

Inhaltsverzeichnis

1	Zur Geschichte der Kraftfahrzeugbremse	1
	<i>Peter Rieth und James Remfrey</i>	
1.1	Mechanisch betätigte Fahrzeugbremsen	2
1.2	Die hydraulisch betätigte Vierradbremse	4
1.3	Die Bremse mit innerer Verstärkung	5
1.4	Mehrkreis-Bremsanlagen	7
1.5	Von der Muskelkraft- zur Fremdkraftanlage	8
1.6	Die hydraulisch betätigte Scheibenbremse	8
1.7	Elektronische Bremsregelsysteme	10
	Literatur	13
2	Grundlegendes zum Bremsvorgang	15
	<i>Claus Wolff</i>	
2.1	Bremsung als Fahraufgabe	16
2.2	Besonderheiten des Bremsvorgangs	17
2.3	Anhalteweg	19
2.4	Bremsstabilität und Bremskraftverteilung	21
2.5	Ausfallsicherheit	24
	Literatur	25
3	Fahrzeugtechnische Anforderungen	27
	<i>Ulrich Eichhorn, Stefan Gies, Jonathan Layfield und Frank Rischbieter</i>	
3.1	Leistungsvermögen	29
3.1.1	Bremsweg	29
3.1.2	Standfestigkeit	30
3.1.3	Unebenheit der Straße	31
3.1.4	Reibwertabhängigkeit	32
3.2	Fahrzeugverhalten	33
3.2.1	Stabilität	34
3.2.2	Aufbaunicken	38
3.3	Betätigung/Bedienung	40
3.3.1	Ansprechen und Dosierbarkeit	40
3.3.2	Kräfte, Wege, Kennung	41
3.4	Package/Einbausituation	42
3.4.1	Baugrößen und Einbauverhältnisse	43
3.4.2	Reifengefederte Massen	44
3.5	Energieversorgung Bremskraftverstärkung	44
3.6	Thermische Randbedingungen	45
3.7	Umgebungsbedingungen	47
3.8	Geräusche und Schwingungen	48
3.8.1	Vibrationen	48
3.8.2	Geräusche	49
3.9	Crashanforderungen	50

3.10	Umweltschutz	50
3.10.1	Bremsbeläge	50
3.10.2	Korrosionsschutz	51
3.10.3	Bremsflüssigkeit	51
3.11	Energierückgewinnung	51
	Literatur	53
4	Menschliche Anforderungen	55
	<i>Bettina Abendroth, Kurt Landau und Jochen Weiße</i>	
4.1	Einleitung	56
4.2	Bremssituation	56
4.2.1	Informationsaufnahme	58
4.2.2	Informationsverarbeitung i.e. S.	59
4.2.3	Reaktion	61
4.2.4	Zeitlicher Ablauf des Informationsverarbeitungsprozesses beim Bremsen	61
4.3	Bremshandlung	61
4.3.1	Fußbewegung	61
4.3.2	Betätigung des Bremspedals	61
4.4	Ergonomische Bremsengestaltung	63
4.4.1	Geometrie	63
4.4.2	Pedalkennlinien	65
4.4.3	Alternative Konzepte	65
4.4.4	Bremsassistenten	66
	Literatur	68
5	Interaktion Fahrbahn-Reifen-Bremse	71
	<i>Heinrich Huinink, Heiner Volk und Manfred Becke</i>	
5.1	Einleitung	72
5.2	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn	72
5.2.1	Gummireibung	72
5.2.2	Wechselwirkung Reifen–Fahrbahn	74
5.2.3	Aufbau Reifenkräfte	76
5.3	Interaktion Reifen–Bremse	79
5.3.1	Reifenmodelle	79
5.3.2	Dynamische Umfangskraft-Schlupf-Charakteristik des Reifens beim Bremsen	81
5.3.3	Umfangskräfte beim ABS-Bremsen	82
5.3.4	Kombinierte Umfangs- und Seitenkraft, Bremsen bei Seitenkraftbedarf	83
5.4	Integration des Reifens in das Gesamtsystem Fahrzeug	85
5.4.1	Produktoptimierung Reifen–ABS-Regelung am Beispiel Winterreifen	86
5.4.2	Bremsspuren in der Unfallrekonstruktion	87
5.5	Ausblick	91
	Literatur	91
6	Auslegung und Simulation von Pkw-Bremsanlagen	93
	<i>Josef Pickenhahn und Thomas Straub</i>	
6.1	Grundlagen der Bremsdynamik	94
6.1.1	Linien gleicher Verzögerung	96
6.1.2	Linien konstanten Kraftschlussbeiwertes zwischen Reifen und Fahrbahn	96

6.2	Grundlagen der Bremsenberechnung	97
6.2.1	Pedaleinheit	97
6.2.2	Unterdruckverstärker mit Hauptbremszylinder	97
6.2.3	Bremse	99
6.3	Bremssystem-Auslegung	100
6.3.1	Bremskreisaufteilung	101
6.3.2	Auslegungskriterien für Bremssysteme	102
6.3.3	Auslegung von Radbremsen	103
6.3.4	Auslegung von Bremsregelsystemen	108
6.3.5	Auslegungskriterien von Elektro-Hydraulischen Bremssystemen	114
6.4	Simulation von Bremssystemen	115
6.4.1	Bremssystem-Auslegung	115
6.4.2	Analyse der Bremssystemkomponenten mit der Finite-Elemente-Methode	117
6.4.3	Simulation von Bremssystemkomponenten	118
6.4.4	Gesamtsystem-Simulation	119
	Literatur	121
7	Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen	123
	<i>James Remfrey, Steffen Gruber und Jan Sendler</i>	
7.1	Einführung	125
7.1.1	Physikalische Grundlagen	125
7.1.2	Arten von Bremsanlagen	128
7.1.3	Aufbau von Pkw-Bremsanlagen	129
7.2	Bremskraft-Generierung	130
7.2.1	Scheibenbremsen	132
7.2.2	Trommelbremsen	142
7.2.3	Elektrischer Starter-Generator	145
7.3	Bremsenergieübertragung und -modulation	146
7.3.1	Mechanisch-Hydraulische Bremsdruckmodulation	146
7.3.2	Elektro-Hydraulische Bremsdruckmodulation	148
7.3.3	Übertragungselemente	163
7.4	Bremsbetätigung	164
7.4.1	Bremskraftverstärker	164
7.4.2	(Tandem)-Hauptzylinder	169
7.5	Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. = HMI)	172
7.5.1	Betriebsbremse HMI	172
7.5.2	Feststellbremse HMI	173
7.5.3	Pedalcharakteristik (Ergonomie)	177
7.6	Neue und zukünftige Bremssysteme	179
7.6.1	Elektro-Hydraulische Bremsbetätigung	179
7.6.2	Elektrisch-Hydraulische Kombibremse	179
	Literatur	181

8	Bremssysteme, Fahr- und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen	183
	<i>Egon-Christian von Glasner</i>	
8.1	Auslegung einer Bremsanlage	185
8.1.1	Fahrzeugstabilität beim Bremsen	185
8.1.2	Verteilung der Bremskräfte auf die Achsen	186
8.1.3	Der Bremsvorgang im Bremskraftverteilungsdiagramm	188
8.1.4	Bremskraftsteuerungen (ALB)	189
8.1.5	Einfluss von Motorbremsmomenten, Massenträgheitsmomenten und Bremsmomenten von Dauerbremsanlagen	191
8.1.6	Ermittlung von Kennwertschwankungen und ihr Einfluss auf die Bremskraftverteilung	192
8.1.7	Bremskreisaufteilungen und Bremskreisausfall	194
8.2	Bremsanlagen für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge	195
8.2.1	Bremsanlagenaufbau	195
8.2.2	Radbremsen und Betätigungskomponenten	198
8.3	Dauerbremsanlagen	200
8.3.1	Motorbremssysteme	201
8.3.2	Retarder	202
8.4	Brems- und Antriebsschlupf-Regelsysteme	204
8.4.1	Antiblockiersysteme	204
8.4.2	Traktionsregelung	206
8.5	Elektronisches Bremsenmanagement	208
8.5.1	Integration von Dauerbremsanlagen	214
8.5.2	Stabilitätsregelung mit integrierter Kippverhinderung (EVSC)	214
8.5.3	Optimierung der Kompatibilität zwischen Zug- und Anhängerfahrzeug	216
8.5.4	Bremsassistent	218
8.5.5	Rückrollsperr	218
8.5.6	Bremsbelagverschleißregelung	218
8.5.7	Totwinkelüberwachung und Abbiegeassistent	219
8.5.8	Abstandsregeltempomat (ACC)	220
8.5.9	Spurassistent (LDWS)	221
8.5.10	Notbremsassistentensystem (AEBS)	221
8.6	Systeme zur automatisierten Fahrzeugführung, Systemvernetzung	225
8.7	Reifentechnische Grundvoraussetzungen für den Einsatz von fahrdynamischen Fahrerassistenzsystemen, insbesondere für das automatisierte Fahren	227
	Literatur	231
9	Nutzfahrzeugbremsen	233
	<i>Hans Baumgartner, Eduard Gerum, Wolfgang Pahle, Alf Siebke und Michael Pehle</i>	
9.1	Bauarten von druckluftbetätigten NFZ-Bremsen	235
9.1.1	Trommelbremsen	235
9.1.2	Scheibenbremsen	235
9.2	Aufbau und Wirkungsweise der druckluftbetätigten Schiebesattel-Scheibenbremse	236
9.2.1	Betätigungssystem	237
9.2.2	Automatisches Verschleißnachstellsystem	237
9.2.3	Nachstellverhalten	239
9.2.4	Bedeutung des Lüftspieles	239
9.2.5	Zusammenwirken Bremse/Radnabe	240
9.3	Leistungs- und Lebensdauerverhalten	242

9.4	Reibkörper	245
9.4.1	Bremsbeläge	245
9.4.2	Bremsscheibe	245
9.5	Entwicklung und Erprobung von Bremse und Reibkörpern	250
9.5.1	Berechnungsannahmen	250
9.5.2	Erprobung	251
9.6	Anhängerbremsen	251
9.6.1	Anhängerspezifische Besonderheiten	253
9.6.2	Anhängerspezifische Vorschriften	256
9.6.3	Anhängerspezifische Bremsanlagen	256
9.7	Kompatibilität in Zügen	258
9.7.1	Gesetzgebung	259
9.7.2	Zugabstimmung	259
9.7.3	Ursachen und Folgen unzureichender Kompatibilität	259
	Literatur	259
10	Bremsverhalten und Bremsen von Einspurfahrzeugen	261
	<i>Christian Landerl, Helmut Köhler, Hans-Albert Wagner, Ralf Lewien, Gerd Vilsmeier, Gerrit Heyl und Stefan Fritschle</i>	
10.1	Krafträder	262
10.1.1	Fahrdynamik von Einspurfahrzeugen	262
10.1.2	Bremsverhalten von Einspurfahrzeugen	264
10.1.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	271
10.1.4	Bremssysteme von Einspurfahrzeugen	272
10.1.5	Auslegung des Bremssystems	280
10.1.6	Bremsregelsysteme	287
10.1.7	Integralbremssysteme	295
10.1.8	Brake by wire System	299
10.1.9	Kurventaugliches ABS	302
10.2	Fahrräder	302
10.2.1	Einführung	302
10.2.2	Bremsverhalten von Fahrrädern	302
10.2.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	302
10.2.4	Bremssysteme von Fahrrädern	303
	Literatur	310
11	Auflaufbremsanlagen	311
	<i>Johann Loipl und Josef Strasser</i>	
11.1	Einleitung	312
11.2	Aufbau und Wirkung der Bremsanlage	312
11.2.1	Komponenten	313
11.2.2	Funktionen	316
11.3	Auslegung der Bremsanlage	320
11.3.1	Zuordnungsberechnung gemäß Richtlinie ECE R13, Anhang XII	320
11.3.2	Kraftschlussausnutzung	321
11.3.3	ABS-Verträglichkeit	323
11.4	Wartung – Pflege	323
11.4.1	Wartung	323

11.4.2	Nachstellung	324
11.5	Neue Entwicklungen	324
11.5.1	Elektronische Anhängerstabilisierung	324
11.5.2	Elektronisches Rückfahr-System – ERS	325
	Literatur	326
12	Bremsen von Off-Road Radfahrzeugen	329
	<i>Hermann Beck und Wolfgang Grünbeck</i>	
12.1	Historische Entwicklung der Bremsen in Off-Road Fahrzeugen	330
12.2	Überblick über nationale und internationale Rechtsvorschriften für Bremsanlagen ..	330
12.2.1	Verkehrsgesetze in der Bundesrepublik Deutschland	330
12.2.2	Richtlinien und Verordnungen für Europa	331
12.2.3	Regelungen der Economic Commission for Europe (ECE)	331
12.2.4	Internationale Vorschriften	332
12.3	Technische Ausführungen und Dimensionierung	332
12.3.1	Trommelbremse	333
12.3.2	Scheibenbremse	333
12.3.3	Lamellenbremse	334
12.4	Bremsprüfung und Bremswirkung	338
12.4.1	Prüfungen im Laborbereich	338
12.4.2	Prüfungen im Fahrzeug	339
12.5	Ausblicke und Tendenzen	341
12.5.1	Die Radbremse im Zusammenspiel mit anderen Bremssystemen im Fahrzeug (Bremsenmanagement)	341
12.5.2	Umweltschutz durch neue Bremskonzepte	343
	Literatur	343
13	Bremsen für Kettenfahrzeuge	345
	<i>Manfred Hirt und Max Witzenberger</i>	
13.1	Einleitung	346
13.2	Besondere Anforderungen an Kettenfahrzeugbremsen	346
13.3	Mechanische Bremsen für Kettenfahrzeuge	348
13.3.1	Mechanische Reibungsbremsen	348
13.3.2	Nasslaufende Lamellenbremsen	348
13.3.3	Trockenlaufende Ein- und Mehrscheibenbremsen	349
13.3.4	Die Ansteuerung von mechanischen Bremsen	352
13.4	Kombinationsbremssysteme	353
13.4.1	Kombination mit Primärretarder	353
13.4.2	Kombination mit hydrodynamischer Betriebsbremse (Hochleistungssekundärretarder) ...	354
13.4.3	Andere Kombinationen	354
13.5	Abnahme von Kettenfahrzeugbremsen	354
13.6	Zusammenfassung und Ausblick	355
	Literatur	356

14	Flugzeugbremsen	357
	<i>Gerd Roloff und Burkard Ohly</i>	
14.1	Allgemeine Beschreibung eines Flugzeugbremssystems	358
14.1.1	Mechanische Ansteuerung	360
14.1.2	Elektronische Ansteuerung (Brake-by-Wire)	361
14.1.3	Untersysteme des Bremssystems (Subsystems)	363
14.2	Auslegungskriterien für militärische und zivile Flugzeuge	364
14.2.1	Qualifikationsrichtlinien	365
14.2.2	Simulationsverfahren	367
14.3	Aufbau und Komponenten eines Bremssystems	368
14.3.1	Pedalbaugruppe (Pedal assembly)	368
14.3.2	Bremssteuergerät (Brake Control Unit, BCU)	369
14.3.3	Ventile (Valves)	370
14.3.4	Sensoren	371
14.3.5	Radbremzen (Wheel brakes)	371
14.4	Reibwerkstoffe	373
14.5	Kühlung und Temperaturüberwachung	374
14.5.1	Thermische Belastungen	374
14.5.2	Kühlung	375
14.5.3	Temperaturüberwachung	375
14.6	Ausblick, Perspektiven	376
	Literatur	376
15	Bremssysteme für Rennwagen	377
	<i>Riccardo Cesarini, Omar Cividini und Mauro Piccoli</i>	
15.1	Einführung	378
15.2	Leistungsfähigkeit eines Bremssystems für Rennwagen	378
15.3	Bremsanlage	380
15.3.1	Bremszange	381
15.3.2	Hauptzylinder	382
15.4	Kühlung der Bremsanlage	384
15.5	Reibmaterialien	386
15.5.1	Carbon-Carbon-Vorgang	387
15.5.2	Carbon-keramischer Vorgang	388
16	Bremssysteme von Schienenfahrzeugen	389
	<i>Peter Berger, Rainer Rau, Jens Galander und Reinhard Loebner</i>	
16.1	Einführung	391
16.2	Fahrzeuganforderungen an Schienenfahrzeugbremsen	391
16.2.1	Hochgeschwindigkeitszüge	391
16.2.2	Lokomotiven	391
16.2.3	Reisezugwagen	392
16.2.4	Güterwagen	392
16.2.5	Multiple Units (EMU, DMU)	392
16.2.6	Metros	393
16.3	Bremsbetrieb und Sicherheitsanforderungen	393
16.3.1	Grundlegende Sicherheitsanforderungen	393
16.3.2	Anforderungen der Signaltechnik	393

16.3.3	Anforderungen aus Wartung und Lebensdauer	394
16.3.4	Anforderungen im Bereich der AAR-Bahnen	394
16.4	Zulassung und Regelwerke	394
16.4.1	UIC-Merkblätter	394
16.4.2	EU-Richtlinien und TSI	394
16.4.3	Europäische Normen	394
16.4.4	Zulassungsbehörden	394
16.4.5	Betreiberspezifische Normen und Richtlinien	395
16.5	Auslegung von Schienenfahrzeugbremsen	395
16.5.1	Kraftschluss	395
16.5.2	Leistungsvermögen	395
16.5.3	Bremsgewicht	396
16.6	Bremssysteme	396
16.6.1	Bremsarten	396
16.6.2	Indirekte pneumatische Bremse (HL-Bremse)	397
16.6.3	Direkte elektropneumatische Bremse	399
16.6.4	Bremsmanagement	400
16.7	Komponenten und Subsysteme	401
16.7.1	Luftversorgung	401
16.7.2	Luftabsperrhähne und Bremskupplungen	402
16.7.3	Steuerventile	402
16.7.4	Führerbremsanlage	402
16.7.5	Bremseräteeinheiten	403
16.7.6	Mechatronische Module	403
16.7.7	Gleitschutz	403
16.7.8	Klotzbremse	404
16.7.9	Scheibenbremse	404
16.7.10	Feststellbremse	405
16.7.11	Magnetschienenbremse	406
16.7.12	Wirbelstrombremse	406
16.8	Hydraulische Bremsanlagen in Straßenbahnen	407
16.8.1	Regelwerke und Vorschriften für Straßenbahnbremsen	407
16.8.2	Fahrzeugstruktur	407
16.8.3	Bremssysteme	407
16.8.4	Bremsmatrix	408
16.8.5	Schema einer Straßenbahnbremsanlage	408
16.8.6	Hauptkomponenten eines hydraulischen Bremssystems	409
	Literatur	410
17	Mechatronische Systeme – eine kurze Einführung	411
	<i>Rolf Isermann</i>	
17.1	Vom mechanischen zum mechatronischen System	413
17.2	Mechanische Systeme und mechatronische Entwicklungen	415
17.2.1	Maschinenelemente, mechanische Komponenten	415
17.2.2	Elektrische Antriebe und Servoantriebe	416
17.2.3	Kraftmaschinen	416
17.2.4	Arbeitsmaschinen	416
17.2.5	Kraftfahrzeuge	417

17.2.6	Bahnen	417
17.3	Funktionen mechatronischer Systeme	417
17.3.1	Mechanischer Grundaufbau	417
17.3.2	Funktionsaufteilung Mechanik – Elektronik	418
17.3.3	Betriebseigenschaften	418
17.3.4	Neue Funktionen	419
17.3.5	Sonstige Entwicklungen	419
17.4	Integrationsformen von Prozess und Elektronik	420
17.5	Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme	422
17.6	Rechnergestützter Entwurf von mechatronischen Systemen	424
17.7	Ausblick	427
	Literatur	428
18	Grundlagen elektrisch betätigter Pkw-Bremssysteme	431
	<i>Karlheinz H. Bill</i>	
18.1	Einleitung	433
18.2	Definition von Brake-by-wire	434
18.3	Strukturierung elektrisch betätigter Bremssysteme	435
18.4	Gestaltung der Betätigungseinrichtung	437
18.4.1	Stellglied	437
18.4.2	Basiseigenschaften	437
18.4.3	Informationsrückmeldung	438
18.5	Entkoppelter „Smart Booster“	438
18.5.1	Normalbetrieb	438
18.5.2	Rückfallebene	439
18.6	Elektrohydraulische Bremssysteme	439
18.6.1	EHB-Systeme mit Druckmodulator und Druckspeicher	440
18.6.2	EHB-Systeme mit elektrohydraulischem Wandler	441
18.7	Elektromechanische Bremssysteme	442
18.7.1	Gestaltung elektrisch betätigter Radbremsen	444
18.7.2	Elektrisch betätigte Fahrzeugbremsen	444
18.7.3	Energiebedarf	447
18.7.4	Betrieb elektrisch betätigter Radbremsen	450
18.7.5	Bremssystemaufbau	454
18.7.6	Fail-safe Konzept	455
18.8	Mechatronische Eingriffe in die Bremsenselbstverstärkung	456
18.8.1	Aktive Belagführung	457
18.8.2	Aktiver Eingriff in den Kennwertmechanismus	458
18.9	Konzeptvergleich	458
18.10	Hybride elektrische Bremssysteme	460
18.11	Perspektiven	461
	Literatur	462
19	Regenerative Bremssysteme	463
	<i>Michael Kunz, Rachad Mahmoud, Andreas van de Sand und Ralph Michalski</i>	
19.1	Einleitung/Motivation	464
19.2	Anforderungen des regenerativen Bremsens	464
19.2.1	Volumenverblendung	466

19.2.2	Pedalkraftsimulation	467
19.3	Beschreibung Systemkonzepte	467
19.3.1	Konzepte ohne Volumenverblendung/Pedalkraftsimulation	467
19.3.2	Konzepte mit Volumenverblendung/ohne Pedalkraftsimulation	470
19.3.3	Konzepte mit Volumenverblendung/Pedalkraftsimulation	473
19.4	Zusammenfassung	475
20	Integrierte Bremssysteme	479
	<i>Hans-Jörg Feigel, Jochen Zimmermann, Anton van Zanten, Heinz Leiber, Thomas Leiber, Christian Köglasperger und Valentin Unterfrauner</i>	
20.1	Motivation für neue Bremssysteme	480
20.2	Technik der integrierten Bremssysteme	480
20.3	Integriertes Bremssystem MK C1	483
20.4	Integriertes Bremssystem IBS	486
20.4.1	Systemfunktion	486
20.4.2	Druckmodulation	489
20.4.3	Aufbau und Modularität	492
20.4.4	Anforderungen an das zukünftige Bremsenmanagement	492
20.5	Zusammenfassung und Ausblick	493
	Literatur	494
21	Elektromechanisch betätigte Bremse	495
	<i>Martin Semsch, Hans-Jörg Feigel und Jens Hoffmann</i>	
21.1	Zielsetzung elektromechanisch betätigter Radbremsen	496
21.2	Historie	496
21.3	Systemaufbau – Zusammenwirken der Komponenten	498
21.3.1	Betätigungseinrichtung	498
21.3.2	Elektromechanische Radbremse	498
21.3.3	Regelkonzepte	500
21.3.4	Energieversorgung	501
21.3.5	Gesamtbetrachtung für Hybrid- und Elektrofahrzeuge	501
21.3.6	Aspekte der aktiven und passiven Sicherheit	502
	Literatur	502
22	Elektrisches Bremsen	503
	<i>Marcus Bletz und Thorsten Wickenhöfer</i>	
22.1	Einleitung	504
22.1.1	Technische Grundlagen	504
22.1.2	Fahrzeugkonzepte	505
22.1.3	Antriebs-/Achskonfigurationen	506
22.1.4	System-Architektur	510
22.2	Anforderungen an das Bremssystem	510
22.2.1	Anforderung Fahrerwahrnehmung	510
22.2.2	Transition Reib-/Generatorbremse	511
22.2.3	Notwendigkeit der Adaptierung und Konditionierung der Reibbremse	512
22.3	Bremssystemvarianten	513
22.3.1	Bremssystem ohne Transitionsfähigkeit	513
22.3.2	Bremssystem mit begrenzter Transitionsfähigkeit	513

22.3.3	Bremssysteme mit voller Transitionsfähigkeit	514
22.4	Systemauslegung des Teilsystems Reibbremse	515
22.4.1	Hydraulik THZ bis Bremssattel	515
22.4.2	Reibpaarung Bremsbelag/Bremsscheibe	515
22.4.3	Vakuumbereitstellung	515
22.4.4	Fahrerwunsch-Sensorik	515
22.5	Sicherheitskonzepte	516
22.6	Einfluss auf Verbrauch bzw. CO₂-Emission und Reichweite	516
22.6.1	Verbrauchszyklen	517
22.7	Ausblick	518
23	Die Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	519
	<i>Anton van Zanten</i>	
23.1	Übersicht, Funktion und Anforderungen an die Fahrerassistenzsysteme für PKW	520
23.1.1	Antiblockiersystem ABS	520
23.1.2	Antriebsschlupfregelung ASR	524
23.1.3	Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP	526
23.1.4	Elektronische Bremskraftverteilung EBV	536
23.1.5	Electronically Controlled Deceleration ECD	537
23.1.6	Hilldescent HDC	537
23.1.7	Bremsassistent BA	538
23.1.8	Aktive Gespannstabilisierung	541
23.2	Funktion der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	541
23.3	Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme an die Bremsanlage	542
23.4	Ausführungen der Bremsanlage für die Fahrerassistenzsysteme	542
23.5	Überwachung der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	546
23.6	Ausblick und Perspektiven	548
	Literatur	548
24	Die Bremse im mechatronischen Fahrwerk	549
	<i>Hermann Winner, Thomas Degenstein, Tobias Bischof-Niemz und Marcus Schumann</i>	
24.1	Einleitung	550
24.2	Fahrwerksmechanik	550
24.2.1	Funktionsstruktur und Schnittstellen von Radaufhängungen	550
24.2.2	Darstellung von Fahrwerksparametern	552
24.3	Grenzen passiver Fahrwerksysteme	553
24.3.1	Einschränkungen konventionellhydraulisch betätigter Radbremsen	553
24.3.2	Dynamik	553
24.3.3	Bremskomfort	554
24.3.4	Zielkonflikt zwischen Sicherheit und Komfort	554
24.4	Lösungspotentiale durch Mechatronik	555
24.4.1	Möglichkeiten der Mechatronik	555
24.4.2	Mechatronik in der Bremsanlage	556
24.4.3	Mechatronik in der Radaufhängung	559
24.4.4	Wechselwirkung zwischen Lenkung und Bremse	563
24.4.5	Wechselwirkung zwischen Reifen und Bremse	564
24.5	Ausblick	567
	Literatur	567

25	Reibbeläge	571
	<i>Christian Wiaterek</i>	
25.1	Einführung	572
25.2	Anforderung an Reibbeläge	572
25.3	Materialkonzepte	574
25.3.1	Semimetallische Reibbeläge	574
25.3.2	Low Steel Reibmaterialien	576
25.3.3	NAO-Reibbeläge	576
25.3.4	Metallfreie Reibbeläge	577
25.3.5	Hybridbeläge	577
25.3.6	Reibbeläge für keramische Scheiben	578
25.3.7	Zwischenschichten	579
25.4	Ökologie	580
25.5	Rohstoffe und ihre Eigenschaften in Reibbelägen	583
25.6	Prüfverfahren für Rohstoffe	585
25.6.1	Geräteanalytische Untersuchungsverfahren	586
25.7	Fertigungsverfahren	588
25.8	Ausblick	590
	Literatur	591
26	Eigenschaften der Reibpaarungen im Bremsenprozess	593
	<i>Georg-Peter Ostermeyer</i>	
26.1	Einführung	594
26.2	Messung der Reibung	594
26.2.1	Messungen an der Bremse	595
26.2.2	Messungen an der Reibpaarung	598
26.2.3	Vergleichbarkeit und Skalierung	601
26.3	Grenzschichtdynamik	602
26.3.1	Verschleißmuster auf den Reiboberflächen	602
26.3.2	Ein dynamisches Reibgesetz	606
26.3.3	Hochfrequente Schwingungen	607
26.3.4	Thermoelastische Instabilitäten	608
26.4	Aktuelle Probleme	609
	Literatur	609
27	Mechanische Bremsen in stationären Industrieanlagen	611
	<i>Claus Kleinlein und Dietrich Severin</i>	
27.1	Einführung	612
27.2	Industriebremsen	612
27.2.1	Bauarten	612
27.2.2	Das energetische Zusammenspiel zwischen Triebwerk und Bremse	615
27.2.3	Reibungs- und Verschleißeigenschaften der Reibpaarungen	617
27.2.4	Dimensionierung der Reibpaarungen von Industriebremsen	622
27.3	Reibscheibenbremsen	625
	Literatur	626

28	Schwingungen und Geräusche	627
	<i>Holger Marschner, Alexander Pfaff, Paul Leibolt und Giuseppe Maggi-Trovato</i>	
28.1	Einleitung	629
28.2	Erscheinungsformen	629
28.2.1	Rubbeln (Judder)	630
28.2.2	Quietschen (Squeal)	631
28.2.3	Knarzen (Creep Groan)	633
28.2.4	Muhen (Moan)	634
28.2.5	Heulen (Howl)	635
28.2.6	Klappern (Rattle)	635
28.2.7	Klacken (Clonk)	636
28.2.8	Schleifen (Wire brush)	636
28.2.9	Zwitschern (Chirp)	636
28.2.10	Knarren (Creak)	636
28.2.11	Betätigungsgeräusche	636
28.3	Entstehungsmechanismen	636
28.3.1	Fremderregte Schwingungen	637
28.3.2	Selbsterregte Schwingungen	639
28.4	Abhilfemaßnahmen	643
28.4.1	Allgemeingültige Maßnahmen	643
28.4.2	Maßnahmen gegen Rubbeln	644
28.4.3	Maßnahmen gegen Quietschen	644
28.4.4	Maßnahmen gegen Knarzen	646
28.4.5	Maßnahmen gegen Muhen, Heulen und Zwitschern	646
28.4.6	Entwicklungsmethodik	646
28.5	Ausblick	646
	Literatur	647
29	Bremsen mit nichtmetallischen Brems scheiben	649
	<i>Donatus Neudeck und Andreas Wüllner</i>	
29.1	Einleitung	650
29.1.1	Historie	650
29.1.2	Carbon-Brems scheiben	650
29.2	Werkstoff	650
29.2.1	Definition, Eigenschaften, Einsatzgebiete	650
29.2.2	Fertigung Carbon-Keramik-Brems scheibe	650
29.2.3	Qualitätssicherung	653
29.3	Anwendung	653
29.3.1	Die Gestaltung von Keramikbremsen	653
29.3.2	Die Auswirkung der Keramikbremsen auf die Fahrzeugeigenschaften	655
29.3.3	Verschleißverhalten	656
29.4	Weiterentwicklung der Carbon-Keramik-Brems scheiben	657
30	Leichtbaubrems scheiben	659
	<i>Ralph Mayer</i>	
30.1	Einleitung	660
30.1.1	Leichtbaubedarf an Fahrzeugachsen	660
30.1.2	Physikalische Zusammenhänge	661

30.1.3	Historisches Umfeld	663
30.2	Werkstofflicher Leichtbau	663
30.2.1	Graugussbrems scheiben	663
30.2.2	Brems scheiben auf Aluminiumbasis	664
30.3	Konstruktiver Leichtbau	665
30.3.1	Verbundbrems scheiben mit Verbindungselementen	665
30.3.2	Verbundbrems scheiben ohne Verbindungselemente	666
30.4	Entwicklungsbedarf und -tendenzen	667
	Literatur	667
31	Bremsflüssigkeiten	669
	<i>Harald A. Dietl und Timo Weide</i>	
31.1	Bremsflüssigkeitstypen	670
31.1.1	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Glykolen, Glykolethern und deren Borsäureester	670
31.1.2	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Silikonestern	671
31.1.3	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Mineralölen	671
31.2	Nationale und internationale Normen	671
31.3	Bremsflüssigkeitseigenschaften	672
31.3.1	Fahrzeugspezifische Eignung	672
31.3.2	Verträglichkeit mit anderen Bremsflüssigkeiten	673
31.3.3	Physikalische Kennwerte	673
31.4	Umgang mit Bremsflüssigkeiten	675
31.4.1	Handhabung	675
31.4.2	Lagerung	675
31.4.3	Entsorgung von Bremsflüssigkeiten	675
31.5	Neue Anforderungen	676
	Literatur	677
32	Bremsentechnisches Versuchswesen	679
	<i>Holger Marschner, Hilmar Teitge, Martin Semsch, Marcus Bletz und Dieter Weiss</i>	
32.1	Radbremse	680
32.1.1	Laborversuche	680
32.1.2	Prüfstandsversuche	683
32.1.3	Fahrversuche	698
32.2	Elektronische Bremssysteme (EBS)	701
32.2.1	Laborversuche	701
32.2.2	Prüfstandversuche	705
32.2.3	Fahrversuche	708
33	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremsanlagen	713
	<i>Thomas Auel, Hans-Wilfried Mäder und Jürgen Westphäling</i>	
33.1	Die Bremse als Fehlerquelle	714
33.1.1	Sicherheitsbetrachtungen an konservativen Bremsanlagen	714
33.1.2	Funktionale Sicherheit komplexer elektronischer Systeme in modernen Bremsanlagen ...	716
33.2	Schlankes Testen („Lean Testing“) in der Fahrzeugindustrie	721
33.2.1	Begleitung der Entwicklungsphase	721
33.2.2	Die Homologation (Typbegutachtung)	721
33.2.3	Erfahrungen aus dem Feld	722

33.3	Entwicklung von Test- und Prüfgrundlagen	722
33.3.1	Weiterentwicklung der Hauptuntersuchung	723
33.3.2	Die zukünftige Typbegutachtung	725
	Literatur	726
34	Regelwerke und Prüfverfahren	729
	<i>Hans-Thomas Ebner</i>	
34.1	Zulassungsverfahren in Europa und den USA	731
34.2	Entwicklung von Vorschriften in Europa und den USA	732
34.2.1	Entwicklung der Vorschriften in der EU	732
34.2.2	Entwicklung der Vorschriften bei der UN-ECE	732
34.2.3	Entwicklung der Vorschriften in den USA	733
34.3	Europäische Vorschriften für Straßenfahrzeuge	734
34.4	ECE-Regelung 13	734
34.4.1	Allgemeine Vorschriften	734
34.4.2	Wirkvorschriften	736
34.4.3	Bremskraftverteilung und Kompatibilität zwischen Zugfahrzeug und Anhänger	738
34.4.4	Vorschriften für ABS-Systeme und für Fahrzeugstabilisierungssysteme	740
34.4.5	Vorschriften für komplexe elektronische Systeme	740
34.5	ECE-Regelung 13 H	741
34.5.1	Allgemeine Vorschriften	741
34.5.2	Wirkvorschriften	741
34.5.3	Elektronisches Stabilisierungssystem ESC und Bremsassistent BAS	741
34.5.4	Vorschriften für ABS Systeme	742
34.5.5	Vorschriften für komplexe elektronische Systeme	742
34.6	Prüfung von Ersatzreibbelägen sowie Ersatzbrems Scheiben und -trommeln	742
34.7	Notbremsassistentensysteme	742
34.8	US-amerikanische Bremsenvorschriften	743
34.8.1	FMVSS 105 – Hydraulische und elektrische Bremsanlagen	743
34.8.2	FMVSS 121 – Pneumatische Bremsanlagen	743
34.8.3	FMVSS 106 – Bremsschlauchleitungen	743
34.8.4	FMVSS 116 – Bremsflüssigkeiten für Kraftfahrzeuge	744
34.8.5	FMVSS 135 und ECE R 13 H	744
	Literatur	744
35	Wartung und Diagnose von Bremsanlagen	747
	<i>Ulrich Güllering, Peter Jobelius und Roman Rotter</i>	
35.1	Einfluss von Normen, Regeln und Gesetzen in der Praxis	748
35.1.1	Grundlagen	748
35.1.2	Bremsflüssigkeit	748
35.1.3	Bremsschläuche	748
35.1.4	Hauptbremszylinder, Radzylinder, Bremsgehäuse	749
35.1.5	Bremsscheiben	749
35.1.6	Bremssbeläge/Bremsbacken	749
35.2	Bremsendiagnose	749
35.2.1	Geräusche und Vibrationen	749
35.2.2	Pedalbox	750
35.2.3	Bremskraftverstärker	750

35.2.4	Hauptbremszylinder	751
35.2.5	Rohrleitungen und Bremsschläuche	752
35.2.6	Bremsen	752
35.2.7	Druckregler	756
35.2.8	Bremsflüssigkeit	757
35.2.9	ABS, BA, EHB, VSC und weitere	757
35.3	Umwelt- und zeitwertgerechte Reparatur und Wartung	757
35.4	Testgeräte	758
35.4.1	Diagnosetestgeräte	758
36	Entwicklungstendenzen und Zukunftsaspekte	761
	<i>Peter Rieth und James Remfrey</i>	
36.1	Gesellschaftliche und wirtschaftliche Tendenzen	763
36.2	Die Fahrzeugführungsaufgabe heute und morgen	764
36.3	Entwicklungssprünge durch neue Technologien	766
36.4	Grenzen der Hilfskraft-, Potenziale der Fremdkraftanlagen	767
36.5	Die Mensch-Maschine-Schnittstelle	768
36.6	Beispiele für By-wire-Technologien und Assistenzsysteme im Chassisbereich	768
36.6.1	Throttle-by-wire (E-Gas)	768
36.6.2	Shift-by-wire	770
36.6.3	Steer-by-wire	770
36.6.4	Brake-by-wire (EHB und EMB)	772
36.6.5	Energiemanagement im Auto von morgen: das 48-Volt-Bordnetz	773
36.7	Global Chassis Control, die vernetzte Regelung der Chassissysteme	774
36.7.1	ESP II – Vernetzung mit elektrischer Lenkung	774
36.7.2	Elektronisches Luftfederfahrwerk, Dämpfer- und Stabilisatorverstellung	775
36.7.3	Technische und wirtschaftliche Notwendigkeiten	777
36.7.4	Der integrale Sicherheitsgedanke	779
36.7.5	Fernziel Unfallvermeidung	781
	Literatur	783
	Serviceteil	785
	Sachverzeichnis	786