Zum Glück ist ESP an Bord...

Dämmerung, nasse Fahrbahn, schlechte Sicht – und plötzlich läuft ein Kind auf die Straße – der Alptraum jedes Autofahrers. Jetzt braucht der Fahrer sein ganzes Können und die beste Hilfe, die er bekommen kann:

ESP – das Elektronische Stabilitätsprogramm von Continental Teves.

ESP wertet ständig die Messdaten des Lenkwinkelsensors, der Raddrehzahlsensoren, des Querbeschleunigungs- sowie des Gierratensensors aus und erkennt rechtzeitig, wenn das Fahrzeug in einen instabilen Fahrzustand zu kommen droht. In Sekundenbruchteilen greift ESP gezielt über Motorelektronik und Bremssystem ein und hilft dem Fahrer durch den aktiven Aufbau richtungsstabilisierender Bremskräfte, die kritische Situation zu bewältigen.

Unser ESP basiert auf dem leistungsstarken Elektronischen Bremssystem MK60. ESP hat sich als entscheidender Beitrag zu mehr Fahrsicherheit mittlerweile sogar in der Kompaktklasse etabliert. Es wird aufgrund seiner flexiblen Struktur auch den Kern unserer zukünftigen intelligenten Fahrwerksysteme bilden.

Continental
TEVES

Scheibenbremssysteme • Elektronische Bremssysteme • Druckluft Management
• Luftfederung • Telematik

Alles, was Sie über **Bremssysteme** wissen müssen

Integrated **DYNAMICS**

Haldex

Haldex Europe S.A.

30, rue du Ried, 67728 Hoerdt Cedex, Weyersheim (Strasbourg).

Phone: +33-3 88 68 22 00 Fax: +33-3 88 68 22 09 E-mail: info@hfr.haldex.com

www.brake-eu.haldex.com

FTE BRAKE SYSTEMS FOR CARS

FTE BREMSKRAFTVERSTÄRKER

überzeugen durch neueste
Technologie wie

- Leichtbau
- geringe Ansprechkräfte
- gute Dosierbarkeit

Optional mit

- Dual Rate-Funktion
- Motorraumansaugung
- Sensor für Bremslicht
- Aussteuerpunktsensor

FTE BRAKE SYSTEMS FOR BIKES AND SCOOTERS

Sicherheit für jeden Fahrer in allen Bremssituationen

Sicherheit

- ABS-Funktion
- schneller Druckaufbau
- Integralbremsfunktion
- adaptive Bremskraftverteilung

Komfort

- kein Pulsieren am Betätigungshebel
- Servo-Unterstützung

CORA

Combined RAPid Brake System

Das Bremssystem für Scooter, Enduros, Sportmotorräder mit geringem Gewicht und Einbauplatz.

CORA BB

Combined RAPid Brake System for Big Bikes

Das Top-Bremssystem auf dem Zweiradmarkt.

www.fte.de

FTE automotive

FTE automotive GmbH & Co. KG
Postfach 11 80 · D-96104 Ebern
Andreas-Humann-Str. 2 · D-96106 Ebern
Telefon + 49 (0) 9531 81 0
Fax + 49 (0) 9531 81 33 77

FTE
automotive

Bert Breuer/
Karlheinz H. Bill (Hrsg.)

Bremsenhandbuch

Aus dem Programm

Kraftfahrzeugtechnik

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von F. Schäfer und R. van Basshuysen

Bremsenhandbuch

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

Nutzfahrzeugtechnik

herausgegeben von E. Hoepke

Verbrennungsmotoren

von E. Köhler

Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen

von F. Kramer

Motorradtechnik

von J. Stoffregen

Omnibustechnik

von O.-P. A. Bühler, herausgegeben vom VDA

Automotive Software Engineering

von J. Schäuffele und T. Zurawka

Kurbeltriebe

von S. Zima

Die BOSCH-Fachbuchreihe

- **Ottomotor-Management**
 - **Dieselmotor-Management**
 - **Autoelektrik/Autoelektronik**
 - **Fahrsicherheitssysteme**
 - **Fachwörterbuch Kraftfahrzeugtechnik**
 - **Kraftfahrtechnisches Taschenbuch**
- jetzt auch als CD in deutscher
oder mehrsprachiger Version**

herausgegeben von ROBERT BOSCH GmbH

vieweg

Bert Breuer/
Karlheinz H. Bill (Hrsg.)

Bremsenhandbuch

**Grundlagen, Komponenten,
Systeme, Fahrdynamik**

Mit 468 Abbildungen

ATZ-MTZ-Fachbuch

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Das Werk entstand mit freundlicher Unterstützung der Continental Teves AG.

1. Auflage September 2003

Alle Rechte vorbehalten

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2003

Ursprünglich erschienen bei Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage
GmbH, Wiesbaden 2003

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2003

www.vieweg.de

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

Technische Redaktion: Imke Zander, Wiesbaden

Konzeption und Layout des Umschlags: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Bilder: Graphik & Text Studio, Dr. Wolfgang Zettlmeier, Barbing

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN 978-3-663-09442-5

ISBN 978-3-663-09441-8 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-663-09441-8

Vorwort

Im deutschsprachigen Raum gibt es seit 1935 das sogenannte TEVES-Bremsenhandbuch, das mit seinen Neuauflagen bis in die heutige Zeit ein bewährter Ratgeber zu Bremsenfragen auf dem Gebiet des Personenwagens ist. Ihm wurde vom gleichen Bremsenhersteller 1995 ein Bremsen-Handbuch Elektronische Bremssysteme an die Seite gestellt.

Auf Anregung des Vieweg Verlages wurde das Konzept erweitert und den Bedürfnissen einer stark erweiterten Zielgruppe angepasst, die Anspruch an ein herstellerneutrales, grundlagen- und gleichzeitig anwendungsbezogenes Fachbuch signalisierte.

Mikroelektronik und Mechatronik haben das technische Potenzial und die Funktionalität von Bremsanlagen enorm gesteigert. Hydraulisch, elektrohydraulisch oder elektromechanisch betätigte Bremsen und die gesamte Bremsanlage mit all ihren Komponenten sind ein unverzichtbarer Teil des heute bereits erreichten bzw. zukünftig noch möglichen Niveaus der Sicherheit, der Fahrerassistenz und der Unfallvermeidung, aber auch des Komforts. Hierbei ist eine mit anderen Subsystemen des Kraftfahrzeuges wie Lenkung, Radaufhängung oder Reifen zusammenwirkende Einbindung in das Gesamtsystem Umwelt – Fahrer – Fahrzeug unerlässlich. Herausgeber und Verlag legen mit diesem Bremsenhandbuch der Fachwelt ein geschlossenes Gesamtwerk über Bremsen und Bremssysteme für Kraftfahrzeuge aller Art in der Form eines neutralen technischen Fachbuches vor.

Es behandelt umfassend Grundlagen, Anforderungen, Auslegungen, Aufbau, Gestaltungen, Komponenten und Teilsystemfunktionen im modernen Kraftfahrzeug. Das Buch wendet sich dabei den Personenwagen, Nutzfahrzeugen, Anhängern, geländegängigen Rad- und Kettenfahrzeugen, Motorrädern, Rennfahrzeugen und sogar Flugzeugen zu.

Den mechatronischen Anwendungen, den Materialien und Prozessen, der Prüfung, Zulassung und Bewertung, der Wartung/Reparatur und den Zukunftsaspekten sind eigene Kapitel gewidmet.

Unsere Zielgruppe sind Ingenieure, Techniker und sonstiges technisches Personal in der Konzeption, Konstruktion, Entwicklung, Erprobung, Herstellung, Wartung und Überwachung von Straßenfahrzeugen und deren Bremsanlagen sowie Lehrende, Forschende und besonders auch Studierende des Ingenieur- und Kraftfahrzeugwesens.

Wir haben die vom Vieweg Verlag an uns herangetragene Aufgabe als Herausgeber dieses neuen Werkes gerne angenommen und bedanken uns bei Frau Imke Zander und Herrn Ewald Schmitt herzlich für die hervorragende Zusammenarbeit.

Den über 50 Autoren aus Industrie, Hochschulen und anderen Institutionen danken wir für ihre Mitwirkung an diesem Buch und für ihre engagierte Arbeit als Verfasser der von ihnen gestalteten Buchkapitel.

Seeheim-Jugenheim/Berlin im August 2003

*Bert Breuer
Karlheinz Bill*

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

1	Zur Geschichte der Kraftfahrzeugbremse	Dr. Peter Rieth
2	Der Bremsvorgang – Ablauf, Einflüsse und Anforderungen	Prof. Dr.-Ing. Claus Wolff
3	Fahrzeugtechnische Anforderungen	Dr.-Ing. Ulrich Eichhorn/Dipl.-Ing. Karl Horst Fuhrmann
4	Menschliche Anforderungen	Dr.-Ing. Bettina Abendroth/ Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau/ Dipl.-Ing. Jochen Weiße
5	Interaktion Fahrbahn – Reifen – Bremse	Prof. Heinrich Huinink
6	Auslegung und Simulation von Pkw-Bremsanlagen	Dipl.-Ing. (TU) Josef Pickenhahn/ Dipl.-Ing. (FH) Thomas Straub
7	Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen	Dipl.-Ing. Gunther Buschmann/Dipl.-Ing. James Remfrey
8	Bremssysteme und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen	Prof. Dr.-Ing. habil. Egon-Christian von Glasner
9	Nutzfahrzeugbremsen	Dipl.-Ing. Hans Baumgartner/Dr. Eduard Gerum/ Dipl.-Ing. Alf Siebke
10	Bremsverhalten und Bremsen von Einspurfahrzeugen	Dr. Markus Braunsperger/Dipl.-Ing. Helmut Köhler Dipl.-Ing. Ralf Lewien/Dipl.-Ing. (FH) Horst Reichl/ Dipl.-Ing. Gert Vilsmeier/Dipl.-Ing. Hans-Albert Wagner
11	Auflaufbremsanlagen	Hermann Hofstetter/Johann Loipl/ Dipl.-Ing. (FH) Josef Strasser
12	Bremsen von Off-Road Radfahrzeugen	Dipl.-Ing. Hermann Beck/ Dipl.-Ing. Wolfgang Grünbeck
13	Bremsen für Kettenfahrzeuge	Prof. Dr.-Ing. Manfred Hirt/ Dipl.-Ing. Max Witzemberger
14	Flugzeugbremsen	Dipl.-Ing. Gerd Roloff/Burkard Ohly
15	Bremssysteme für Rennwagen	Dr. Riccardo Cesarini/Ing. Mauro Piccoli
16	Grundlagen elektrisch betätigter Pkw-Bremssysteme	Prof. Dr.-Ing. Karlheinz H. Bill
17	Elektrohydraulisch betätigte Bremsen	Dr.-Ing. Hans Georg Engel
18	Elektromechanisch betätigte Bremsen	Dipl.-Ing. Gunther Buschmann
19	Die Bremsanlage im Fahrerassistenzsystem	Dr. Anton van Zanten
20	Die Bremse im mechatronischen Fahrwerk	Dipl.-Ing. Steffen Gruber/Dipl.-Ing. Jochen Reichel/ Dipl.-Ing. Markus Schumann/Dipl.-Ing. Martin Semsch/ Dipl.-Ing. Thomas Strothjohann/ Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
21	Eigenschaften der Reibpaarung im Bremsprozess	Dipl.-Ing. Claus Kleinlein/Prof. Dr.-Ing. Dietrich Severin
22	Schwingungen und Geräusche	Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Brunner/ Dipl.-Ing. Lars Koch
23	Reibbeläge	Dr. rer. nat. Christian Wiaterek
24	Bremsflüssigkeiten	Dr. Harald Dietl
25	Bremsenprüfstände	Dieter Weiss
26	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremsanlagen	Dr.-Ing. Thomas Aubel/Dipl.-Ing. Hans-Wilfried Mäder
27	Regelwerke und Prüfverfahren	Dipl.-Ing. Hans-Thomas Ebner
28	Wartung und Diagnose von Bremsanlagen	Ulrich Güllering/Dipl.-Ing. (FH) Peter Jobelius/ Dipl.-Ing. Roman Rotter
29	Entwicklungstendenzen und Zukunftsaspekte	Dr. Peter Rieth

Firmen- und Hochschulverzeichnis

Firmen

Airbus Deutschland GmbH, Hamburg	Dipl.-Ing. Gerd Roloff
BMW Motorrad, München	Dr. Markus Braunsperger Dipl.-Ing. Helmut Köhler Dipl.-Ing. Ralf Lewien Dipl.-Ing. Horst Reichl Dipl.-Ing. Gert Vilsmeier Dipl.-Ing. Hans-Albert Wagner
Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen	Dr. Anton van Zanten
Brembo S.p.A., Curno	Ing. Riccardo Cesarini Ing. Mauro Piccoli
Clariant GmbH Division FUN, Burgkirchen	Dr. Harald Dietl
Continental AG, Hannover	Prof. Heinrich Huinink
Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt	Dipl.-Ing. Gunther Buschmann Dipl.-Ing. James Remfrey Dr.-Ing. Peter Rieth
DaimlerChrysler AG, Sindelfingen	Dr.-Ing. Hans Georg Engel
DaimlerChrysler AG, Stuttgart	Prof. Dr.-Ing. habil. Egon-Christian von Glasner
Knorr-Bremse SfN GmbH, München	Dipl.-Ing. Hans Baumgartner Dr. Eduard Gerum Dipl.-Ing. Alf Siebke
Knott GmbH, Eggstätt	Hermann Hofstetter Johann Loipl Dipl.-Ing. Josef Strasser
Renk AG, Augsburg	Prof. Dr.-Ing. Manfred Hirt Dipl.-Ing. Max Witzenberger
RWTÜV Fahrzeug GmbH, Essen	Prof. Dr.-Ing. Claus Wolff
Schenck Pegasus GmbH	Dieter Weiss
TMD Friction GmbH, Leverkusen	Dr. rer. nat. Christian Wiaterek
TRW KFZ Ausrüstung, Neuwied	Ulrich Güllering Dipl.-Ing. (FH) Peter Jobelius Dipl.-Ing. Roman Rotter

TRW Automotive, Koblenz	Dipl.-Ing. (TU) Josef Pickenhahn
TÜV Automotive GmbH, München	Dipl.-Ing. (FH) Thomas Straub
	Dr.-Ing. Thomas Aubel
	Dipl.-Ing. Hans-Wilfried Mäder
Verband der Automobilindustrie (VDA), Frankfurt	Dipl.-Ing Hans-Thomas Ebner
Volkswagen AG, Wolfsburg	Dr. Ulrich Eichhorn (ausgeschieden)
	Dipl.-Ing. Karl Horst Fuhrmann
ZF Passau GmbH, Passau	Dipl.-Ing. Hermann Beck
	Dipl.-Ing. Wolfgang Grünbeck

Universitäten und Hochschulen

FHTW Berlin	Prof. Dr.-Ing. Karlheinz H. Bill
TU Berlin	Prof. Dr.-Ing. Dietrich Severin
	Dipl.-Ing. Claus Kleinlein
TU Darmstadt	Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau
	Dr.-Ing. Bettina Abendroth
	Dipl.-Ing. Jochen Weiße
TU Darmstadt	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
	Dipl.-Ing. Steffen Gruber
	Dipl.-Ing. Jochen Reichel (ausgeschieden)
	Dipl.-Ing. Markus Schumann
	Dipl.-Ing. Martin Semsch (ausgeschieden)
	Dipl.-Ing. Thomas Strothjohann
TU Dresden	Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Brunner
	Dipl.-Ing. Lars Koch

Autorenverzeichnis Bremsenhandbuch

Dr.-Ing. Bettina Abendroth	TU Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft
Dr.-Ing. Thomas Aubel	Geschäftsführer, TÜV Automotive GmbH, München
Dipl.-Ing. Hans Baumgartner	Leiter Vorentwicklung Radbremse, Knorr-Bremse SfN, München
Dipl.-Ing. Hermann Beck	Leiter des Geschäftsfeldes A-Baumaschinensysteme, ZF Passau GmbH, Passau
Prof. Dr.-Ing. Karlheinz H. Bill	FHTW Berlin, FB Ingenieurwissenschaften II, Fahrzeugtechnik
Dr. Markus Braunsperger	Leiter Forschung und Entwicklung, BMW Motorrad, BMW AG, München
Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Brunner	Leiter des Lehrstuhls für Kraftfahrzeug- und Antriebstechnik, TU Dresden, Institut für Verbrennungsmotoren u. Kraftfahrzeuge (IVK)
Dipl.-Ing. Gunther Buschmann	Systemauslegung EHB, Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt
Ing. Riccardo Cesarini	B.U. Racing Director, Brembo S.p.A., Curno
Dr. Harald Dietl	Clariant GmbH, Divison FUN, Burgkirchen
Dipl.-Ing. Hans-Thomas Ebner	Leiter der Abteilung Technik, Verband der Automobilindustrie (VDA), Frankfurt
Dr.-Ing. Ulrich Eichhorn	ehem. Leiter der Konzernforschung, Volkswagen AG, Wolfsburg jetzt: Vorstand Bentley Motors, Crewe
Dr.-Ing. Hans Georg Engel	Leiter Entwicklung Fahrwerk und Fahrwerksystem DaimlerChrysler AG, Sindelfingen
Dipl.-Ing. Karl Horst Fuhrmann	Leiter Pkw-Fahrwerk-Entwicklung, Volkswagen AG, Wolfsburg
Dr. Eduard Gerum	Leiter Entwicklung Bremssysteme, Knorr-Bremse SfN, München
Prof. Dr.-Ing. habil. Egon-Christian von Glasner	Advanced Product Engineering, DaimlerChrysler AG, Stuttgart
Dipl.-Ing. Steffen Gruber	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU Darmstadt, FG Fahrzeugtechnik (fzd)

Dipl.-Ing. Wolfgang Grünbeck	Versuch/Geschäftsfeld A-Baumaschinensysteme, ZF Passau GmbH, Passau
Ulrich Güllering	Documentation & Publication Manager KFZ Mechaniker-Meister, KFZ Elektro-Meister, TRW KFZ Ausrüstung GmbH, Neuwied
Prof. Dr.-Ing. Manfred Hirt	Sprecher des Vorstandes Renk AG, Augsburg
Hermann Hofstetter	Leiter Konstruktion/Entwicklung Trailertechnik, Knott GmbH, Eggstätt
Prof. Heinrich Huinink	ehem. Leiter Strategische Technologie, Continental AG, Hannover
Dipl.-Ing. (FH) Peter Jobelius	Product Engineer, TRW KFZ Ausrüstung GmbH, Neuwied
Dipl.-Ing. Claus Kleinlein	Fachgebiet Fördertechnik und Getriebetechnik im Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, TU Berlin
Dipl.-Ing. Lars Koch	Forschungsingenieur am Lehrstuhl für Kraftfahrzeug- und Antriebstechnik, TU Dresden, Institut für Verbrennungsmotoren u. Kraftfahrzeuge (IVK)
Dipl.-Ing. (FH) Helmut Köhler	BMW AG, München
Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau	TU Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft
Dipl.-Ing. (FH) Ralf Lewien	BMW AG, München
Johann Loipl	Leitung Konstruktion Achsen, Knott GmbH, Eggstätt
Dipl.-Ing. Hans-Wilfried Mäder	TÜV Automotive GmbH, München
Burkard Ohly	Aerospace System Consultant, vorm. DASA/EADS, Wackersberg
Ing. Mauro Piccoli	F1 Race Engineer, Brembo S.p.A., Curno
Dipl.-Ing. (TU) Josef Pickenhahn	Vice President Engineering – Braking, TRW Automotive, Koblenz
Dipl.-Ing. Jochen Reichel	ehem. Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU Darmstadt, FG Fahrzeugtechnik (fzd) jetzt: Volkswagen AG
Dipl.-Ing. (FH) Horst Reichl	Leiter Entwicklung Fahrwerk, BMW Motorrad, München
Dipl.-Ing. James Remfrey	Leiter System-/Produktstrategie, Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt

Dr.-Ing. Peter Rieth	Leiter Zentrale Technik und Fahrzeugsysteme, Mitglied der Geschäftsleitung, Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt
Dipl.-Ing. Gerd Roloff	Airbus Deutschland GmbH, Hamburg
Dipl.-Ing. Roman Rotter	Technical Manager Chassis Systems Europe, TRW KFZ Ausrüstung GmbH, Neuwied
Dipl.-Ing. Markus Schumann	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU Darmstadt, FG Fahrzeugtechnik (fzd)
Dipl.-Ing. Martin Semsch	ehem. Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU Darmstadt, FG Fahrzeugtechnik (fzd) jetzt: Continental Teves
Prof. Dr.-Ing. Dietrich Severin	Fachgebiet Fördertechnik und Getriebetechnik im Institut für Konstruktion, Mikro- und Medizintechnik, TU Berlin
Dipl.-Ing. Alf Siebke	Leiter Technik Radbremse, Knorr-Bremse SfN, München
Dipl.-Ing. (FH) Josef Strasser	Leiter Konstruktion Fahrzeugverbindende Teile, Knott GmbH, Eggstätt
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Straub	Technischer Direktor – Advanced Control Systems, TRW Automotive, Koblenz
Dipl.-Ing. Thomas Strothjohann	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU Darmstadt, FG Fahrzeugtechnik (fzd)
Dipl.-Ing. (FH) Gerd Vilsmeier	BMW AG, München
Dipl.-Ing. (TU) Hans-Albert Wagner	BMW AG, München
Dieter Weiss	Schenck Pegasus GmbH, Darmstadt
Dipl.-Ing. Jochen Weiße	TU Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft
Dr. rer. nat. Christian Wiaterek	Leiter Product Customizing, TMD Friction GmbH, Leverkusen
Dipl.-Ing. Thomas Strothjohann	Fachgebietsleiter Fahrzeugtechnik, TU Darmstadt, FG Fahrzeugtechnik (fzd)
Dipl.-Ing. Max Witzemberger	Renk AG, Augsburg
Prof. Dr.-Ing. Claus Wolff	Vorsitzender der Geschäftsführung, RWTÜV Fahrzeug GmbH, Essen
Dr. Anton van Zanten	Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen

Inhaltsverzeichnis

1	Zur Geschichte der Kraftfahrzeugbremse	1
1.1	Mechanisch betätigte Fahrzeugbremsen	1
1.2	Die hydraulisch betätigte Vierradbremse	3
1.3	Die Bremse mit innerer Verstärkung	4
1.4	Mehrkreis-Bremsanlagen	5
1.5	Von der Muskelkraft- zur Fremdkraftanlage	6
1.6	Die hydraulisch betätigte Scheibenbremse	7
1.7	Elektronische Bremsregelsysteme	8
2	Der Bremsvorgang – Ablauf, Einflüsse und Anforderungen	10
2.1	Bremsung als Fahraufgabe	10
2.2	Besonderheiten des Bremsvorgangs	11
2.3	Bremswege	12
2.4	Bremsstabilität	14
2.5	Ausfallsicherheit	15
3	Fahrzeugtechnische Anforderungen	17
3.1	Leistung	17
3.1.1	Bremsweg	17
3.1.2	Standfestigkeit	18
3.1.3	Unebenheit der Straße	19
3.1.4	Reibwertabhängigkeit	20
3.2	Fahrzeugverhalten	21
3.2.1	Stabilität	21
3.2.2	Aufbaunicken	24
3.3	Betätigung/Bedienung	26
3.3.1	Ansprechen und Dosierbarkeit	26
3.3.2	Kräfte, Wege, Kennung	27
3.4	Package/Einbausituation	28
3.4.1	Baugrößen und Einbauverhältnisse	28
3.4.2	Massen	29
3.5	Energieversorgung Bremskraftverstärkung	30
3.6	Thermische Randbedingungen	31
3.7	Umgebungsbedingungen	33
3.8	Geräusche und Schwingungen (NVH)	33
3.8.1	Vibrationen	34
3.8.2	Geräusche	35
3.9	Crashanforderungen	35
3.10	Umweltschutz	36
3.10.1	Bremsbeläge	36
3.10.2	Korrosionsschutz	36
3.10.3	Bremsflüssigkeit	36
3.11	Energierückgewinnung	36
4	Menschliche Anforderungen	38
4.1	Einleitung	38
4.2	Bremssituation	38
4.2.1	Informationsaufnahme	40
4.2.2	Informationsverarbeitung i. e. S.	40
4.2.3	Reaktion	42
4.2.4	Zeitlicher Ablauf des Informationsverarbeitungsprozesses beim Bremsen	42

4.3	Bremshandlung	42
4.3.1	Fußbewegung	42
4.3.2	Betätigung des Bremspedals	43
4.4	Ergonomische Bremsengestaltung	44
4.4.1	Geometrie	44
4.4.2	Pedalkennlinien	45
4.4.3	Alternative Konzepte	45
4.4.4	Bremsassistenten	46
5	Interaktion Fahrbahn-Reifen-Bremse	49
5.1	Einleitung	49
5.2	Kraftübertragung Reifen – Fahrbahn	49
5.2.1	Gummireibung	49
5.2.2	Wechselwirkung Reifen-Fahrbahn	50
5.2.3	Aufbau Reifenkräfte	52
5.2.3.1	Bremskräfte/Umfangskräfte	52
5.2.3.2	Schräglauf; Kräfte und Momente	54
5.3	Interaktion Reifen-Bremse	55
5.3.1	Reifenmodelle	55
5.3.2	Dynamische Umfangskraft-Schlupf-Charakteristik des Reifens beim Bremsen	56
5.3.3	Umfangskräfte beim ABS-Bremsen	56
5.3.4	Kombinierte Umfangs- und Seitenkraft, Bremsen bei Seitenkraftbedarf	57
5.4	Integration des Reifens in das Gesamtsystem Fahrzeug	59
5.4.1	Produktoptimierung Reifen – ABS-Regelung am Beispiel Winterreifen	59
5.5	Ausblick	61
6	Auslegung und Simulation von Pkw-Bremsanlagen	62
6.1	Grundlagen der Bremsdynamik	63
6.2	Grundlagen der Bremsenberechnung	65
6.2.1	Pedaleinheit	66
6.2.2	Unterdruckverstärker mit Hauptbremszylinder	66
6.2.3	Bremse	67
6.2.3.1	Scheibenbremse	67
6.2.3.2	Trommelbremse	67
6.3	Bremssystem-Auslegung	68
6.3.1	Bremskreisaufteilung	68
6.3.2	Auslegungskriterien für Bremssysteme	69
6.3.3	Auslegung von Radbremsen	71
6.3.3.1	Bremsleistung	71
6.3.3.2	Thermische Auslegung	71
6.3.3.3	Lebensdauer/Verschleiß	72
6.3.3.4	Komfort	73
6.3.3.5	Kosten	75
6.3.3.6	Gewicht	75
6.3.4	Auslegung von Bremsregelsystemen	75
6.3.4.1	Auslegungskriterien für ABS-Anlagen	76
6.3.4.2	Auslegungskriterien für die Antriebsschlupfregelung	77
6.3.4.3	Auslegungskriterien für die Fahrdynamikregelung	78
6.3.5	Auslegungskriterien von Elektro-Hydraulischen Bremssystemen	79
6.4	Simulation von Bremssystemen	80
6.4.1	Bremssystem-Auslegung	80
6.4.2	Analyse der Bremssystemkomponenten mit der Finite-Elemente-Methode	81
6.4.3	Simulation von Bremssystemkomponenten	83
6.4.4	Gesamtsystem-Simulation	84
7	Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen	86
7.1	Einführung	86
7.2	Grundlagen	86

7.2.1	Physikalische Grundlagen	86
7.2.2	Arten von Bremsanlagen	87
7.3	Bremskraftverteilung	87
7.4	Pedalcharakteristik (Ergonomie)	89
7.5	Betätigung	90
7.5.1	Tandem-Hauptzylinder	90
7.5.2	Ausgleichbehälter	92
7.5.3	Bremskraftverstärker	92
7.5.3.1	Vakuum-Bremskraftverstärker	92
7.5.3.2	Weitere Bauformen von Vakuum-Bremskraftverstärkern	93
7.5.3.3	Spezifische Themen und Begriffe rund um den Verstärker	94
7.5.3.4	Vakuumpumpe	94
7.5.3.5	Funktionserweiterte Vakuum-Bremskraftverstärker	94
7.5.4	Bremskraftverteiler	97
7.5.5	Übertragungseinrichtungen	98
7.6	Radbremse	99
7.6.1	Trommelbremsen	99
7.6.1.1	Bauarten	99
7.6.1.2	Bremstrommeln	100
7.6.1.3	Nachstellung	101
7.6.1.4	Feststellbremsen	101
7.6.2	Scheibenbremsen	101
7.6.2.1	Sattelbauarten	101
7.6.2.2	Bremsscheiben	105
7.6.3	Sattel-Werkstoffe	106
7.6.4	Spezifische Themen und Begriffe rund um die Scheibenbremse	107
7.7	Elektronische Regelsysteme	108
7.7.1	Allgemeines	108
7.7.2	Physikalische Grundlagen	108
7.7.3	Sensoren für elektronische Brems-Regelsysteme	109
7.7.3.1	Raddrehzahlsensoren	109
7.7.3.2	Wegsensor in der Betätigung	111
7.7.3.3	Beschleunigungsschalter/Beschleunigungssensor	111
7.7.3.4	Lenkradwinkelsensor	111
7.7.3.5	Querbeschleunigungssensor	111
7.7.3.6	Gierratsensor	112
7.7.3.7	Drucksensor	112
7.7.4	Hydraulisch/elektronische Regeleinheit für das elektronische (Brems-)Regelsystem	112
7.7.5	Bremsen mit Antiblockiersystem (ABS)	114
7.7.5.1	ABS-Funktionalität	114
7.7.5.2	Arbeitsbereich des ABS	115
7.7.6	Elektronische Bremskraftverteilung (EBV)	117
7.7.7	Erweitertes Stabilitäts-Bremssystem	117
7.7.8	Antriebsschlupfregelung (ASR)	117
7.7.8.1	ASR-Funktionalität	117
7.7.8.2	Bremsenregelung der ASR (BASR)	118
7.7.8.3	Motorregelung der ASR (MASR)	118
7.7.8.4	Motor-Schleppmomenten-Regelung (MSR)	118
7.7.9	Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)	118
8	Bremssysteme und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen	120
8.1	Auslegung einer Bremsanlage	120
8.1.1	Fahrzeugstabilität beim Bremsen	120
8.1.2	Verteilung der Bremskräfte auf die Achsen	120
8.1.3	Der Bremsvorgang im Bremskraftverteilungsdiagramm	123
8.1.4	Bremskraftsteuerungen (ALB)	123
8.1.4.1	Bremskraftbegrenzer	123
8.1.4.2	Bremskraftminderer	124

8.1.5	Einfluss von Motorbremsmomenten, Massenträgheitsmomenten und Bremsmomenten von Dauerbremsanlagen	124
8.1.6	Ermittlung von Kennwertschwankungen und ihr Einfluss auf die Bremskraftverteilung	126
8.1.7	Bremskreisaufteilungen und Bremskreisausfall	126
8.2	Bremsanlagen für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge	128
8.2.1	Bremsanlagenaufbau	128
8.2.2	Radbremzen und Betätigungskomponenten	130
8.3	Dauerbremsanlagen	132
8.3.1	Motorbremssysteme	132
8.3.2	Retarder	133
8.4	Brems- und Antriebsschlupf-Regelsysteme	135
8.4.1	Antiblockiersysteme	135
8.4.2	Traktionsregelungen	136
8.5	Elektronisches Bremsenmanagement	137
8.5.1	Integration von Dauerbremsanlagen	139
8.5.2	Stabilitätsregelung mit integrierter Überschlagerverhinderung	140
8.5.3	Optimierung der Kompatibilität zwischen Zug- und Anhängerfahrzeug	141
8.5.4	Bremsassistent	141
8.5.5	Rückrollsperr	142
8.5.6	Bremsbelagverschleißregelung	142
8.5.7	Abstandsregeltempomat	142
8.5.8	Systeme zur automatischen Fahrzeugführung	143
8.6	Systemintegration und elektronische Vernetzung	144
8.7	Zusammenfassende Betrachtung von X-by-wire-Systemen	144
9	Nutzfahrzeugbremsen	146
9.1	Bauarten von druckluftbetätigten NfZ-Bremsen	146
9.1.1	Trommelbremsen	146
9.1.2	Scheibenbremsen	146
9.2	Aufbau und Wirkungsweise der druckluftbetätigten Schiebesattel-Scheibenbremse	147
9.2.1	Betätigungssystem	147
9.2.1.1	Betriebsbremse	147
9.2.1.2	Feststell- und Hilfsbremse	148
9.2.2	Automatisches Verschleißnachstellsystem	148
9.2.3	Nachstellverhalten	149
9.2.4	Bedeutung des Lüftspieles	149
9.3	Leistungs- und Lebensdauerverhalten	150
9.3.1	Auslegungsdaten	150
9.3.1.1	Dauerhaltbarkeit	151
9.3.1.2	Dauerbremsleistung	151
9.4	Reibkörper	152
9.4.1	Bremsbeläge	152
9.4.2	Bremsscheibe	153
9.5	Entwicklung und Erprobung von Bremse und Reibkörpern	156
10	Bremsverhalten und Bremsen von Einspurfahrzeugen	159
10.1	Fahrdynamik von Einspurfahrzeugen	159
10.2	Bremsverhalten von Einspurfahrzeugen	160
10.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	165
10.4	Bremssysteme von Einspurfahrzeugen	166
10.4.1	Der Bremssattel	166
10.4.2	Bremsscheiben	169
10.4.3	Bremsbeläge	172
10.5	Auslegung des Bremssystems	173
10.6	Integralbremssysteme und Bremsregelsysteme	176
10.6.1	Antiblockiersysteme (ABS)	176
10.6.2	Bestandteile des ABS	176

10.6.3	Der ABS-Regelvorgang	177
10.6.4	Arbeitsprinzipien	178
10.7	Integralbremssysteme	182
10.8	Brake-by-Wire	185
11	Auflaufbremsanlagen	187
11.1	Einleitung	187
11.2	Aufbau und Wirkung der Bremsanlage	187
11.2.1	Komponenten	187
11.2.1.1	Auflaufeinrichtung	187
11.2.1.2	Übertragungseinrichtung	189
11.2.1.3	Radbremse	190
11.2.2	Funktionen	191
11.2.2.1	Betriebsbremse Vorwärtsfahrt	191
11.2.2.2	Rückfahrautomatik Rückwärtsfahrt	191
11.2.2.3	Feststellbremse	191
11.2.2.4	Abreißbremse	193
11.3	Auslegung der Bremsanlage	193
11.3.1	Zuordnungsberechnung gemäß Richtlinie 71/320/EWG	193
11.3.2	Kraftschlussausnutzung	193
11.3.3	ABS-Verträglichkeit	194
11.4	Wartung – Pflege	194
11.4.1	Wartung	194
11.4.2	Nachstellung	195
11.5	Neue Entwicklungen	195
12	Bremsen von Off-Road Radfahrzeugen	198
12.1	Historische Entwicklung der Bremsen in Off-Road Fahrzeugen	198
12.2	Überblick über nationale und internationale Rechtsvorschriften für Bremsanlagen	198
12.2.1	Verkehrsgesetze in der Bundesrepublik Deutschland (StVZO)	198
12.2.2	Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften (EG)	199
12.2.3	Regelungen der Economic Commission for Europe (ECE)	199
12.2.4	Normen der Society of Automotive Engineers (SAE)	199
12.3	Technische Ausführungen und Dimensionierung	199
12.3.1	Trommelbremse	200
12.3.2	Scheibenbremse	201
12.3.3	Lamellenbremse	201
12.3.3.1	Aufbau einer Lamellenbremse	201
12.3.3.2	Berechnung des Bremsmoments	201
12.3.3.3	Reibeigenschaften	202
12.3.3.4	Verlustleistung und Wirkungsgrad	203
12.4	Bremsprüfung und Bremswirkung	205
12.4.1	Prüfungen im Laborbereich	205
12.4.1.1	Nachweis der Einhaltung von gesetzlichen Vorschriften	205
12.4.1.2	Lebensdauer- und Verschleißprüfungen	205
12.4.2	Prüfungen im Fahrzeug	205
12.4.2.1	Abbremsung bei kalter Bremse (Typ 0)	205
12.4.2.2	Abbremsung bei heißer Bremse (Wärmefading)	205
12.4.2.3	Vergleich der Vorschriften	206
12.5	Ausblicke und Tendenzen	207
12.5.1	Die Radbremse im Zusammenspiel mit anderen Bremssystemen im Fahrzeug (Bremsenmanagement)	207
12.5.2	Umweltschutz durch neue Bremskonzepte	208
13	Bremsen für Kettenfahrzeuge	209
13.1	Einleitung	209
13.2	Besondere Anforderungen an Kettenfahrzeugbremsen	209

13.3	Mechanische Bremsen für Kettenfahrzeuge	210
13.3.1	Mechanische Reibungsbremsen	210
13.3.2	Nasslaufende Lamellenbremsen	211
13.3.3	Trockenlaufende Ein- und Mehrscheibenbremsen	212
13.3.4	Die Ansteuerung von mechanischen Bremsen	213
13.4	Kombinationsbremssysteme	214
13.4.1	Kombination mit Primärretarder	214
13.4.2	Kombination mit Hochleistungssekundärretarder	215
13.4.3	Andere Kombinationen	216
13.5	Abnahme von Kettenfahrzeugbremsen	216
13.6	Zusammenfassung und Ausblick	216
14	Flugzeugbremsen	217
14.1	Allgemeine Beschreibung eines Flugzeugbremssystems	217
14.1.1	Mechanische Ansteuerung	219
14.1.2	Elektronische Ansteuerung (Brake-by-wire)	219
14.1.3	Untersysteme des Bremssystems (Subsystems)	220
14.1.3.1	Antiblockiersystem (Anti-skid system)	220
14.1.3.2	Automatisches Bremskontrollsystem (Auto-braking system)	221
14.1.3.3	Parkbremssystem (Parking brake system)	221
14.1.3.4	Notbremssystem (Emergency braking system)	221
14.1.3.5	Bremsenkühlungssystem (Brake cooling system)	222
14.1.3.6	Anzeige- und Überwachungssystem (Indicating and monitoring system)	222
14.2	Auslegungskriterien für militärische und zivile Flugzeuge	222
14.2.1	Qualifikationsrichtlinien	222
14.2.1.2	Zivile Luftfahrtbestimmungen	222
14.2.1.3	Militärische Luftfahrtbestimmungen	223
14.2.2	Simulationsverfahren	223
14.3	Aufbau und Komponenten eines Bremssystems	224
14.3.1	Pedalbaugruppe (Pedal assembly)	224
14.3.2	Bremssteuergerät (Brake Control Unit, BCU)	226
14.3.3	Ventile (Valves)	226
14.3.3.1	Bremsventil (Brake control valve)	226
14.3.3.2	Absperrventile (Shut off valves)	226
14.3.3.3	Sicherheitsventile (Hydraulic fuses)	226
14.3.4	Sensoren	226
14.3.4.1	Wärmesensor (Thermocouple)	226
14.3.4.2	Bremsmomentsensor (Brake torque transducer)	226
14.3.4.3	Tachogenerator (Wheel speed sensor)	226
14.3.5	Radbremsen (Wheel brakes)	227
14.4	Reibwerkstoffe	228
14.5	Kühlung und Temperaturüberwachung	229
14.5.1	Thermische Belastungen	229
14.5.2	Kühlung	229
14.5.3	Temperaturüberwachung	230
14.6	Ausblick, Perspektiven	230
15	Bremssysteme für Rennwagen	231
15.1	Einführung	231
15.2	Leistungsfähigkeit eines Bremssystems für Rennwagen	231
15.3	Bremsanlage	233
15.3.1	Bremszange	234
15.3.2	Hauptzylinder	234
15.4	Kühlung der Bremsanlage	236
15.5	Reibungsmaterialien	237
15.5.1	Herstellung von Karbon	238

16 Grundlagen elektrisch betätigter Pkw-Bremssysteme	240
16.1 Einleitung	240
16.2 Definition von ‚Brake-by-wire‘	241
16.3 Strukturierung elektrisch betätigter Bremssysteme	242
16.4 Gestaltung der Betätigungseinrichtung	243
16.4.1 Stellglied	243
16.4.2 Basiseigenschaften	243
16.4.3 Informationsrückmeldung	244
16.5 Elektrohydraulische Bremssysteme	244
16.5.1 EHB-Systeme mit Druckmodulator und Druckspeicher	244
16.5.2 EHB-Systeme mit elektrohydraulischem Wandler	245
16.6 Elektromechanische Bremssysteme	246
16.6.1 Elektrisch betätigte Fahrzeugbremsen	247
16.6.1.1 Komponenten	248
16.6.1.2 Betriebsarten – Interaktion der Komponenten	248
16.6.2 Energiebedarf	250
16.6.3 Betrieb elektrisch betätigter Radbremsen	252
16.6.4 Bremssystemaufbau	255
16.6.5 Fail-safe-Konzept	256
16.7 Konzeptvergleich	257
16.8 Hybride elektrische Bremssysteme	258
16.9 Perspektiven	258
17 Elektrohydraulisch betätigte Bremsen	261
17.1 Zielkonflikte und Einschränkungen konventioneller Bremsanlagen	261
17.2 Konzeptvergleich verschiedener Bremssysteme	261
17.3 Merkmale elektrohydraulisch betätigter Bremsanlagen	264
17.4 System- und Komponentenbeschreibung	265
17.4.1 Betätigungseinheit	265
17.4.2 Hydraulikeinheit	266
17.4.3 Steuergeräte und Sensorik	266
17.5 Funktionale Systemeigenschaften	266
17.5.1 Pedalgefühl	267
17.5.2 Anhalteweg	267
17.5.3 Fahrstabilität	269
17.5.4 Mehrwert-Funktionen	270
18 Elektromechanisch betätigte Bremsen	271
18.1 Zielsetzung	271
18.2 Systemaufbau – Zusammenwirken der Komponenten	271
18.2.1 Betätigungseinrichtung	271
18.2.2 Elektromechanische Radbremse	272
18.2.2.1 Aktor	272
18.2.2.2 Getriebesysteme	272
18.2.2.3 Sensorik	272
18.2.3 Regelkonzepte	273
18.2.4 Energieversorgung	273
18.3 Aspekte der passiven Sicherheit	273
18.4 Elektrische Parkbremse (EPB) und Aktive Parkbremse (APB)	274
18.5 Ausblick, Perspektiven	275
19 Die Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	276
19.1 Übersicht, Funktion und Anforderungen an die Fahrerassistenzsysteme für Pkw	276
19.1.1 Antiblockiersystem ABS	276
19.1.2 Antriebsschlupfregelung ASR	279
19.1.3 Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP	281

19.1.3.1	Fahrdynamikregler	283
19.1.3.2	Bremsschlupfregler	285
19.1.3.3	Antriebsschlupfregler	287
19.1.4	Elektronische Bremskraftverteilung EBV	289
19.1.5	Electronically Controlled Deceleration ECD	289
19.1.6	Hilldescent HDC	289
19.1.7	Bremsassistent BA	290
19.2	Funktion der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	292
19.3	Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme an die Bremsanlage	292
19.4	Ausführungen der Bremsanlage für die Fahrerassistenzsysteme	293
19.5	Überwachung der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	296
19.6	Ausblick und Perspektiven	296
20	Die Bremse im mechatronischen Fahrwerk	300
20.1	Einführung in die Mechatronik	300
20.2	Darstellung einer mechanischen Fahrzeugecke	301
20.2.1	Funktionsstruktur und Schnittstellen von Radaufhängungen	301
20.2.2	Wechselwirkungen zwischen Bremse und Fahrwerk	301
20.2.3	Darstellung von Fahrwerksparametern	301
20.3	Grenzen mechanischer Systeme	303
20.3.1	Einschränkungen konventioneller hydraulischer Radbremsen	303
20.3.2	Dynamik	303
20.3.3	Bremskomfort	303
20.3.4	Konflikt zwischen Sicherheit und Komfort	303
20.4	Lösungspotenzial durch Mechatronik	304
20.4.1	Übersicht über mechatronische Fahrwerksysteme	304
20.4.2	Adaptive Fahrwerkklagerung	305
20.4.3	Versteldämpfer	306
20.4.4	Elektromechanisch betätigte Teilbelagscheibenbremse mit Selbstverstärkung	307
20.4.5	Intelligenter Reifen	311
20.5	Ausblick	313
21	Eigenschaften der Reibpaarungen im Bremsprozess	315
21.1	Einführung	315
21.2	Prüfmöglichkeiten, Belastungskenngrößen und Beurteilungskriterien	315
21.3	Der Einlaufprozess	317
21.4	Funktionsmechanismus in der Kontaktfläche	318
21.5	Modell zur Erklärung der Vorgänge in der Kontaktzone	322
21.6	Einflussgrößen auf Reibung und Verschleiß	323
21.7	Zur Auswahl und Dimensionierung von Reibsystemen	326
22	Schwingungen und Geräusche	327
22.1	Definition	327
22.2	Erscheinungsformen	327
22.2.1	Niederfrequente Schwingungen und Geräusche	327
22.2.2	Hochfrequente Geräusche	328
22.3	Erregungsquellen	328
22.3.1	Ursachen niederfrequenter Geräusche und Schwingungen	328
22.3.2	Entstehungsmechanismen hochfrequenter Geräusche	329
22.4	Auswirkungen	329
22.4.1	Schwingungen	329
22.4.2	Akustische Auswirkungen	329
22.5	Prüf- und Beurteilungsmethoden	329
22.5.1	Simulation	330
22.5.2	Prüfstandsuntersuchungen	331
22.5.3	Fahrversuche	331

22.6	Maßnahmen zur Reduzierung bzw. Vermeidung	331
22.6.1	Maßnahmen an der Erregungsquelle	332
22.6.2	Maßnahmen an den Übertragungsstrecken	332
22.7	Ausblick, Perspektiven	333
23	Reibbeläge	334
23.1	Einführung	334
23.2	Anforderung an Reibbeläge	334
23.3	Materialkonzepte	335
23.4	Ökologie	338
23.5	Rohstoffe und ihre Eigenschaften in Reibbelägen	340
23.6	Fertigungsverfahren	342
23.7	Ausblick	344
24	Bremsflüssigkeiten	345
24.1	Bremsflüssigkeitstypen	345
24.1.1	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Glykolen, Glykolethern und deren Borsäureester ..	345
24.1.2	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Silikonestern	346
24.1.3	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Mineralölen	346
24.2	Nationale und internationale Normen	346
24.3	Bremsflüssigkeitseigenschaften	346
24.3.1	Fahrzeugspezifische Eignung	346
24.3.2	Verträglichkeit mit anderen Bremsflüssigkeiten	347
24.3.3	Physikalische Kennwerte	347
24.4	Umgang mit Bremsflüssigkeiten	348
24.4.1	Handhabung	348
24.4.2	Lagerung	349
24.4.3	Entsorgung von Bremsflüssigkeiten	349
25	Bremsenprüfstände	350
25.1	Grundlagen und Aufgabenstellung	350
25.2	Rollen-Bremsprüfstände	350
25.2.1	Rollen-Bremsprüfstand für die Autowerkstatt	350
25.2.2	Rollen-Brems- und ABS-Prüfstand für die Serienprüfung am Bandende	351
25.3	Reibwert-Prüfstand zur Gütesicherung in der Belagproduktion	352
25.4	Schwungmassen-Bremsenprüfstand für das F- und E-Prüffeld	353
25.5	Schwungmassen-Bremsengeräusch-Prüfstand	354
25.6	Fahrzeug-Bremsen NVH-Prüfstand	354
25.7	Simulation anstatt „Trial and Error“ auf dem Bremsenprüfstand	355
26	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremsanlagen	358
26.1	Die Bremse als Fehlerquelle	358
26.1.1	Sicherheitsbetrachtungen an konservativen Bremsanlagen	358
26.1.2	Sicherheitsbetrachtungen an Bremssystemen neuerer Technologien	359
26.1.2.1	Zuverlässigkeit von Systemen	360
26.1.2.2	Verfügbarkeit von Systemen	361
26.1.2.3	Anforderungen an sicherheitsgerichtete elektronische Systeme	361
26.2	Schlankes Testen („Lean Testing“) in der Fahrzeugindustrie	363
26.2.1	Begleitung der Entwicklungsphase	363
26.2.2	Die Homologation (Typbegutachtung)	363
26.2.3	Erfahrungen aus dem Feld	363
26.3	Entwicklung von Test- und Prüfgrundlagen	364
26.3.1	Weiterentwicklung der Hauptuntersuchung	364
27	Regelwerke und Prüfverfahren	368
27.1	Zulassungsverfahren in Europa und den USA	368
27.2	Entwicklung von Vorschriften in Europa und den USA	369

27.2.1	Entwicklung der Vorschriften in der EU	369
27.2.2	Entwicklung der Vorschriften bei der UN-ECE	369
27.2.3	Entwicklung der Vorschriften in den USA	370
27.3	Europäische Vorschriften für Straßenfahrzeuge	370
27.3.1	Allgemeine Vorschriften, ECE-Regelung 13 und EU-Richtlinie 71/320/EWG	371
27.3.2	Wirkvorschriften	372
27.3.3	Bremskraftverteilung und Kompatibilität zwischen Zugfahrzeug und Anhänger	374
27.3.4	Vorschriften für ABS-Systeme	375
27.3.5	Vorschriften für komplexe elektronische Systeme	375
27.3.6	Prüfung von Ersatzreibbelägen	376
27.4	US-amerikanische Bremsenvorschriften	376
27.4.1	FMVSS 105 – Hydraulische Bremsanlagen	376
27.4.2	FMVSS 121 – Pneumatische Bremsanlagen	376
27.4.3	FMVSS 106 – Bremsschlauchleitungen	376
27.4.4	FMVSS 116 – Bremsflüssigkeiten für Kraftfahrzeuge	376
27.5	Weltweite Harmonisierung	376
27.5.1	FMVSS 135 und ECE R.13H	376
27.5.2	Harmonisierung, ein Ausblick	377
28	Wartung und Diagnose von Bremsanlagen	378
28.1	Einfluss von Normen, Regeln und Gesetzen in der Praxis	378
28.2	Bremsendiagnose	379
28.2.1	Geräusche und Vibrationen	379
28.2.2	Pedalbox	379
28.2.3	Bremskraftverstärker	380
28.2.4	Hauptbremszylinder	381
28.2.5	Rohrleitungen und Bremsschläuche	381
28.2.6	Bremsen	382
28.2.6.1	Scheibenbremsen	382
28.2.6.2	Trommelbremsen	383
28.2.7	Druckregler	383
28.2.8	Bremsflüssigkeit	384
28.2.9	ABS, BA, EHB, VSC und weitere	384
28.3	Umwelt- und zeitwertgerechte Reparatur und Wartung	384
28.4	Testgeräte	385
29	Entwicklungstendenzen und Zukunftsaspekte	387
29.1	Gesellschaftliche und wirtschaftliche Tendenzen	387
29.2	Die Fahrzeugführungsaufgabe heute und morgen	388
29.3	Entwicklungssprünge durch neue Technologien	389
29.4	Grenzen der Hilfskraft-, Potenziale der Fremdkraftanlagen	390
29.5	Die Mensch-Maschine-Schnittstelle	391
29.6	Beispiele für By-wire-Technologien und Assistenzsysteme im Chassisbereich	391
29.6.1	Throttle-by-wire (E-Gas)	391
29.6.2	Shift-by-wire	391
29.6.3	Steer-by-wire	393
29.6.4	Brake-by-wire (EHB und EMB)	393
29.6.5	Energiemanagement im Auto von morgen: das 42-Volt-Bordnetz	394
29.7	Global Chassis Control, die Vernetzung der Assistenz- und Chassissysteme	394
29.7.1	ESP II – Vernetzung mit fremdansteuerbarer Überlagerungslenkung	394
29.7.2	Elektronisches Luftfederfahrwerk, Dämpfer- und Stabilisatorverstellung	396
29.7.3	Technische und wirtschaftliche Notwendigkeiten	397
29.7.4	Der umfassende Sicherheitsgedanke	398
29.7.5	Fernziel Unfallvermeidung	399