

Prof. Dr. Martin Burgmer / Hartmut Frantz

Expertenwissen Bremsentechnik



MARTIN BURGNER

Prof. Dr., nach Lehre Industrietätigkeit, Studium in Köln, Aachen und Wuppertal, Fachleiter, Assistent Universität Dortmund, Fakultät Maschinenbau, Visiting Lecturer am College of Engineering Taejon, Südkorea, Inhaber des Instituts Technik und ihre Didaktik an den Universitäten Kiel und Flensburg in Forschung, Lehre und Technischer Weiterbildung, Wissenschaftlicher Berater der Akademie des Deutschen Kraftfahrzeugwerbes (TAK).

HARTMUT FRANTZ

Bachelor Professional im Kraftfahrzeugmechanikerhandwerk, erwarb Wissen und Erfahrung nach Gesellen- und Meisterausbildung als Werkstatt- und Serviceleiter bei Scania, der Daimler-Benz AG mit Unimog Generalvertretung / Kommunal- und Umwelttechnik sowie im Kipper- und Spezialfahrzeugbau. Seit 1999 ist er als Trainer in der überbetrieblichen Ausbildung und Weiterbildung von KraftfahrzeugmechatronikerInnen, in der Meisterausbildung, der Ausbildung von Prüfungingenieuren und der Weiterbildung von Lehrkräften an berufsbildenden Schulen tätig.

Seit zwei Jahrzehnten arbeiten beide Autoren im Rahmen eines gut ausgebauten Netzwerks erfolgreich in der Konstruktion und Optimierung von analogen und digitalen Lehr- und Lernsystemen im Nutzfahrzeugbereich, speziell für die Sicherheitsprüfung mit zeitoptimierten Prüfabläufen.

Weitere Informationen:

www.vogel-professional-education.de

ISBN 978-3-8343-3516-6

ISBN E-Book 978-3-8343-6286-5

1. Auflage 2027

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Lektorat: Ulrike Klein, Berlin

Druck: CPI books GmbH

Copyright 2012, 2025 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Vogel Communications Group GmbH & Co. KG

Max-Planck-Straße 7/9

97082 Würzburg

Tel.: +49 931 418-0

Fragen zur Produktsicherheit:

produktsicherheit@vogel.de

Vorwort

Technische Sicherheitssysteme nehmen im Mobilitätsgeschehen eine zentrale Rolle ein. Eine der wichtigsten technischen Einrichtungen eines Fahrzeugs ist die Bremse. Sowohl bei Personenkraftwagen (Pkw) als auch bei Lastkraftwagen (Lkw) ist sie unverzichtbar. Sie trägt maßgeblich zur Vermeidung von Unfällen bei, schützt Menschenleben und trägt zu einem geregelten Verkehrsfluss bei. In einer Zeit, in der Straßenverkehr, Gütertransport und individuelle Mobilität stetig zunehmen, gewinnen angepasste Bremssysteme zunehmend an Bedeutung. Die Fahrzeugbremse erfüllt dabei weit mehr als nur die Aufgabe, ein Fahrzeug anzuhalten. Sie beeinflusst Sicherheit, Fahrkomfort, Fahrzeugkontrolle, Wirtschaftlichkeit und zunehmend auch ökologische Aspekte der Mobilität.

Die Autoren, die mit Ihnen zusammen seit gut einem Vierteljahrhundert in der kraftfahrzeugtechnischen Community im Rahmen des Konzeptes Werkstatt und Wissenschaft – WuW – unterwegs sind, legen mit diesem Beitrag eine aktuelle Übersicht der Bremssysteme im Pkw und Nutzfahrzeug in Theorie und Werkstattpraxis vor.

Wir weisen darauf hin, dass Inhalte und Organisation von Schulungen zur SP in diesem Beitrag nicht behandelt werden – dies liegt im Aufgabenbereich der TAK.

Neben zahlreichen persönlichen Gesprächen in Schulungsstätten, Firmen, Ausstellungen, Messen und Kongressen haben uns die im folgenden genannten Unternehmen und Institutionen konstruktiv unterstützt. Hierfür danken wir im Namen der Community herzlichen Dank.

asillu / ATE / Bosch / Cartesy / Continental/Ate/VDO / DAF / Daimler AG / Essenreiter / Feldhans-Becker / Hella Pagid / Heywang / ilja-stock / Johannes Beier / Kfztechnik / Klug / Knorr / Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 30. Auflage / Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 30. Auflage / MAN/MAN Truck & Bus / Mercedes / Rheinmetall / Scania / ZF Group Wabco / Zimmermann / Zühlke (TAK) / VOITH.

Die Community freut sich über konstruktiven, kollegialen Austausch.

Martin Burgmer und Hartmut Frantz
Rösrath und Saarbrücken, Mai 2026

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Einleitung	11
1 Bremssysteme von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen – Hydraulische Bremsanlagen	13
1.1 Aufbau von Pkw-Bremsanlagen und Sicherheitsanforderungen	14
1.2 Komponenten von Pkw-Bremsanlagen	17
1.2.1 Unterdruck-Bremskraftverstärker – Aufbau, Funktion, Rückschlagventil	18
1.2.2 Elektromechanischer Bremskraftverstärker/iBooster	22
1.2.3 Tandem-Hauptbremszylinder mit Zentralventil und mit gefesselter Kolbenfeder	23
1.2.4 Ausgleichsbehälter/Bremsflüssigkeitsbehälter	27
1.2.5 Hydraulikeinheit	27
1.2.6 Übertragungseinrichtung (Bremsflüssigkeit, Leitungen).....	28
1.2.7 Radbremsen	32
1.2.7.1 Trommelbremsen	33
1.2.7.2 Scheibenbremsen	35
1.2.7.3 Bremsbeläge	46
1.2.7.4 Unerwünschte Bremsgeräusche	51
1.3 Elektromagnetische Feststellbremsanlagen	52
1.3.1 Anforderungen an die Betätigung	52
1.3.2 Ausführungen	53
1.3.3 Funktionen einer elektrischen Feststellbremse	57
1.3.4 Wartung und Fehlerbehebung	57
1.4 Fortgeschrittene Bremssysteme	58
1.4.1 Sensotronic Brake Control, SBC.....	59
1.4.2 Integriertes Bremssystem IPB	61
1.5 Bremseneingriffe durch Fahrerassistenzsysteme.....	63
1.5.1 Sensoren in Bremsassistenten: Übersicht	65
1.5.2 Sensoren in Bremsassistenten: Aufbau und Funktion	66
1.6 Wartung, Diagnose, Instandsetzung	72
1.6.1 Einsatz kupferhaltiger Schmierstoffe bei Bremsenreparaturen (Pkw und Lkw)	73
1.6.2 Entlüften und Bremsflüssigkeitswechsel von Fahrzeugen mit ABS	73
1.6.3 Fehlersuchablauf	74
1.6.4 Praxishinweise zur Wartung	77
1.6.5 Arbeitsablauf Bremsenprüfung	79
1.6.6 Hinweise zur Instandsetzung	83
1.6.7 Raddrehzahlsensor prüfen und austauschen	84

2	Bremssysteme von Nutzfahrzeugen – Druckluftbremsanlagen.....	85
2.1	Systemaufbau	87
2.2	Komponenten der Zweileitungs-Zweikreis Druckluft-Bremsanlagen mit ABS und ASR im Motorwagen	90
2.2.1	Kompressor	90
2.2.2	Druckregler.....	91
2.2.3	Lufttrockner und Frostschützer.....	93
2.2.4	Vierkreis-Schutzventil	95
2.2.4.1	Einfaches Vierkreis-Schutzventil	96
2.2.4.2	Vierkreis-Schutzventil nach neuer EG-Richtlinie	99
2.2.4.3	Elektronisch gesteuertes Vierkreis-Schutzventil.....	100
2.2.5	Entwässerungsventil.....	102
2.2.6	Zweikreis-Motorwagen-Bremsventil	103
2.2.7	Handbremsventil	104
2.2.8	Standsicherheitsventil	106
2.2.9	Relaisventil.....	106
2.2.10	Automatisch-lastabhängige Bremskraftregler, ALB-Regler	107
2.2.11	Antiblockiersystem ABS	110
2.2.12	Antriebs-Schlupf-Regelung ASR	112
2.2.13	Brems- und Tristop-Zylinder sowie Gestängesteller	114
2.2.14	Radbremsen	117
2.2.15	Weiterentwicklung der Radbremse.....	119
2.2.16	Anhänger-Steuerventile und Zweileitungs-Kupplungsköpfe.....	121
2.3	Komponenten der Zweileitungs-Zweikreis-Druckluft-Bremsanlage mit ABS und ASR im Anhänger	124
2.3.1	Rohrleitungsfilter	124
2.3.2	Anhänger-Bremsventil	124
2.3.3	Anhänger-Löseventil	125
2.3.4	Schnellentlüftungsventil.....	126
2.3.5	Druckverhältnisventil.....	126
2.4	Komponenten der Zweileitungs-Zweikreis-Druckluft-Bremsanlage mit ABS und ASR im Bus.....	127
2.5	Elektronische Bremssysteme EBS	127
2.5.1	Grundfunktionen und Bremsenmanagement	127
2.5.2	Erweiterte Funktion: Elektronische Stabilitätsregelung	132
2.5.3	Elektronische Bremssysteme in der Zugmaschine: Systemübersicht, Elemente, Funktionen	134
2.5.3.1	Systemübersicht.....	134
2.5.3.2	Elemente an der Vorderachse im Normal- und Redundanzbetrieb	138
2.5.3.3	Elemente an der Hinterachse im Normal- und Redundanzbetrieb	141
2.5.3.4	Weitere Regelfunktionen im EBS	147
2.5.3.5	Elektronisch betätigte Feststellbremse	149
2.5.3.6	Ausblick.....	158

2.5.4	Elektronische Bremssysteme EBS im Anhänger-Fahrzeug	163
2.5.4.1	Park-Löse-Sicherheitsventil PREV (Park Release Emergency Valve)	164
2.5.4.2	EBS-Anhängermulator	165
2.5.4.3	Aktuelle Generation Trailer EBS E	166
2.5.5	EBS Wabco im Omnibus.....	168
2.5.6	EBS Knorr	169
2.5.6.1	Knorr EBS 5 im Motorwagen und Omnibus.....	169
2.5.6.2	Knorr Trailer EBS G2	171
2.5.7	Park-/Rangierventil mit Notlösefunktion	172
2.6	Dauerbremsen	174
2.6.1	Motorbremssysteme für Nutzfahrzeuge.....	175
2.6.2	Retarder.....	179
3	Bremsprüfung	189
3.1	Technische Prüfung der Bremse gemäß Hauptuntersuchung.....	190
3.2	Ausstattung für die technische Prüfung der Bremse	191
3.3	Bremsprüfstände.....	192
3.3.1	Komponenten der Rollenbremsprüfstände	194
3.3.2	Komponenten der Plattenbremsprüfstände.....	197
3.4	Netzbasierte, digitale Nutzung der ASA-Livestream-Schnittstelle	198
3.4.1	Digitale Bremskraftprüfung und Bremskraftanzeige.....	199
3.4.2	Netzbasierte Bremswirkungsprüfung – Ermittlung der Abbremsung.....	201
4	Physikalisch-technische Grundlagen.....	205
4.1	Formelzeichen und Einheiten	206
4.2	Physikalische Größen	207
4.2.1	Masse, Beschleunigung, Kraft	207
4.2.2	Gewichtskraft, Fallbeschleunigung	208
4.2.3	Drehmoment	208
4.2.4	Arbeit/Energie, Leistung.....	209
4.2.5	Wirkungsgrad.....	210
4.2.6	Drehbewegungen	211
4.2.7	Druck, Volumen, Temperatur	213
4.3	Abbremsung und Hochrechnung.....	214
4.3.1	Bezugsbremskräfte	215
4.3.2	Einpunkt-Hochrechnung	216
4.3.3	Ermittlung der Abbremsung der Feststellbremsanlage (FBA) auf dem Bremsprüfstand.....	217
4.3.4	Beurteilung der Bremswirkung.....	218
4.4	Getriebe.....	219

Inhaltsverzeichnis

4.5	Physikalische Widerstände	220
4.5.1	Rollwiderstand	220
4.5.2	Luftwiderstand	221
4.5.3	Steigungswiderstand	223
4.6	Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	224
4.7	Bremsleistung	227
4.8	Hydraulisches Prinzip	228
Stichwortverzeichnis.....		231

Einleitung

Die primäre Funktion einer Fahrzeugbremse besteht darin, die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs zu reduzieren oder es vollständig zum Stillstand zu bringen. Dies geschieht durch die Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärmeenergie. Bei Pkw kommen überwiegend hydraulische Bremssysteme zum Einsatz, die meist aus Scheibenbremsen und teilweise Trommelbremsen bestehen. Bei Lkw hingegen werden vor allem Druckluftbremsanlagen verwendet, da diese den höheren Anforderungen hinsichtlich Fahrzeuggewicht und Bremskraft besser gerecht werden. Die physikalische Grundlage jeder Bremsung ist die Reibung. Nach Betätigung des Bremspedals wird ein Mechanismus ausgelöst, der Bremsbeläge gegen Brems Scheiben oder Bremsstrommeln presst. Dadurch entsteht Reibung, die die Drehbewegung der Räder verlangsamt und letztlich das Fahrzeug abbremst.

Der heutige Straßenverkehr ist geprägt von hohen Geschwindigkeiten, dichtem Verkehrsaufkommen und komplexen Verkehrssituationen. Gerade in urbanen Räumen sowie auf Autobahnen müssen Fahrzeuge in Sekundenbruchteilen kontrolliert reagieren können. Ein technisch einwandfreies Bremssystem ermöglicht kurze Bremswege und kann entscheidend dazu beitragen, schwere Verkehrsunfälle zu verhindern. Besonders in Gefahrensituationen, etwa bei plötzlich auftretenden Hindernissen, abrupten Spurwechseln oder unerwartetem Bremsverhalten anderer Verkehrsteilnehmer entscheidet die Leistungsfähigkeit der Bremse oftmals über den Ausgang einer Situation.

Von besonderer Bedeutung sind dabei moderne elektronische Bremssysteme, die in den vergangenen Jahrzehnten erheblich weiterentwickelt wurden. Hierzu zählen beispielsweise das Antiblockiersystem (ABS), das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) sowie Bremsassistenten. Das ABS verhindert ein Blockieren der Räder während einer Vollbremsung und sorgt dafür, dass das Fahrzeug lenkbar bleibt. Ohne diese Technologie könnte ein Fahrzeug bei starkem Bremsen ins Schleudern geraten oder die Kontrolle verlieren. Das ESP unterstützt zusätzlich die Fahrstabilität, indem es einzelne Räder gezielt abbremst und so kritische Fahrsituationen stabilisiert. Moderne Notbremsassistenten erkennen zudem potenzielle Kollisionen frühzeitig und leiten automatisch Bremsvorgänge ein, wenn Fahrerinnen oder Fahrer nicht rechtzeitig reagieren. Diese technischen Entwicklungen zeigen: die Bremse wurde vom rein mechanischen Bauteil hin zu einem intelligenten Sicherheitssystem entwickelt.

Gerade im Güterverkehr kommt der Bremse eine besondere Bedeutung zu. Lkw transportieren täglich große Mengen an Waren und bewegen dabei erhebliche Massen. Aufgrund ihres hohen Gewichts besitzen sie deutlich längere Bremswege als Pkw. Eine fehlerhafte oder unzureichend gewartete Bremsanlage hätte hier besonders gravierende Folgen. Deshalb gelten für Nutzfahrzeuge strenge gesetzliche Vorschriften hinsichtlich Wartung, Prüfung und technischer Sicherheit. Regelmäßige Kontrollen der Bremsleistung sind verpflichtend und dienen dem Schutz aller Verkehrsteilnehmer. Darüber hinaus verfügen moderne Lastkraftwagen über Zusatzsysteme wie Retarder oder Motorbremsen. Derartige Dauerbremsen entlasten die Betriebsbremse, insbesondere bei langen Gefällestrecken, und verhindern eine Überhitzung. Dies ist nicht nur aus Sicherheitsgründen wichtig, sondern erhöht zugleich die Lebensdauer der Bremskomponenten.

Eine weitere bedeutende Funktion der Fahrzeugbremse ist ihre Rolle für das subjektive Sicherheitsgefühl der Menschen. Fahrzeugführer müssen sich darauf verlassen können, dass ihr Fahrzeug jederzeit zuverlässig verzögert. Vertrauen in die Technik beeinflusst das

Fahrverhalten erheblich und trägt zur allgemeinen Verkehrssicherheit bei. Gleichzeitig steigt mit zunehmender Fahrzeugautomatisierung die Verantwortung intelligenter Bremssysteme. Fahrerassistenzsysteme, teilautonomes Fahren und digitale Vernetzung setzen hochpräzise Bremsfunktionen voraus, die in Millisekunden reagieren können. Ohne leistungsfähige Bremsanlagen wären moderne Mobilitätskonzepte technisch kaum realisierbar.

Darüber hinaus spielt die Bremse auch in ökologischer und wirtschaftlicher Hinsicht eine zunehmend wichtige Rolle. Mit der Verbreitung von Elektro- und Hybridfahrzeugen entstehen neue Konzepte der Energierückgewinnung. Die sogenannte Rekuperation ermöglicht es, beim Bremsen Bewegungsenergie in elektrische Energie umzuwandeln und in die Batterie zurückzuführen. Dadurch verbessert sich die Energieeffizienz der Fahrzeuge, während gleichzeitig der Verschleiß mechanischer Bremskomponenten reduziert wird. Dieser technologische Wandel verdeutlicht, dass die Funktion der Bremse inzwischen weit über das reine Verzögern hinausgeht und Bestandteil nachhaltiger Mobilitätsstrategien geworden ist.

Nicht zuletzt besitzt die regelmäßige Wartung der Bremsanlage eine erhebliche Bedeutung. Verschlossene Bremsbeläge, beschädigte Bremsscheiben oder fehlerhafte Bremsleitungen können die Bremswirkung erheblich beeinträchtigen und schwere Folgen nach sich ziehen. Aus diesem Grund gehören Bremsenkontrollen zu den wichtigsten Maßnahmen der Fahrzeuginspektion. Auch Fahrzeugführer selbst tragen Verantwortung, indem sie auf ungewöhnliche Geräusche, verlängerte Bremswege oder Warnanzeigen achten und Mängel frühzeitig beheben lassen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Fahrzeugbremse eine fundamentale Schlüsselrolle im heutigen Mobilitätsgeschehen einnimmt. Sowohl bei Pkw als auch bei Lkw bildet sie die Grundlage für sichere, kontrollierte und effiziente Fortbewegung.

Sicherheitssysteme mit derart hohen Anforderungen müssen regelmäßig geprüft, gewartet und instandgesetzt werden. Es versteht sich von selbst, dass Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen in Theorie und Werkstattpraxis diesem Anspruch gerecht werden müssen. Dazu bedarf es regelmäßiger Fortbildung, individuell und in der Gruppe.

1 Bremssysteme von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen – Hydraulische Bremsanlagen

In diesem Kapitel werden folgende Fragestellungen behandelt:

Wie sind hydraulische Pkw-Bremsanlagen aufgebaut, welche Arten von Bremsanlagen gibt es und aus welchen Komponenten bestehen sie?

Welche Bedeutung haben die unabhängigen Bremskreise für die Sicherheitsanforderungen und wie sind sie aufgebaut?

Wie wird die Bremskraft verstärkt (Unterdruck- und elektromechanische Bremskraftverstärker)?

Wie arbeitet der Tandem-Hauptbremszylinder?

Wie wird die Bremskraft übertragen (Bremsflüssigkeit, Leitungen und Bremsschläuche) und was muss man beim Umgang mit diesen Komponenten beachten?

Welche Arten von Trommel- und Scheibenbremsen gibt es und wie unterscheiden sie sich in Aufbau und Funktion?

Welche Werkstoffe und Bauarten kommen bei Bremsscheiben und Bremsbelägen zum Einsatz?

Wie entstehen unerwünschte Bremsgeräusche wie Rubbeln und Quietschen?

Wie funktioniert die elektromechanische Feststellbremsanlage (EPB) und was ist bei Wartung und Reparatur zu beachten?

Wie arbeiten fortgeschrittene Bremssysteme (SBC, IPB) und Bremsassistentensysteme?

Was ist bei Wartung, Fehlersuche und Instandsetzung hydraulischer Bremsanlagen zu beachten?

1.1 Aufbau von Pkw-Bremsanlagen und Sicherheitsanforderungen

Für Kraftfahrzeuge ist die Ausrüstung mit zwei voneinander unabhängigen Bremsanlagen gesetzlich vorgeschrieben.

Hinsichtlich ihrer Funktion unterscheidet man:

- Betriebs-Bremsanlage, BBA
- Hilfs-Bremsanlage, HBA
- Feststell-Bremsanlage, FBA
- Dauer-Bremsanlage, DBA

Die **Betriebs-Bremsanlage BBA** wird über das Bremspedal betätigt und dient zur Verzögerung des Fahrzeuges bis zum Stillstand.

Die **Hilfs-Bremsanlage HBA** muss die Verzögerung des Fahrzeuges bei Ausfall der BBA sicherstellen. Diese Funktion wird mithilfe eines zweiten Bremskreises in der BBA erreicht.

Die **Feststell-Bremsanlage FBA** hat die Aufgabe, das Fahrzeug nach dem Stillstand gegen Wegrollen abzusichern.

Die **Dauer-Bremsanlage DBA** entlastet die BBA zum Beispiel auf längeren Gefällstrecken. Sie wird jedoch nur in schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt.

BBA und HBA müssen in ihrer Wirkung vom Fahrzeugführer/von der Fahrzeugführerin dosierbar sein. Die Bremsanlagen müssen so gebaut sein, dass die geforderte Bremswirkung zuverlässig erreicht wird. Der Zustand der Bauteile muss leicht nachprüfbar sein. Verschleißteile sind so zu bemessen, dass sie erst nach angemessener Betriebsdauer nachgestellt oder ausgewechselt werden müssen. Für Verschleißkomponenten sind Nachstelleinrichtungen vorzusehen.

Die Anlagen müssen vom Fahrersitz ergonomisch und zeitlich unmittelbar betätigt werden können. Dabei dürfen keine Beeinträchtigungen beim Führen des Fahrzeuges entstehen.

Außerdem wird – nach Bremsanlage und Fahrzeugklasse gestaffelt – eine Abbremsung oder ein Bremsweg bei einer maximalen Fußkraft vorgeschrieben; dazu ist eine Prüfmethode festgelegt. Aus Gründen der Fahrstabilität wird zusätzlich eine Blockier-Reihenfolge gefordert. So darf zum Beispiel in Europa die Hinterachse bei Verzögerungen zwischen $0,15\,g$ und $0,8\,g$ nicht vor der Vorderachse blockieren. (g ist die Erdbeschleunigung, sie hat in Europa einen Wert von rund $10\,m/s^2$. Daraus folgt also die Blockier-Reihenfolge zwischen $1,5\,m/s^2$ und $8\,m/s^2$.) Für Fahrzeuge mit ABS entfällt diese Vorschrift, da hier ein Blockieren der Räder generell verhindert wird.

Das folgende Bild 1.1 zeigt einen typischen Aufbau einer konventionellen hydraulischen Hilfskraft-Bremsanlage für Pkw.

An alle Bremssysteme werden die folgenden **sicherheitstechnischen Anforderungen** gestellt:

- Es müssen zwei voneinander getrennte Bremsanlagen vorhanden sein, also BBA und FBA; davon muss eine feststellbar sein; in Bild 1.1 ist die FBA über den Handbremshebel oder elektrisch Nr. 6 zu betätigen.

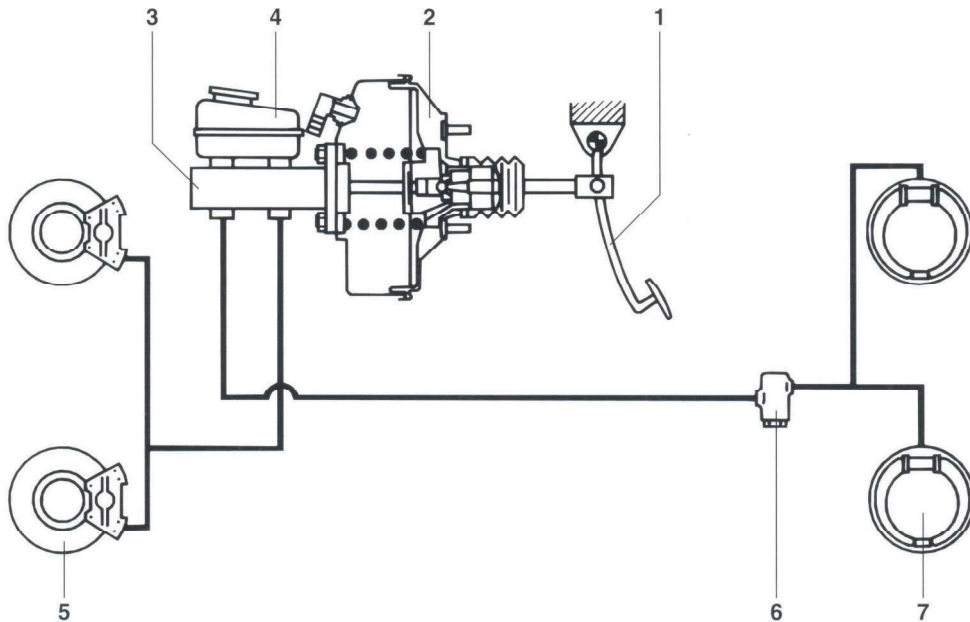


Bild 1.1 Typischer Aufbau einer konventionellen, hydraulischen Hilfskraft-Bremsanlage für Pkw
[Bild: Bosch]

1 – Bremspedal
2 – Unterdruck-Bremskraftverstärker
3 – Tandemhauptylinder
4 – Bremsflüssigkeitsbehälter

5 – Scheibenbremse, vorn
6 – Bremskraftverteiler
7 – Trommelbremse, hinten

- Bremsanlagen müssen getrennte Betätigungseinrichtungen besitzen, in Bild 1.1 das Bremspedal für die BBA (Nr. 1) und der Handbremshebel (oder elektrisch) für die FBA (Nr. 6).
- Bei einer Störung der BBA müssen noch mindestens zwei Räder, die nicht auf der gleichen Seite liegen, gebremst werden können.
- Die geforderte Hilfsbremsanlage kann die geforderte Bremswirkung aufbringen, wenn in der BBA eine Störung eintritt.

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an Bremsen sind in den folgenden Richtlinien festgehalten:

- Richtlinie 71/320/EWG (legt Verfahren für die EG-Typgenehmigung von Bremsanlagen bestimmter Kraftfahrzeuge fest)
- ECE-R 13 Teil 1 (einheitliche Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen der Klassen M, N, und O hinsichtlich der Bremsen)
- ECE-R 13 Teil 2, ECE-R 13 H (länderspezifische Vorschriften für die Typgenehmigung von Fahrzeugen der Klassen M, N, und O hinsichtlich der Bremsen)

Bezogen auf die **Krafterzeugung** wird unterschieden zwischen Muskelkraft-, Hilfskraft- und Fremdkraftbremsanlage.

Bei der **Muskelkraft-Bremsanlage** ist allein die Muskelkraft des Fahrers/der Fahrerin wirksam, z.B. bei der FBA in Bild 1.1, Nr. 6.

Bei der **Hilfskraft Bremsanlage** wird die Muskelkraft des Fahrers/der Fahrerin durch eine Verstärkungseinrichtung wie ein Bremskraftverstärker erhöht (in Bild 1.1 das Bremspedal Nr. 1 mit Bremskraftverstärker).

Bei der **Fremdkraft-Bremsanlage** wirkt die Betätigungskraft des Fahrers/der Fahrerin nur als Steuergröße; vgl. Kapitel 1.2.2 Elektromechanischer Bremskraftverstärker.

Eine elektrische Bremsbetätigung wird derzeit nur in elektrisch wirkenden Feststell-Bremsanlagen genutzt; siehe hierzu Kapitel 1.3.

Die **Kraftübertragung** für die BBA erfolgt entweder hydraulisch (Pkw) oder pneumatisch (Lkw) und über zwei getrennte Bremskreise, damit bei einer Störung wenigstens ein Bremskreis wirksam ist.

Bei der **Aufteilung der Bremskreise** nach DIN 74000 bei Fahrzeugen Klasse M 1 (Pkw) sind die am häufigsten genutzten Möglichkeiten

- die Vorder-Hinterachs-Bremskreisaufteilung, auch II-Aufteilung genannt oder
- die diagonale Bremskreisaufteilung auch X-Aufteilung genannt.

Das folgende Bild 1.2 zeigt die beiden Varianten der Bremskreisaufteilung schematisch.

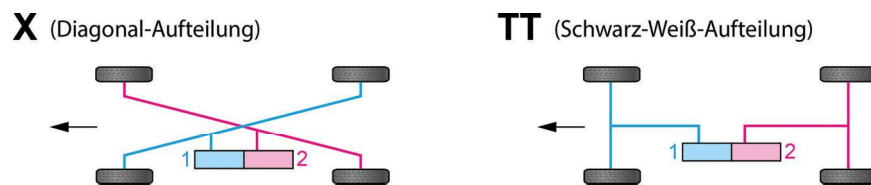


Bild 1.2 Varianten der Bremskreisaufteilung, schematisch
[Bild: autoFACHMANN]

Bei der **Vorder-Hinterachs-Bremskreisaufteilung** werden Vorderräder und Hinterräder des Fahrzeugs jeweils von einem separaten Bremskreis versorgt. Wesentliche Merkmale dabei sind:

- kein Schiefziehen des Fahrzeugs bei Kreisausfall
- Einsatzmöglichkeit eines gestuften Tandem-Hauptzylinders (unterschiedliche „äußere Übersetzung“ für Vorder- und Hinterachse)
- Einsparung einer zweiten Bremsleitung zur Hinterachse
- verbleibende Hinterachs-Bremswirkung bei thermischer Überlastung der Vorderachse

Bei der **diagonalen Bremskreisaufteilung** werden jeweils die diagonal gegenüberliegenden Bremsen von einem Bremskreis versorgt. Der höhere Bremskraftanteil der Vorderachse wird dabei auch bei einem Kreisausfall immer an einem Rad genutzt. Schiefziehen bei Kreisausfall infolge der unsymmetrischen Bremskraftverteilung zwischen links und rechts kann durch eine entsprechende Achskonstruktion, zum Beispiel durch einen negativen Lenkradradius, kompensiert werden. Die diagonale Bremskraftaufteilung wird vorwiegend in Fahrzeugen mit höherem Vorderachslastanteil verwendet.

Alle anderen Bremskreisaufteilungen nach DIN 74 000 finden heute nur noch selten Anwendung. Besonderheiten bei Nutzfahrzeugen sind in Kapitel 2 beschrieben.

Spezifische Anforderungen an die Bremskraftverteilung gemäß Rili 71/320 EWG, ECE-R 13 und ECE-R 13 H sind für die Konstruktion des Bremssystems wichtig, haben jedoch für den hier interessierenden Servicebereich nur eine untergeordnete Bedeutung.

1.2 Komponenten von Pkw-Bremsanlagen

Das folgende Bild 1.3 zeigt in einer schematischen Übersicht den typischen Leitungsplan der Komponenten einer hydraulischen Zweikreis-Bremsanlage und ihr Zusammenwirken.

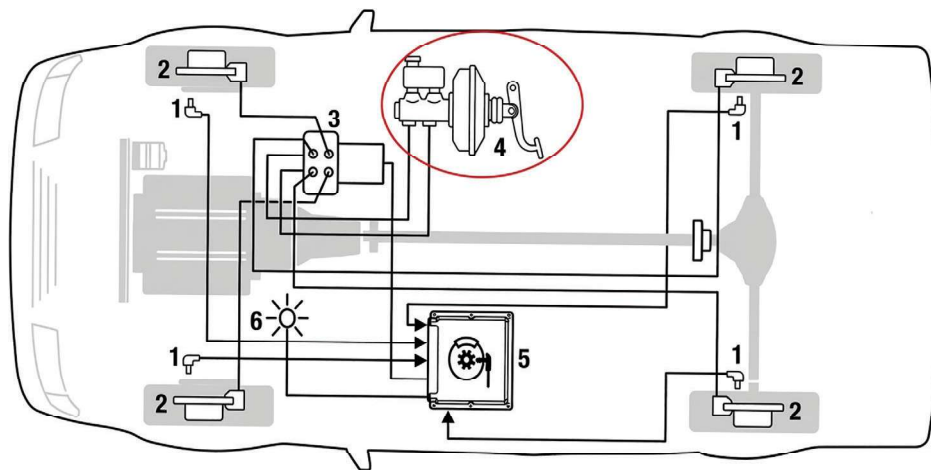


Bild 1.3 Typischer Leitungsplan einer hydraulischen Zweikreis-Bremsanlage

[Bild: Vorlage Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 30. Auflage]

1 – Raddrehzahlsensoren

2 – Radbremsen (Scheibenbremsen, an der Hinterachse auch Trommelbremsen möglich)

3 – Hydraulikeinheit

4 – Betätigungseinrichtung mit Bremskraftverstärker, Tandem Hauptbremszylinder und Ausgleichsbehälter (roter Kreis)

5 – Elektronisches Steuergerät (möglich ist auch der direkte Anbau an die Hydraulikeinheit)

6 – Warnlampe für Antiblockiervorrichtung oder Fahrdynamikregelung

Bei Betätigung der Betriebsbremse wirkt die Fußkraft des Fahrers/der Fahrerin auf das Bremspedal. Die hebelübersetzte Pedalkraft wird im Bremskraftverstärker (4) je nach Bauart um den Faktor 4 bis 10 weiter verstärkt und wirkt auf die Kolben im Hauptbremszylinder (noch 4). Dort wird die Betätigungskraft in einen hydraulischen Druck umgewandelt. Dieser liegt bei Vollbremsung im Bereich und je nach Auslegung zwischen 100 bar und 160 bar.

Im Folgenden werden nun die einzelnen **Komponenten der Betätigungseinrichtung** beschrieben.

1.2.1 Unterdruck-Bremskraftverstärker – Aufbau, Funktion, Rückschlagventil

Der Bremskraftverstärker (BKV) verringert die für den Bremsvorgang erforderliche Betätigungskraft, darf aber das feinfühlig Abstufen der Bremskraft und das Gefühl für das Maß der Bremsung nicht beeinträchtigen.

Bremskraftverstärker nutzen Unterdruck oder hydraulischen Druck. Unterdruck-Bremskraftverstärker werden hier beschrieben, Bremskraftverstärker mit hydraulischem Druck in Kapitel 1.2.2.

Der Unterdruck wird wie folgt erzeugt:

- bei Ottomotoren im Ansaugtakt im Saugrohr des Motors,
- bei Dieselmotoren und Elektrofahrzeugen oder Fahrzeugen mit Hybridantrieb durch eine Unterdruckpumpe.

Ein Beispiel für die Erzeugung von Unterdruck durch eine Unterdruckpumpe zeigen Bild 1.4 (schematisch) und Bild 1.5.

Bild 1.4
Unterdruckerzeugung
bei Dieselmotoren
und Elektrofahrzeugen
oder Fahrzeugen
mit Hybridantrieb
durch eine Unter-
druckpumpe (blau)
[Bild: Vorlage aus
Breuer/Bill, Hrsg.,
Bremsenhandbuch,
Springer, 2017]

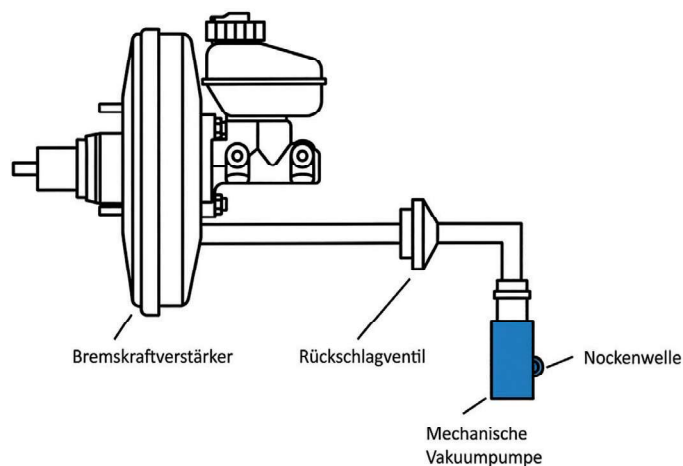


Bild 1.5 Beispiel für
eine Vakuumpumpe
mit Nockenwellenan-
trieb (rotes Gehäuse),
eingebaut im Vectra B
[Bild: Rheinmetall]



Bild 1.6 zeigt einen ausgebauten Unterdruck-Bremskraftverstärker und ein Schnittmodell. Der typische Aufbau eines Unterdruck-Bremskraftverstärkers ist in Bild 1.7 zu sehen.



Bild 1.6 Unterdruck-Bremskraftverstärker, rechts als Vollkörper abgebaut und links als Schnittmodell [Bild: Bosch]

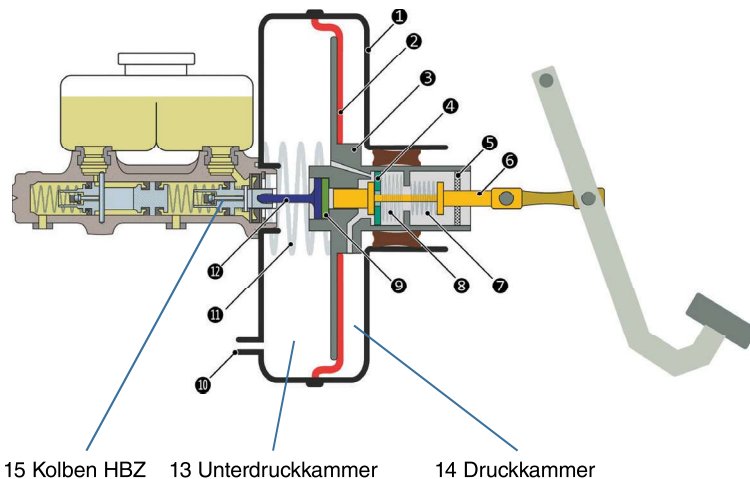


Bild 1.7 Typischer Aufbau eines Unterdruck-Bremskraftverstärkers [Bild: Vorlage Essenreiter/autoFACHMANN]

- 1 – Bremskraftverstärkergehäuse
- 2 – Membran
- 3 – Arbeitskolben
- 4 – Tellerventil
- 5 – Luftventil (mit Luftfilter)
- 6 – Kolbenstange mit Ventilkolben
- 7 – Druckfeder für Kolbenstange
- 8 – Druckfeder für Tellerventil

- 9 – Reaktionsscheibe (Gummi)
- 10 – Unterdruckanschluss
- 11 – Druckfeder für Arbeitskolben
- 12 – Druckstange
- 13 – Unterdruckkammer
- 14 – Druckkammer
- 15 – Kolben HBZ

Die Teilsysteme Arbeitskolben (3), Tellerventil (4), Kolbenstange mit Ventilkolben (6), Druckfeder für Kolbenstange (7) und Druckfeder für Tellerventil (8) bilden zusammen eine **Ventileinheit/ein Steuerventil** zum Öffnen und Schließen der Kanäle zwischen Unterdruckkammer (13) und Druckkammer (14)

Eine Membran (2) trennt die Unterdruckkammer (13) von der Druckkammer (14). Die Kolbenstange (6) überträgt die eingesteuerte Fußkraft über den Arbeitskolben (3) auf die Druckstange (12) und den Hauptbremszylinder.

Funktionsablauf der Bremskraftverstärkung

- Bei nicht betätigter Bremse sind Unterdruckkammer (13) und Druckkammer (14) über die Ventileinheit (5) miteinander verbunden. Über den Unterdruckanschluss (2) herrscht Unterdruck in beiden Kammern: Lösestellung.
- Sobald das Bremspedal betätigt wird, beginnt der Bremsvorgang. Dabei bewegt sich die Kolbenstange (6) in Richtung Membran.
- Nach kurzem Hub wird die Verbindung zwischen der Druckkammer (14) und der Unterdruckkammer (13) gesperrt; das Tellerventil schließt die beiden Kanäle zu den Kammern.
- Bei weiterer Bewegung der Kolbenstange (6) öffnet die Ventileinheit den Kanal zur Druckkammer, atmosphärischer Luftdruck strömt in die Druckkammer (14).
- In der Druckkammer (14) herrscht nun ein höherer Druck als in der Unterdruckkammer (13).
- Der Atmosphärendruck wirkt über die Membran (3) auf den Membranteller, an dem die Membran (2) anliegt.
- Weil die Ventileinheit vom Membranteller in Richtung Unterdruckkammer (13) mitgeführt wird, führt dies zu einer Unterstützung der Fußkraft.
- Die maximale Verstärkung ist abhängig von der wirksamen Membranfläche, der Fläche des Arbeitskolbens (3) sowie vom Atmosphärendruck und vom wirksamen Unterdruck.
- Nach Beendigung des Bremsvorgangs öffnet die Ventileinheit die Verbindung zwischen der Druckkammer (14) und der Unterdruckkammer (13) wieder; dadurch herrscht in beiden Kammern wieder der gleiche Druck (Unterdruck).
- Die Reaktionsscheibe (9) stellt Arbeitskolben (3), Membran (2) und Pedal wieder in die Ausgangsposition zurück

In Bild 1.8 ist eine Gegenüberstellung von Lösestellung und Teilbremsstellung eines typischen Unterdruck-Bremskraftverstärkers zu sehen.

Oben ist das Schnittbild der **Lösestellung** dargestellt, es ist dem Schnittbild in Bild 1.7 ähnlich: Die Bremse ist nicht betätigt. In beiden Kammern (Unterdruck- und Druckkammer) herrscht ein gleich großer Unterdruck von ca. 0,8 bar.

Wird die Bremse leicht bis mittelstark betätigt, wird der Betriebszustand **Teilbremsung** wirksam (Bild 1.8 unten).

Bei der **Teilbremsstellung** wird die Bremse leicht bis mittelstark betätigt. Das Steuer-ventil/die Ventileinheit (Nummern aus Bild 1.7) verschließt zuerst den Unterdruckkanal, durch den die Druckkammer mit der Unterdruckkammer verbunden ist. Durch die weitere Bewegung der Kolbenstange wird die Reaktionsscheibe (9) zusammengedrückt. Dieser zusätzliche Kolbenweg öffnet das Luftventil (5) und atmosphärischer Druck strömt in die Druckkammer. Dadurch entsteht eine Druckdifferenz von z.B. 0,3 bar (0,2 bar in der Unterdruckkammer und 0,5 bar in der Druckkammer). Die daraus resultierende Kraft wirkt auf den Arbeitskolben (3) und als Verstärkung (Boost) auf den über die Druckstange (12) verbundenen Kolben des Hauptbremszylinders, HBZ (15). Sobald sich der Arbeitskolben (3) weiterbewegt, wird die Luftzufuhr verschlossen.

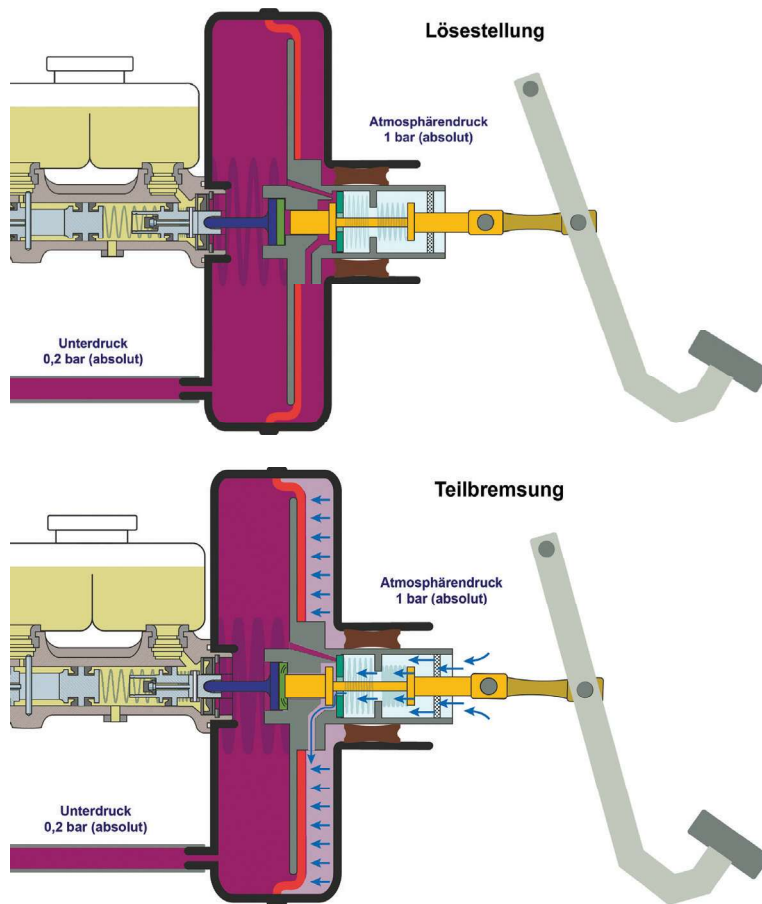


Bild 1.8
 Unterdruck-Bremskraftverstärker, oben: Lösestellung, unten: Teilbremsstellung.
 [Bild: Essenreiter/ autoFACHMANN]

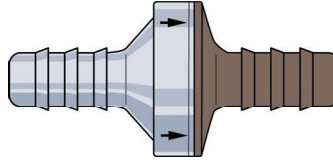
Ein kurzzeitiges Öffnen und Schließen führt dazu, dass der Druck in der Druckkammer nur mäßig ansteigt. Das ermöglicht eine gute Dosierung der Bremskraftverstärkung bei **Teilbremsungen**.

Bei einer **Vollbremsung** wird die Bremse mit voller Kraft betätigt. Das Steuerventil (wie im Text unter Bild 1.7 beschrieben) verschließt die Verbindung zur Unterdruckkammer und öffnet die Verbindung zur Außenluft, dadurch nimmt die Druckkammer den Atmosphärendruck an. Der Druck in der Unterdruckkammer beträgt ca. 0,2 bar, der in der Druckkammer ca. 1,0 bar. Der Differenzdruck von ca. 0,8 bar wirkt nun auf die Membran, die Kraft an der Druckstange wird maximal verstärkt.

Bei allen Bremsanlagen mit Unterdruck-Bremskraftverstärker befindet sich ein Rückschlagventil zwischen Unterdruckleitung, Unterdruckerzeuger und Bremskraftverstärker wie in Bild 1.4 zu sehen. Solange Unterdruck erzeugt wird, bleibt das Rückschlagventil geöffnet; es schließt bei abgestelltem Motor, damit der Unterdruck im Bremskraftverstärker erhalten bleibt. Dadurch ist auch bei abgestelltem Motor für einige Bremsbetätigungen eine Bremskraftunterstützung wirksam.

Bild 1.9 zeigt ein solches Rückschlagventil.

Bild 1.9 Vakuumrückschlagventil,
ausgebaut
[Bild: autoFACHMANN]



Vakuumrückschlagventile sind Einwegventile. Die typischen Einbauorte zeigt Bild 1.4. Sie ermöglichen die Speicherung des Unterdrucks und verhindern den Eintritt von Kraftstoffdämpfen in den Bremskraftverstärker. Der Pfeil auf dem Gehäuse des Vakuumrückschlagventils muss zur Unterdruckquelle führen.

InfoClick

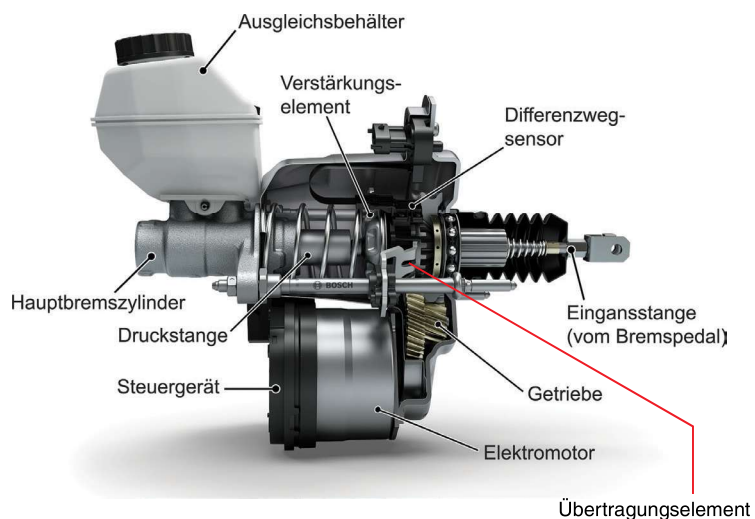
Funktion und Aufbau eines Vakuum-Bremskraftverstärkers sind auf InfoClick in einem Video dargestellt.

1.2.2 Elektromechanischer Bremskraftverstärker/iBooster

Für neuere Fahrzeuge, die keinen oder nur geringen Unterdruck vorhalten, wurden die Bremskraftverstärker weiterentwickelt. Eine solche Weiterentwicklung ist der elektromechanische Bremskraftverstärker, bei Bosch als iBooster bezeichnet. Der iBooster ist für alle Antriebskonzepte einsetzbar, einschließlich Hybrid- und rein elektrisch betriebene Fahrzeuge. Wie der Unterdruck-Bremskraftverstärker unterstützt der iBooster den Fahrer/die Fahrerin mit einer Hilfskraft (Elektromotor über Getriebe) beim Bremsvorgang.

Bild 1.10 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines elektromechanischen Bremskraftverstärkers.

Bild 1.10
Elektromechanischer
Bremskraftverstärker/
iBooster
[Bild: Vorlage Bosch aus
Kraftfahrtechnisches
Taschenbuch, 30.
Auflage]



Die Funktionsweise eines solchen Bremskraftverstärkers ist:

- Der iBooster erfasst die Bremsanforderung des Fahrers/der Fahrerin über einen integrierten Differenzwegsensor und leitet diese Information an das Steuergerät weiter.

- Das Steuergerät berechnet die Ansteuerung des Elektromotors, der sein Drehmoment über ein Getriebe in die geforderte Unterstützungskraft umsetzt.
- Dabei wird der Elektromotor so angesteuert, dass der Differenzweg zwischen der mit dem Bremspedal verbundenen Eingangsstange und dem mit dem Elektromotor verbundenen Übertragungselement auf Null ausgeglichen wird.
- Die Summe der vom Verstärker und dem Fahrer/der Fahrerin gelieferten Kraft wird in einem Standard-Hauptbremszylinder (Beschreibung in Kapitel 1.2.3) in Hydraulikdruck umgewandelt und auf die Radbremse weitergeleitet.
- Die sich ergebende Pedalcharakteristik des iBoosters hängt dabei von der konstruktiven Auslegung der Komponenten ab, z.B. von der maximalen Motorkraft. Damit können bestimmte Parameter im Gegensatz zum Unterdruck-Bremskraftverstärker zusätzlich durch die Software-Logik beeinflusst werden. So kann z.B. der CO₂-Ausstoß reduziert oder eine Redundanz für hochautomatisiertes Fahren ermöglicht werden.

Bei Fahrzeugen mit Elektro- oder Hybridantrieb in Kombination mit einem Elektronischen Stabilitätsprogramm (Electronic Stability Control, ESC) ermöglicht der iBooster, Bremsenergie bis zu einer Fahrzeugverzögerung von 0,3 g ohne Einfluss auf das Bremsgefühl zu rekuperieren, also Bremsenergie zurückzugewinnen. Die Verzögerungen der Radbremse und der E-Maschine ohne Zusatzkomponenten müssen dabei variabel aufeinander abgestimmt sein.

Bei Hybridfahrzeugen reduziert dieses regenerative/rekuperative Bremsen den Kraftstoffverbrauch und den CO₂-Ausstoß, besonders bei häufigem Bremsen und Beschleunigen, also vor allem im Stadtverkehr.

Mithilfe der Motor-Getriebe-Einheit kann der iBooster selbstständig, also ohne Betätigung des Bremspedals, Bremsdruck aufbauen. Im Vergleich zu typischen Systemen der Fahrdynamikregelung wird der erforderliche Bremsdruck schneller aufgebaut und genauer eingestellt, was beispielsweise für Automatische Notbremssysteme und ACC-Funktionen von Vorteil ist (ACC = Adaptive Cruise Control = Adaptive Abstandsregelung).

Der iBooster benötigt nur dann Energie, wenn auch eine Bremskraftverstärkung angefordert wird. Diese Verringerung der Energieaufnahme führt damit – neben dem rekuperativen Bremsen – zu einer weiteren Verbesserung der CO₂-Bilanz. Außerdem entfällt die elektrische Vakuumpumpe.

Im Zusammenspiel mit der Fahrdynamikregelung bietet der iBooster die für die automatisiert fahrenden Fahrzeuge erforderliche Redundanz des Bremssystems. Beide Systeme, Fahrdynamikregelung und iBooster, sind unabhängig voneinander in der Lage, Bremsdruck aufzubauen und das Fahrzeug zu verzögern.

InfoClick

Den iBooster in Aktion sieht man auf InfoClick in einem Video.

1.2.3 Tandem-Hauptbremszylinder mit Zentralventil und mit gefesselter Kolbenfeder

Im Tandem-Hauptbremszylinder (THBZ) wird die vom Fahrer/der Fahrerin eingesteuerte und vom Bremskraftverstärker verstärkte Fußkraft in hydraulischen Bremsdruck umgewandelt.

Tandem-Hauptbremszylinder bestehen aus zwei hintereinander geschalteten Zylindern (Tandemzylinder). Deren Zusammenwirken zur Kraftverstärkung ist das **Hydraulisches Prinzip**, es ist in Kapitel 4 zu physikalisch-technischen Grundlagen ausführlich beschrieben.