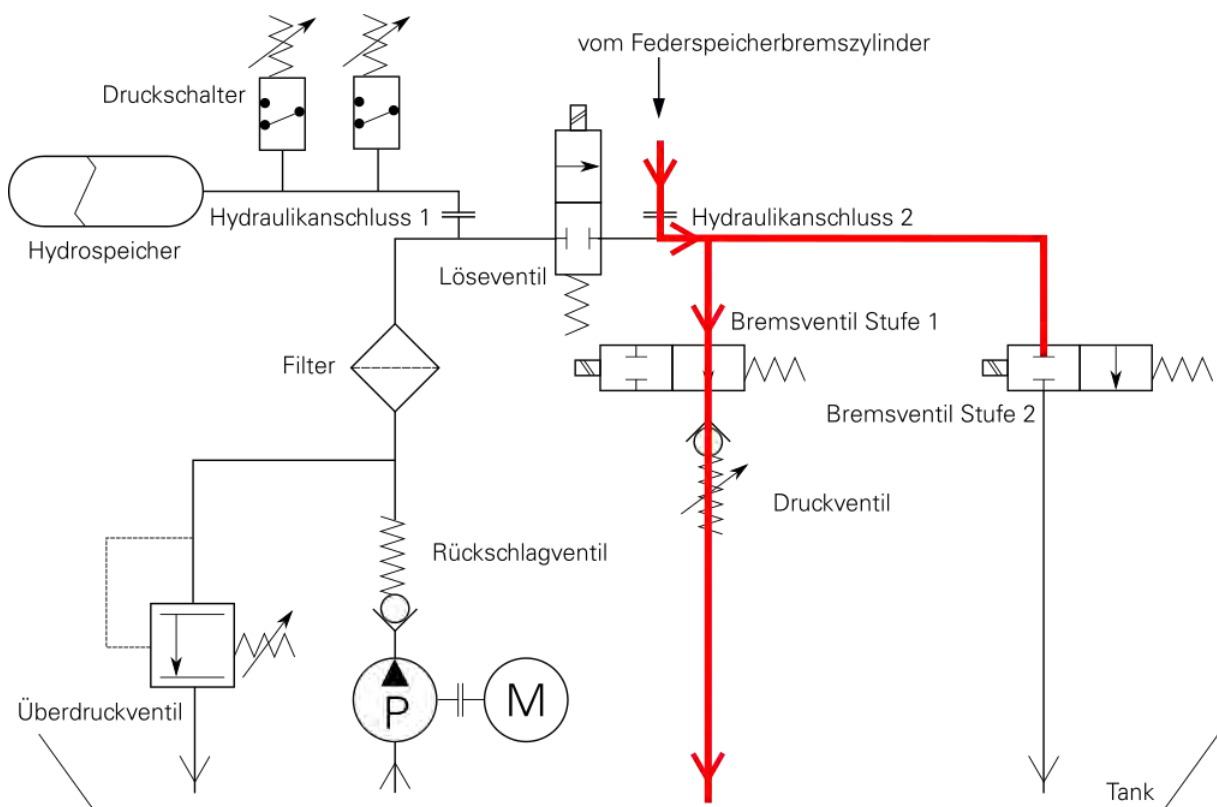


Abbildung 5.28: Zweistufiges Hydrogerät für Passivbremsen in Bremsstellung (Bremsstufe 1)

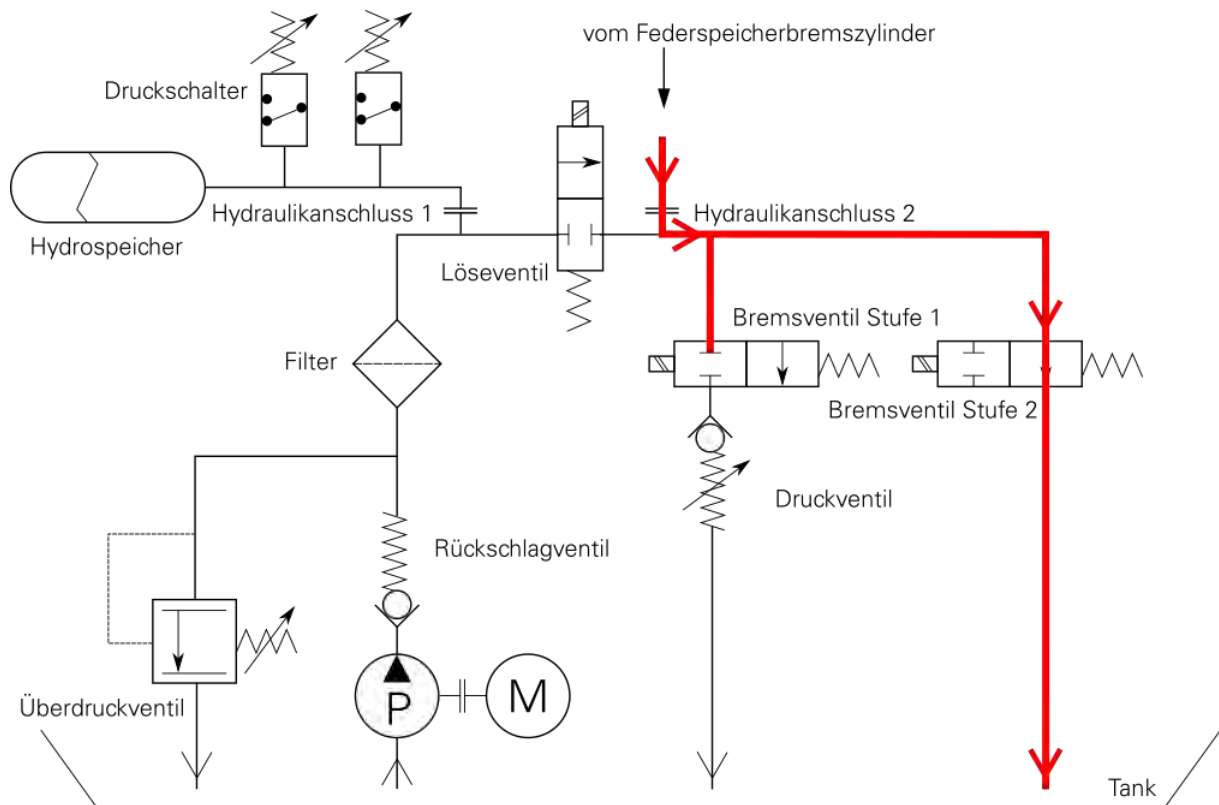


Abbildung 5.29: Zweistufiges Hydrogerät für Passivbremsen in Bremsstellung (Bremsstufe 2)

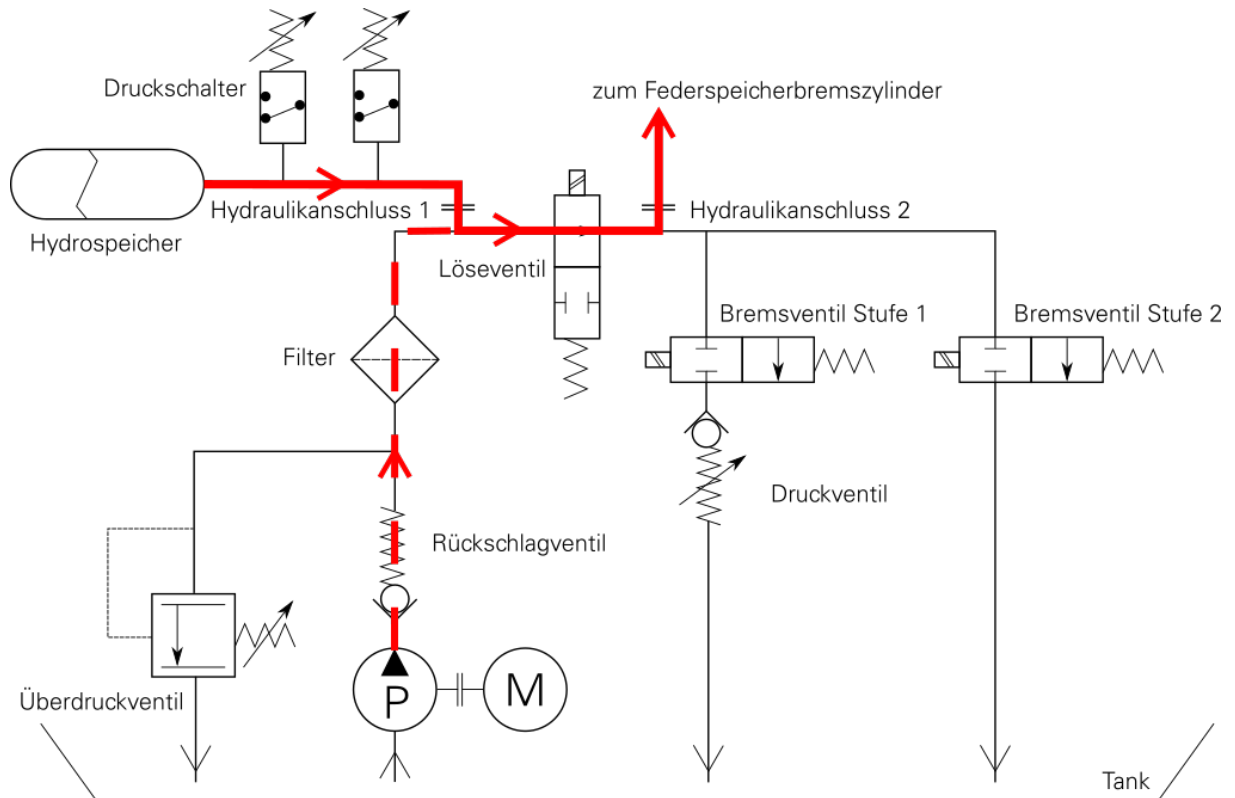


Abbildung 5.30: Zweistufiges Hydrogerät für eine Passivbremse in Lösestellung

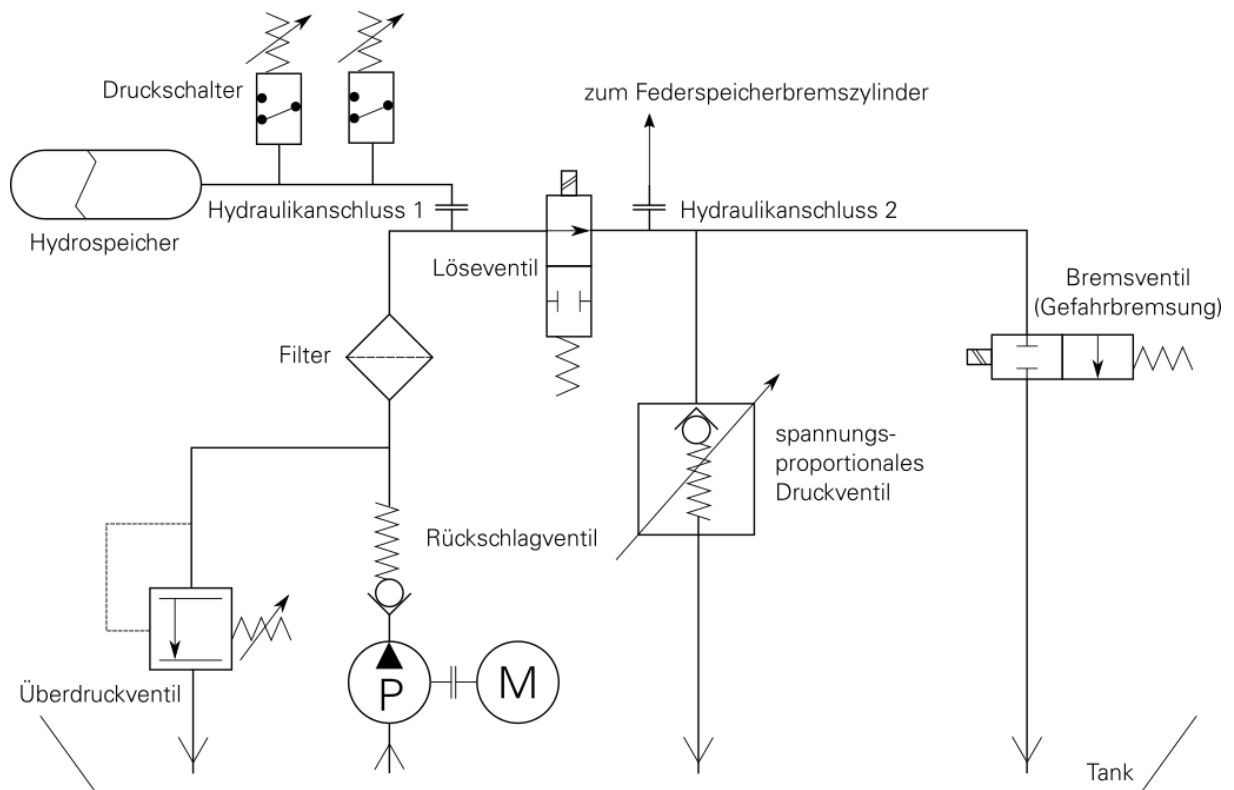


Abbildung 5.31: Stufenloses Hydrogerät für Passivbremsen

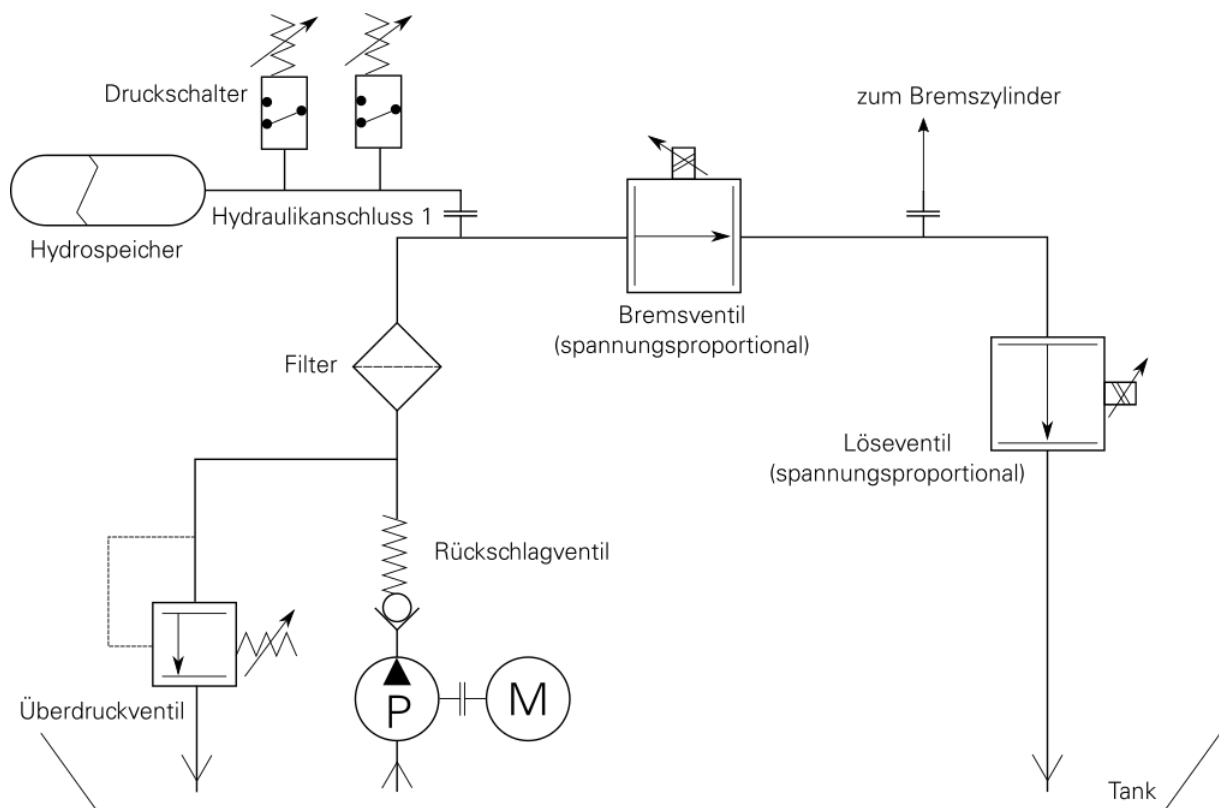


Abbildung 5.32: Stufenloses Hydrogerät für Aktivbremsen

5.7 Elektromechanische Bremsen

Bei elektromechanischen Bremsen wird die Spannkraft der Scheibenbremse auf elektrischem Wege erzeugt. Dies kann entweder über Spulen oder elektromotorisch erfolgen, erfordert aber in jedem Fall weitere mechanische Baugruppen mit einem im Vergleich zu hydraulischen Bremsen größeren Bauraumbedarf.

Bei älteren Straßenbahnen waren elektromechanische Bremsen meist als Solenoidbremsen¹⁴ ausgeführt, bei denen mit Hilfe zylindrischer Spulen Zug- oder Druckkräfte erzeugt wurden. Die elektrisch erzeugten Kräfte wurden entweder zum Betätigen/Lösen von Außenbackentrommelbremsen (z.B. Tatra Triebwagen T3/T4) oder Scheibenbremsen (z.B. Tatra Beiwagen B4) verwendet.

Moderne elektromechanische Bremsen (siehe z.B. [2]) sind als Scheibenbremsen ausgeführt und bestehen aus einem elektrischen Stellmotor mit nachgeschaltetem linearen Stellantrieb (Kugelgewindetrieb oder Exzenterwelle) und ggf. weiteren Untersetzungselementen.

Die **Hauptmotivation** für den Einsatz elektromechanischer Bremsen besteht in der **Möglichkeit, rein elektrische Fahrzeuge zu bauen**, bei denen auf zusätzliche wartungs- und kostenintensive hydraulische Baugruppen komplett verzichtet werden kann.



Abbildung 5.33: Federspeicher-Solenoid-Bremse an einem Tatra T4 Straßenbahn-Triebwagen

¹⁴das Solenoid = zylindrische Metallspule (von griech. „solenoid“ = rinnen- oder röhrenförmig)

Die potentiellen **Vorteile** elektromechanischer Bremsen werden im Folgenden zusammengefasst:

- + Elektromechanische Aktuatoren lassen sich mit kompakten Baugruppen realisieren, die sich mit überschaubarem Aufwand ein- und ausbauen lassen.
- + Die Wartungs- und Instandhaltungskosten werden vergleichsweise gering angesetzt.
- + Im Gegensatz zu pneumatischen oder hydraulischen Bremsen können keine Leckagen auftreten.
- + Die Notwendigkeit einer Medienentsorgung (Öl, Kondensat) entfällt.
- + Da weder Luft noch Öl und Kondensat in die Krafterzeugung involviert sind, ist die Gefahr des Einfrierens oder Vereisens der Aktoren im Winter sehr gering.
- + Bei elektromechanischen Aktuatoren kann eine hohe Verfügbarkeit angenommen werden.
- + Die zur Erzeugung der Spannkraft benötigte Energie ist im Vergleich zu pneumatischen oder hydraulischen Bremsen geringer.

Dem stehen die nachstehend aufgeführten **Nachteile** gegenüber:

- Die Aktoren weisen trotz kompakter Bauweise ein vergleichsweise großes Bauvolumen auf (besonders im Vergleich zu elektrohydraulischen Bremsen). Sie sind deshalb für Fahrzeuge mit hohem Niederfluranteil kaum geeignet.
- Elektromechanische Bremsen weisen höhere Anschaffungskosten als elektrohydraulische Bremsen auf [4].
- Die Mechanik elektromechanischer Aktoren kann sehr komplex sein wodurch sich eine vergleichsweise lange Wirkungsgradkette (und damit potentiell geringere Energieeffizienz) zwischen Kraft-/Drehmomenterzeugung und Spannkraft ergeben kann¹⁵.

Trotz aller Vorteile konnten sich elektromechanische Bremsen bisher bei Fahrzeugen des SPNV nicht flächendeckend durchsetzen. Da bei Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen heute die Niederflrigkeit zu den Kernforderungen gehört, ist der Bauraum für die Antriebs- und Bremsausrüstung in den Fahrwerken sehr begrenzt und kann oftmals am besten durch elektrohydraulische Bremssysteme ausgenutzt werden.

5.8 Bremsbeläge

Für die richtige Auslegung mechanischer Rad(satz)bremsen ist die Kenntnis des Reibverhaltens der vorgesehenen Bremsbeläge von essentieller Bedeutung.

Das Niveau und der Verlauf der Gleitreibungsbeiwerte zwischen Bremsbelag und Bremsscheibe über der Geschwindigkeit sowie der Haftreibungsbeiwert (bei Fahrzeugstillstand) determinieren die erforderlichen Anpresskräfte. Diese bestimmen ihrerseits die Dimension der Bremsättel und die Höhe des mechanischen Übersetzungsverhältnisses zwischen Kolben und Bremsscheibe.

Wie aus Abbildung 5.34 hervorgeht, sind die Reibwerte jedoch bei Weitem nicht konstant, sondern von mehreren Faktoren abhängig. Die wichtigsten Einflüsse sind neben der Materialpaarung die in der genannten Abbildung aufgeführten Parameter (Gleit-)Geschwindigkeit v_G , mittlere Flächenpressung des Bremsbelages p_m und Temperatur T . Weitere Beeinflussungen des

¹⁵Durch die multiplikative Verknüpfung der Wirkungsgrade kann sich auch bei hohen Einzelwirkungsgraden ein geringer Gesamtwirkungsgrad ergeben, wenn viele Komponenten involviert sind.

Reibwertverlaufes, etwa durch Nässe, sind möglich und müssen ggf. untersucht werden.

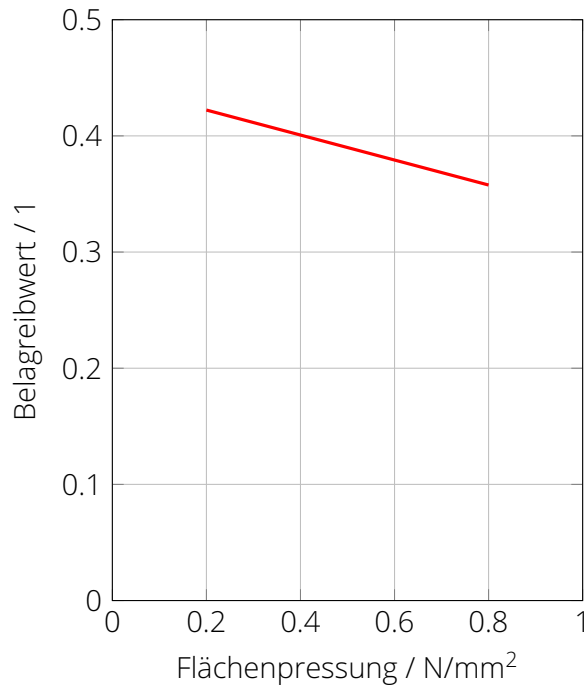
Bei der Berechnung muss den Reibwerten eine gewisse „Unschärfe“ zugestanden werden, da die von den Herstellern der Bremsbeläge gelieferten Reibwertkurven das Ergebnis zahlreicher Versuche sind und somit statistische Mittelwerte darstellen. Es ist daher sinnvoll, von einem „Reibwertband“ auszugehen und ggf. eher konservative Annahmen zu treffen.

Es ist ferner zu beachten, dass die Reibwertkurven den eingeschliffenen Zustand der Bremsbeläge repräsentieren. „Eingeschliffen“ heißt in diesem Zusammenhang der Zustand, bei dem es tatsächlich zu einer großflächigen Berührung von Bremsbelag und -scheibe kommt. Bei neuen Bremsbelägen liegt zunächst eine eher punktförmige Berührung mit der Bremsscheibe vor. Mit steigender Zahl der Bremsungen passen sich die Bremsbeläge immer besser an die Bremsscheiben und deren geometrische Abweichungen an und das sogenannte „Tragbild“ verbessert sich. Erst wenn eine großflächige Berührung erreicht wird, kann mit der Reibpaarung die angestrebte Bremswirkung erzielt werden¹⁶. Eine Gegenüberstellung des Erscheinungsbildes von neuen und eingeschliffenen Bremsbelägen enthält Abbildung 5.35.

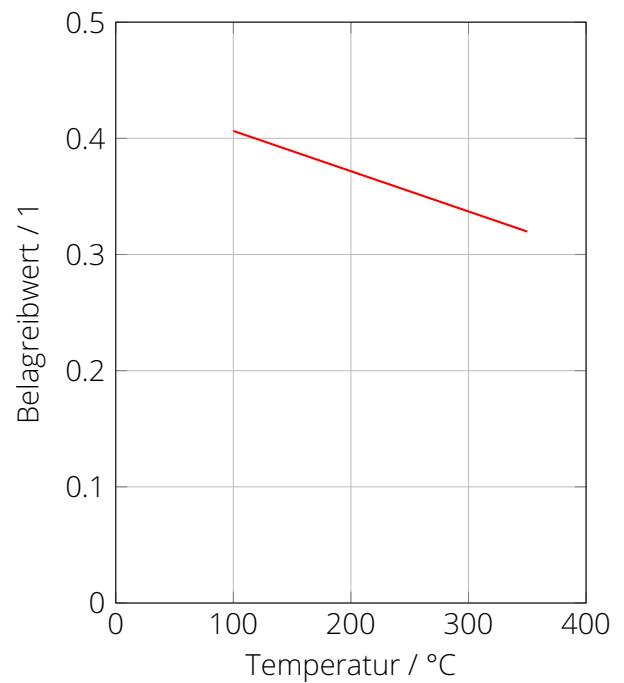
In der Praxis ist aus den genannten Gründen, insbesondere nach Revisionsarbeiten, bei denen die Bremsbeläge getauscht wurden, mit einem suboptimalen Verhalten der mechanischen Rad(-satz)bremsen zu rechnen. Dies gilt sowohl für Verzögerungsbremsungen als auch für die Sicherung der Fahrzeuge im Stillstand.

Eine Besonderheit bei Fahrzeugen des SPNV ist die Tatsache, dass Betriebsbremsungen in erster Linie durch die elektrodynamischen Bremsen realisiert werden und die mechanischen Bremsen nur bei sehr kleinen Geschwindigkeiten (und damit auch: kleinen Bremsleistungen) oder in Notfällen zum Einsatz kommen. Es ist bei Bremsen, die bei Betriebsbremsen in der Regel überhaupt nicht zum Einsatz kommen, zu beobachten, dass sich mit der Zeit eine Zwischenschicht auf den Bremsbelägen und -scheiben bildet (siehe Abb. 5.36), die das Bremsvermögen und die Geräuschentwicklung beim Bremsen ungünstig beeinflussen können. Es kann daher zweckmäßig sein, die Rad(satz)bremsen von Zeit zu Zeit mit hohen Bremsleistungen zu beaufschlagen, damit diese Schichten mechanisch abgetragen werden und es in Verbindung mit der thermischen Belastung zu einer Rekonditionierung der Reibpaarung kommt.

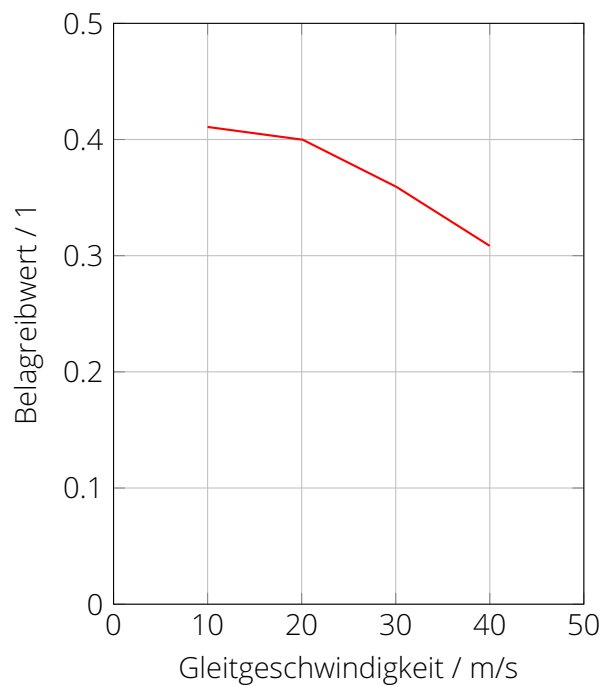
¹⁶Vor Bremsversuchen ist es deshalb auch üblich, „Einschleif-Fahrten“ durchzuführen, bei denen das häufige Ansprechen der mechanischen Bremsen bewusst provoziert wird. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „Konditionierung“ der mechanischen Bremsen.



(a) Belagreibwert als Funktion der Flächenpressung bei $v=10$ m/s und $T=100$ °C



(b) Belagreibwert als Funktion der Temperatur bei $p_m=0,4$ N/mm² und $v_G=20$ m/s



(c) Belagreibwert als Funktion der Gleitgeschwindigkeit bei $p_m=0,4$ N/mm² und $T=100$ °C

Abbildung 5.34: Beispielhafte Belagreibwertverläufe für organische Bremsbeläge



Abbildung 5.35: Gegenüberstellung von eingeschliffenen (links im Bild) und fabrikneuen Bremsbelägen für eine Straßenbahn-Scheibenbremse



Abbildung 5.36: Eingebaute Bremsscheibe in einem Straßenbahnfahrwerk. Die Bildung einer reibwertverändernden Zwischenschicht (Flugrost) ist deutlich erkennbar.

5.9 Magnetschienenbremsen

Der Einsatz von Magnetschienenbremsen ist bei Straßen- und Stadtbahnen unerlässlich, da sich auf andere Weise die in der BOStrab geforderten Bremsverzögerungen bzw. Bremswege (siehe Abschnitt 2.2.2) nicht realisieren lassen. Insbesondere bei Straßenbahnen, die nicht über einen separaten Gleiskörper verfügen, muss durch den Abrieb, der durch den motorisierten Individualverkehr auf den Schienenköpfen hinterlassen wird, sowie durch zusätzliche Verschmutzungen (z.B. Schnee oder Schneematsch) mit schwierigen Kraftschlussverhältnissen zwischen Rad und Schiene gerechnet werden.

Die Wirkungsweise der Magnetschienenbremsen ist bei Fahrzeugen des SPNV prinzipiell die gleiche wie bei Vollbahn-Fahrzeugen. Ein als „Bremsmagnet“ bezeichneter Metallkörper (aus magnetischem Stahl oder Gusseisen) wird durch die Bestromung einer elektrischen Spule so magnetisiert, dass eine Normalkraft zwischen Bremsmagnet und Schienenkopf entsteht. Im eingeschalteten Zustand der Bremse gleiten die Magnete auf den Schienenköpfen und erzeugen eine Bremskraft, die dem Produkt aus der Normalkraft und dem momentanen Gleitreibkoeffizienten zwischen Bremsmagnet (Polschuh) und Schienenkopf entspricht (siehe Gleichung 3.9).

Der Reibwert zwischen Bremsmagnet und Schienenkopf ist vor allem von der Gleitgeschwindigkeit, aber auch von der Bauart der Bremsmagnete abhängig, wie aus der Abbildung 5.37 hervorgeht.

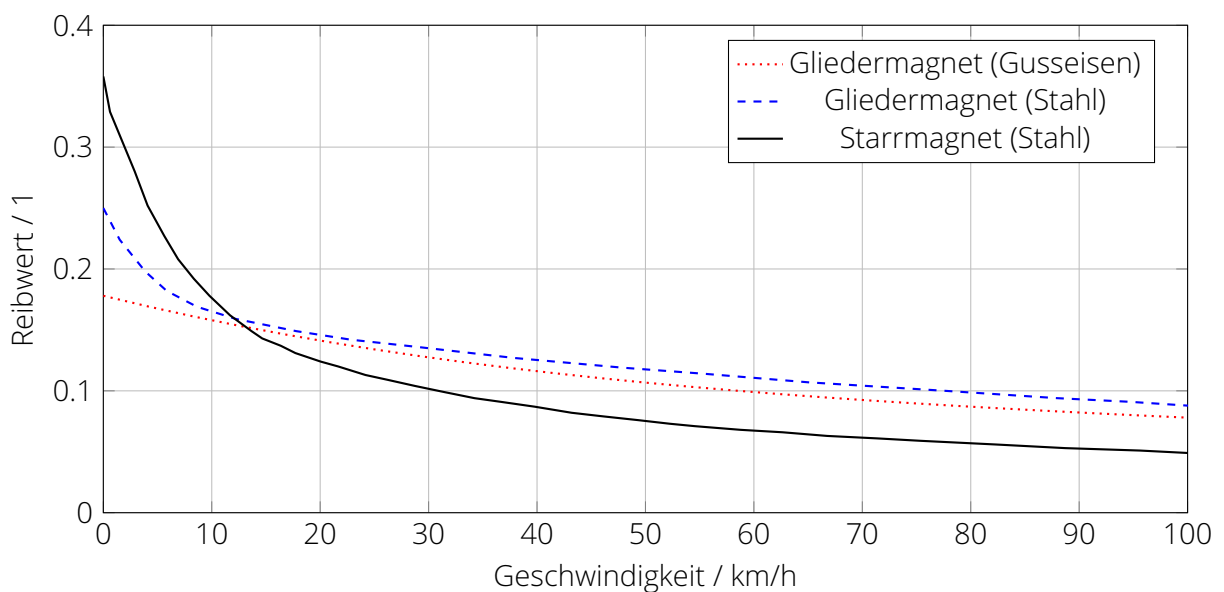
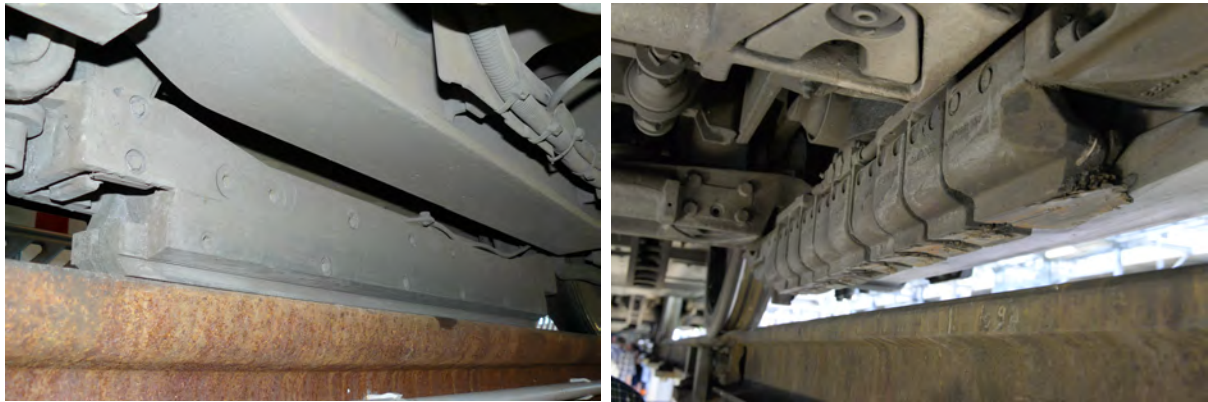


Abbildung 5.37: Verlauf der Reibwerte zwischen Magnetschienenbremse und Schienenkopf für unterschiedliche Magnetschienenbremsbauarten

Insbesondere im unteren Geschwindigkeitsbereich zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Reibwerte, sodass mit einer hohen Endverzögerung verbunden mit einem hohen Anhalteruck kurz vor dem Stillstand des Fahrzeuges gerechnet werden muss. Bei Vollbahn-Fahrzeugen werden die Magnetschienenbremsen deshalb unterhalb einer bestimmten Geschwindigkeitsschwelle (die in der Regel bei 50 km/h liegt) abgeschaltet. Bei Fahrzeugen, die der BOStrab unterliegen, ist die Magnetschienenbremse demgegenüber bis zum Fahrzeugstillstand aktiv, da einerseits der Einhaltung kurzer Bremswege eine besondere Priorität gegeben wird und andererseits davon ausgegangen wird, dass die Passagiere sich besser und schneller sicheren Halt im Fahrzeuginneren verschaffen können¹⁷.

¹⁷In Fahrzeugen des SPNV sind unzählige Griffstangen zur Eigensicherung der Fahrgäste angebracht. Dies ist in

Gibt es nun außer den Geschwindigkeitsbereichen, in denen die Magnetschienenbremsen wirksam sind, noch weitere Unterschiede zwischen Fahrzeugen des SPNV und Vollbahnfahrzeugen? Die Antwort lautet: ja. Es gibt zwei weitere wesentliche Unterschiede, wie auch aus der Abbildung 5.38 hervorgeht.



(a) Magnetschienenbremse eines Straßenbahnfahrzeuges (BOStrab) - Starrmagnet in Tiefaufhängung (b) Magnetschienenbremse eines Fahrzeuges (nach EBO) für den Fernverkehr - Gliedermagnet in Hochaufhängung

Abbildung 5.38: Verschiedene Bauarten von Magnetschienenbremsen bei Fahrzeugen nach BOStrab bzw. EBO

Fahrzeuge, die der BOStrab unterliegen, weisen Magnetschienenbremsen mit Tiefaufhängung auf. Das bedeutet, dass die Bremsmagnete 6-10 mm über Schienenoberkante (SO) hängen und dabei elastisch am Fahrwerk aufgehängt sind. Im Falle der Aktivierung werden sie automatisch auf die Schienenköpfe gezogen. Damit werden sehr kurze Reaktionszeiten (ca. 0,7 s) erreicht. Betrachtet man diesen Wert absolut, so erscheint er als sehr kurze Zeitspanne. Bedenkt man allerdings, dass ein Fahrzeug, das sich mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h vorwärts bewegt, während 0,7 s immerhin 9,7 m zurücklegt, wird deutlich, dass es bei einer Gefahrbremung tatsächlich auf jede Zehntelsekunde ankommen kann. Eine Hochaufhängung der Magnetschienenbremse, wie sie bei Vollbahnfahrzeugen praktiziert wird, kommt deshalb für Straßen- und Stadtbahnen nicht in Betracht.

Ein weiterer Unterschied zwischen den unterschiedlichen Fahrzeugkategorien (BOStrab vs. EBO) besteht im Aufbau der Bremsmagnete. Vollbahnfahrzeuge verfügen über Gliedermagnete, während Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge mit Starrmagneten ausgerüstet werden (siehe ebenfalls Abbildung 5.38).

Ein bei Magnetschienenbremsen im Betrieb immer wieder auftretendes Problem sind die sogenannten Aufschieferungen. Dabei handelt es sich um Ansammlungen von metallischem Abrieb an der Unterseite des Polschuhs. Die Aufschieferungen sorgen für einen suboptimalen Kontakt zwischen Bremsmagnet und Schienenkopf und reduzieren somit die effektiv erzeugbaren Bremskräfte. Im Extremfall können die Aufschieferungen den magnetischen Kreis nahezu kurzschließen, sodass die Anzugskraft, mit der die Bremsmagnete auf die Schienenköpfe gepresst wird gegen Null geht. Eine regelmäßige Begutachtung und Aufarbeitung der Magnetschienenbremsen ist daher unerlässlich (siehe auch Abbildung 5.39).

Es hat sich gezeigt, dass Bremsmagnete aus Stahl eine größere Tendenz zur Bildung von Auf-

Eisenbahnzügen in der Regel nicht der Fall. Dennoch kommt es in Straßen- und Stadtbahnen im Falle von Gefahrbremungen immer wieder zu schweren Stürzen, weil Fahrgäste die Eigensicherung vernachlässigen und insbesondere im Haltestellenbereich, wenn sie sich bereits selbst zu den Türen hin bewegen, nicht mehr mit einer starken Bremsung rechnen. Dabei ist gerade in diesem Moment das Gefahrenpotential durch unachtsam querende Verkehrsteilnehmer vergleichsweise hoch.

schieferungen haben als solche aus Gusseisen. Allerdings ist bei letztgenannten materialbedingt eine höhere Leistung zur Speisung der Bremse nötig, weil Gusseisen sich im Vergleich schlechter magnetisieren lässt.



(a) Bremsmagnet mit Aufschieferungen vor der (b) Bremsmagnet nach der Aufarbeitung im Rahmen der Fahrzeuginstandhaltung
Aufarbeitung

Abbildung 5.39: Aufarbeitung von Magnetschienenbremsen im Rahmen der Instandhaltung von Straßenbahnfahrzeugen

6 Energiespeicher im SPNV

6.1 Motivation zur Energiespeichernutzung

Wie bereits im Abschnitt zur elektrodynamischen Bremse (Kapitel 5.2) erwähnt, werden Fahrzeuge im SPNV hauptsächlich durch die Wandlung kinetischer in elektrische Energie gebremst. Dies bedeutet, dass bei jedem Bremsvorgang elektrische Energie generiert wird, die im Idealfall in das (Oberleitungs-)Netz zurückgespeist werden kann, wodurch sich die Netto-Energieaufnahme der Fahrzeuge signifikant verbessern kann. Allerdings ist das elektrische Netz nicht immer aufnahmefähig, weshalb die erzeugte elektrische Energie in solchen Fällen in Bremswiderständen in Wärmeenergie überführt werden muss und damit für den Antrieb der Fahrzeuge verloren ist.

Es kann daher erwogen werden, Energiespeicher auf Fahrzeugen des SPNV zu installieren, damit die während der Bremsvorgänge gewandelte Energie bei dem nächsten Anfahrvorgang wieder zur Beschleunigung des Fahrzeuges genutzt werden kann.

In jedem Fall ist es sinnvoll, zunächst zu prüfen, wie hoch die effektive Rückspeisequote im alltäglichen Betrieb tatsächlich ist, da sich die Investition in mobile Energiespeichertechnik nur amortisieren wird, wenn häufig nennenswerte Energiemengen in den Bremswiderständen gewandelt werden, da sie nicht in das Netz zurückgespeist werden können.

Dies vorausgesetzt, kann der Einsatz von Energiespeichern auf Fahrzeugen des SPNV folgende Effekte haben:

1. die Einsparung von Traktionsenergie,
2. den Abbau von Leistungsspitzen bei dem Bezug der elektrischen Leistung aus dem Versorgungsnetz,
3. die Möglichkeit, (kurze) Streckenabschnitte ohne externe Energieversorgung zurückzulegen (oberleitungsfreier oder energieautarker Betrieb)

In den letzten Jahren hat es eine Reihe von Versuchen gegeben, Energiespeicher auf Straßen- und Stadtbahnen zu nutzen, wobei lange Zeit unklar war, welche Energiespeicherart für diese Fahrzeugkategorie am besten geeignet ist. Grundsätzlich kommen drei Speichertypen in Betracht, die in den unten stehenden Infokästen kurz charakterisiert werden. Dabei handelt es sich um elektrochemische Speicher („Batterien“), elektrostatische Speicher (Doppelschichtkondensatoren) und Schwungmassenspeicher. Letztere konnten sich nicht durchsetzen, weil das Gefahrenpotential im Falle einer Speicherhavarie¹ als zu hoch eingeschätzt wurde, um einen

¹Damit ist das Zerbersten der Schwungscheiben bei hohen Drehzahlen gemeint. In einem solchen Fall werden Kleinteile mit hoher kinetischer Energie freigesetzt, die einem Geschossprojektil nicht unähnlich sind.

Einsatz auf mit Personen besetzten Fahrzeugen, noch dazu im innerstädtischen Verkehr, verantworten zu können. Bei den durchgeführten Feldtests hat sich gezeigt, dass die physische Integrität der Schwungmassen nicht in ausreichendem Maße garantiert und detektiert werden konnte.

Es haben sich schließlich elektrische Speicher für den Einsatz auf Fahrzeugen des SPNV etabliert, wobei meistens den Doppelschichtkondensatoren der Vorzug gegeben wird, wenn die Energieeinsparung sowie die Reduzierung der Netzbelastung im Vordergrund stehen, während elektrochemische Speicher immer dann infrage kommen, wenn längere Streckenabschnitte oberleitungsfrei zurückgelegt werden sollen.

Die folgenden Infokästen enthalten Überblickswissen zu den bisher auf Straßen- und Stadtbahnen verwendeten Speicherarten. Anschließend werden beispielhaft ausgewählte Straßenbahnfahrzeuge mit Traktionsenergiespeichern vorgestellt.

Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren sind elektrophysikalische Speicher, die kurzzeitig hohe elektrische Leistungen aufnehmen bzw. abgeben können. Die Zellspannung U_{DSK} ist mit dem Energieinhalt E_{DSK} über die Kapazität C_{DSK} wie folgt verknüpft:

$$E_{DSK} = \frac{1}{2} C_{DSK} U_{DSK}^2$$

Aus der oben stehenden Gleichung ist ersichtlich, dass die Spannung bei sinkendem Ladezustand überproportional abfällt, was bei konstanter (Entlade-) Leistung zu einem starken Anstieg des Stromes und damit zu einer starken thermischen Belastung der Zellen führt. Es ist daher üblich, effektiv nur einen bestimmten Spannungsbereich und damit nur ca. 75 % des nominellen Energieinhaltes von Doppelschichtkondensatoren auszunutzen.

Doppelschichtkondensatoren verfügen über eine vergleichsweise hohe gravimetrische Leistungsdichte (Größenordnung: 0,4...5,7 kW/kg) bei gleichzeitig eher geringer gravimetrischer Energiedichte (2,5...12,0 Wh/kg - Nennwerte bei vollständiger Ausnutzung des Speicherinhaltes). Doppelschichtkondensatoren kommen deshalb immer dann zum Einsatz, wenn vergleichsweise kleine Energiemengen über kurze Zeiträume aufgenommen oder abgegeben werden sollen. Sie eignen sich hervorragend zum Abdecken von kurzen Leistungsspitzen beim Anfahren und Bremsen. Längere oberleitungsfreie Abschnitte lassen sich jedoch mit solchen Speichern nicht befahren, da der Energiebedarf zu groß ist.

Elektrochemische Speicher

Elektrochemische Speicher sind das, was landläufig als „Batterien“ bezeichnet wird. Die Speicherung elektrischer Energie erfolgt in diesem Falle nicht physikalisch (im Sinne von: elektrostatisch) wie bei Doppelschichtkondensatoren, sondern über den Ablauf chemischer Reaktionen. Diese laufen im Vergleich zu elektrostatischen Lade- und Entladevorgängen langsam ab und werden zudem von der Zell-Temperatur beeinflusst (Verlangsamung bei zu geringen oder zu hohen Temperaturen).

Hinzukommt, dass sich die Speichereigenschaften über längere Zeiträume verändern können (Alterung der Batterien). Ein wesentlicher Einfluss ist dabei die Anzahl der durchlaufenen Lade- und Entladezyklen sowie deren Umfang (Teil- vs. Vollentladung). Die Auslegung der Speicher wird deshalb so vorgenommen, dass nur ein bestimmter Ladehub ausgenutzt wird und dabei hohe und niedrige Ladezustände vermieden werden. Die Speicher werden also bezüglich ihres Speicherinhaltes zur Erzielung einer hohen Lebensdauer überdimensioniert. Die bereitgestellte Spannung ist bei vielen elektrochemischen Speichern in den effektiv ausgenutzten Ladezustandsintervallen konstant, wird sich jedoch in Abhängigkeit der fließenden Ströme gegenüber dem Nennwert verringern (entladen) oder erhöhen (laden).

Die konkreten Eigenschaften sowie das Einsatzspektrum sind abhängig von den verwendeten chemischen Substanzen, sodass sich heute eine relativ große Bandbreite von elektrochemischen Speichern ergibt.

Besondere Bedeutung kommt dabei in letzter Zeit den Lithium-Ionen-Speichern zu, von denen es eine Vielzahl von Unter-Bauarten gibt. Diese Speicher bieten momentan in Summe die besten Eigenschaften für mobile Anwendungen, das heißt eine vergleichsweise hohe gravimetrische Energiedichte (40...200 Wh/kg - Nennwerte bei vollständiger Ausnutzung des Speicherinhaltes) bei akzeptabler Leistungsdichte (0,34...1,80 kW/kg).

Teilweise kommen auf Schienenfahrzeugen auch Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Nickel-Cadmium-Batterien als Speicher für die Traktionsenergie zum Einsatz. Fahrzeugbatterien zur Energieversorgung von Hilfs- und Nebenaggregaten werden hingegen häufig als Blei-Säure-Batterien ausgeführt. Dies liegt einerseits in den deutlich niedrigeren Kosten dieser Batteriebauart begründet, aber auch in deren Fähigkeit, selbst bei niedrigen Temperaturen (Winter, Außenabstellung) noch genügend elektrische Leistung zu generieren.

Das Befahren längerer oberleitungsfreier Abschnitte wird mit Hilfe elektrochemischer Speicher ermöglicht. Eine große Herausforderung stellen bei dem derzeitigen Stand der Technik schnelle Lade- und Entladevorgänge dar. Das Ziel, sehr hohe Lade- und Entladeleistungen mit einem hohen Energiespeichervermögen zu kombinieren, kann derzeit nur mit „Hybridspeichern“, einer Kombination aus elektrochemischen und elektrostatischen Speichern mit dazwischengeschalteter Leistungselektronik zum Steuern der Leistungsflüsse, realisiert werden. Es ist aber zu erwarten, dass sich auf dem Gebiet der Batterietechnik in den nächsten Jahren und Jahrzehnten noch beträchtliche Fortschritte ergeben werden.

Schwingmassenspeicher

Schwingmassenspeicher bestehen, wie der Name bereits vermuten lässt, aus Schwingmassen, also Rotationskörpern, die direkt mit einem elektromechanischen Energiewandler (E-Maschine) verbunden sind. Die Speicherkapazität E_{SMS} eines Schwingmassenspeichers ergibt sich aus der kinetischen Energie der Rotation:

$$E_{SMS} = \frac{1}{2} J \omega^2$$

Eine große Speicherkapazität kann also einerseits durch ein großes Massenträgheitsmoment J oder durch eine hohe Rotationsgeschwindigkeit ω erzielt werden. Da der Bauraum auf Fahrzeugen sehr begrenzt ist und auch die Masse des Speichers eine bedeutende Rolle spielt, müssen Schwingmassenspeicher für mobile Anwendungen mit sehr hohen Drehzahlen (z.T. im fünfstelligen Bereich) betrieben werden. Hohe Rotationsgeschwindigkeiten bedeuten aber gleichzeitig eine hohe Beanspruchung des Materials, aus dem die Schwingmasse gefertigt ist.

Übliche Speichergrößen auf Schienenfahrzeugen sind 1 bis 4 kWh. Im Gegensatz zu den elektrischen Speichern, die aus Zellen aufgebaut werden, lassen sich Schwingmassenspeicher hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen nicht so flexibel an den vorhandenen Bauraum anpassen, wie es bei niederflurigen Straßenbahnen oft wünschenswert ist.

Im Falle einer Havarie oder eines Unfalls ist das Ausfallverhalten eines Schwingmassenspeichers zudem alles andere als unproblematisch, sodass ein sehr hoher Aufwand zur Sicherung der Integrität des Speichers zu betreiben ist.

Eine weitere Herausforderung stellt die Lagerung der Schwingmasse dar, bei der die Minimierung der Lagerverluste im Mittelpunkt steht, um die Selbstentladung des Speichers auf ein Minimum zu reduzieren. Die Leistungsfähigkeit der Speicher (Lade- und Entladeleistung) wird im Wesentlichen von der elektrischen Maschine, die mit der Schwingmasse verbunden ist, determiniert.

6.2 Anwendungsbeispiele

6.2.1 RNV-Bahnen mit „Energysaver“

Bereits seit 2003 werden im Großraum Mannheim/Heidelberg Straßenbahnen mit elektrischen Speichern auf Basis von Doppelschichtkondensatoren betrieben. Die zugrundeliegenden Überlegungen sowie die erzielten Betriebsergebnisse werden u.a. in [7] beschrieben.

Zunächst wurde ein Prototyp-Fahrzeug GT6N der Mannheimer Verkehrsbetriebe mit einem Speichermodul ausgerüstet, das aus 640 Doppelschichtkondensatoren bestand, die in vier parallelgeschalteten Strängen angeordnet waren, die ihrerseits aus jeweils 160 in Reihe geschalteten Speicherzellen aufgebaut waren. Der Nenn-Energieinhalt eines solchen Moduls betrug 1 kWh. Allerdings wurde die maximale Zellspannung von 2,5 V auf 2,3 V abgesenkt, um die Lebensdauer des Speichers zu verbessern. Somit standen noch 0,85 kWh zur Verfügung, von denen 75 % (0,64 kWh) tatsächlich genutzt wurden. [7]

Im Versuchsbetrieb konnte das Fahrzeug eine Strecke von 500 m mit einer Geschwindigkeit von 26 km/h ohne Speisung aus der Oberleitung zurücklegen. Bei regulären Fahrten konnte die dem elektrischen Netz beim Anfahren entnommene Spitzenleistung um 40 % gesenkt werden und es wurde durch die Wiedergewinnung von Bremsarbeit eine Energieeinsparung von bis zu 30 % erzielt. [7]

Basierend auf diesen Erfahrungen wurden von der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (in der die

Mannheimer Verkehrsbetriebe zwischenzeitlich aufgegangen waren) ab 2009 Bombardier Variobahnen (siehe Abbildung 6.1) beschafft, die über drei elektrostatische Energiespeicher verfügen. Jeder Energiespeicher hat einen Nenn-Energieinhalt von 1 kWh und ist in einem Container (1900 mm x 950 mm x 455 mm = 812 l) auf dem Fahrzeugdach montiert. Die zusätzliche Masse beträgt pro Speichermodul 450 kg. [8]

Nach Berechnungen des Fahrzeugherstellers können bei einem repräsentativen Fahrspiel ca. 28 % der für das Beschleunigen der Fahrzeuge benötigten Energie den elektrischen Speichern entnommen werden. Durch die Kombination von Rückspeisung und Bremsarbeitsrekuperation mit Hilfe der Speicher soll es möglich sein, den Anteil der in den Bremswiderständen gewandelten Energie auf ca. 3 % der beim Beschleunigen zugeführten Energie zu begrenzen. [8]



Abbildung 6.1: Variobahn der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH in Heidelberg

6.2.2 Vossloh Tramlink Rostock

Die Rostocker Straßenbahn AG (RSAG) setzt seit 2014 Straßenbahnen des Typs TramLink 6N2 (siehe Abbildung 6.2), die ebenfalls über aus Doppelschichtkondensatoren aufgebaute elektrische Energiespeicher verfügen. Diese kommen in Rostock hauptsächlich zum Einsatz, um die während der Anfahrt der Fahrzeuge auftretenden Stromspitzen auf Werte von maximal 800 A zu begrenzen. [1]

Die Aufladung der Speicher erfolgt während der Bremsvorgänge (Bremsarbeitsrekuperation) mit Hilfe der elektrodynamischen Bremse. Der Energieinhalt des DSK-Speichers² beträgt ca. 0,75 kWh bei einer Masse von 530 kg und einem Bauvolumen von 1620 mm x 1330 mm x 597 mm = 1286 l. [1]

²Ob es sich dabei um den Nenn-Energieinhalt oder den effektiv ausgenutzten Energieinhalt handelt, geht aus der zitierten Literaturquelle nicht eindeutig hervor.



Abbildung 6.2: Straßenbahntriebwagen TramLink 6N2 für die Rostocker Straßenbahn AG auf der InnoTrans 2014

6.2.3 Tramway de Nice

Nachdem die Straßenbahn in Nizza (frz.: Nice) in den 1950er Jahren abgeschafft wurde, besann man sich zu Anfang dieses Jahrtausends eines besseren und erbaute eine neue Straßenbahnlinie, die im Jahre 2007 eröffnet wurde.

Um die Teile der Innenstadt, die als ästhetisch besonders wertvoll gelten, von Oberleitungen freizuhalten (siehe Abbildung 6.3), wurden Straßenbahnen vom Typ Alstom Citadis 302 bzw. 402 beschafft, die über elektrochemische Speicher (Nickel-Metallhydrid-Batterien) verfügen. Diese ermöglichen es den Fahrzeugen, oberleitungsfrei bis zu 1000 m mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h zurückzulegen. Die begrenzte Schnellladefähigkeit der Batterien spielt eine untergeordnete Rolle, da der Energiespeicher während der Fahrt auf den konventionellen Streckenabschnitten kontinuierlich wieder aufgeladen werden kann. [6]



Abbildung 6.3: Straßenbahn in Nizza bei der Befahrung des Masséna Platzes im Stadtzentrum, der aus ästhetischen Gründen ohne Oberleitung geblieben ist.

6.2.4 Straßenbahn Nanjing

Während es in Nizza noch darum ging, *kurze* Streckenabschnitte mit Hilfe eines Energiespeichers oberleitungsfrei befahren zu können, ist man in Nanjing noch einen Schritt weiter gegangen und hat dort Straßenbahnlinien konzipiert, die nur an den Haltestellen und deren unmittelbarer Umgebung (ca. 20...25 m vor- und nach den Haltestellen) mit Oberleitungen ausgestattet wurden. Konkret handelt es sich um die Hexi-Linie (Länge: 7,65 km, 13 Haltestellen, max. Haltestellenabstand: 700 m) sowie die Qilin-Linie (Länge: 8,85 km, 14 Haltestellen, max. Haltestellenabstand: 1400 m).

Der Anteil oberleitungsfreier Streckenabschnitte an der Gesamtstrecke beträgt bei beiden Linien etwa neun Zehntel, sodass der Energiebedarf für Traktion sowie Hilfs- und Nebenaggregate weitgehend von den elektrischen Speichern abgedeckt werden muss.

Seit 2014 werden auf diesen Strecken Straßenbahntriebwagen vom Typ Bombardier Flexity 2, eingesetzt, die mit Lithium-Ionen Batterien ausgerüstet sind. Die Speicher sind schnellladefähig, da nur während des Aufenthaltes in den Haltestellenbereichen oder in den Bremsphasen nachgeladen werden kann. Der Nenn-Energieinhalt aller Traktionsspeicher auf dem Fahrzeug beträgt $4 \times 24,5 \text{ kWh} = 98 \text{ kWh}$. [3]

Literatur

- [1] Albrecht, Klaus, Wieden, Ingo und Monzó Perez, Miguel: „Komfortable Niederflur-Straßenbahnen mit Energiespeicher für Rostock“, in: *eb - Elektrische Bahnen*, Jg. 113 (2015), Nr. 1, S. 54–59.
- [2] Barner, Helmut und Martensson, Johan: „Elektromechanisches Bremssystem für Schienenfahrzeuge“, in: *eb - Elektrische Bahnen*, Jg. 98 (2000), Nr. 8, S. 290–294.
- [3] Becker, Frank und Dämmig, André: „Straßenbahnfahrzeuge mit Lithium-Ionen-Energiespeicher für Betrieb ohne Oberleitung“, in: *eb - Elektrische Bahnen*, Jg. 114 (2016), Nr. 8-9, S. 477–484.
- [4] Kipp, Johann Carsten: „Elektrohydraulische Bremssysteme für schienengebundene Nahverkehrsfahrzeuge“, in: *ZEV + DET Glas. Ann.*, Jg. 119 (1995), Nr. 11/12, S. 518–524.
- [5] Reschke, T. und Berger, P.: „Bremssysteme für Nahverkehrsfahrzeuge (BOStrab) und Vollbahnfahrzeuge (EBO/TEIV) - Zwei völlig diametrale Welten?“, in: *14. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden (Tagungsband)*, 2015, S. 86–88, isbn: 978-3-87154-547-4.
- [6] Rufer, A.: „Energy storage for railway systems, energy recovery and vehicle autonomy in Europe“, in: *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, Juni 2010, S. 3124–3127, doi: 10.1109/IPEC.2010.5542334.
- [7] Steiner, Michael, Scholten, Johannes und Poiss, Helmut: „Energiespeicher in Schienenfahrzeugen“, in: *ZEVrail Glasers Annalen - Tagungsband SFT Graz 2004*, Jg. 128 (2004), S. 244–249.
- [8] Uhlenhut, Achim: „Weltpremiere in Heidelberg: Erste Straßenbahnserie mit Energiespeicher“, in: *v+t Verkehr und Technik*, Jg. 63 (2010), S. 133–139.