

Inhaltsverzeichnis

1	Zur Geschichte der Kraftfahrzeugbremse	1
	<i>Peter Rieth</i>	
1.1	Mechanisch betätigte Fahrzeugbremsen	2
1.2	Die hydraulisch betätigte Vierradbremse	3
1.3	Die Bremse mit innerer Verstärkung	3
1.4	Mehrkreis-Bremsanlagen	6
1.5	Von der Muskelkraft- zur Fremdkraftanlage	7
1.6	Die hydraulisch betätigte Scheibenbremse	8
1.7	Elektronische Bremsregelsysteme	10
	Literatur	12
2	Grundlegendes zum Bremsvorgang	13
	<i>Claus Wolff</i>	
2.1	Bremsung als Fahraufgabe	14
2.2	Besonderheiten des Bremsvorgangs	14
2.3	Anhalteweg	16
2.4	Bremsstabilität und Bremskraftverteilung	19
2.5	Ausfallsicherheit	22
	Literatur	23
3	Fahrzeugtechnische Anforderungen	25
	<i>Ulrich Eichhorn, Stefan Gies, Jonathan Layfield und Frank Rischbieter</i>	
3.1	Leistungvermögen	26
3.1.1	Bremsweg	26
3.1.2	Standfestigkeit	26
3.1.3	Unebenheit der Straße	28
3.1.4	Reibwertabhängigkeit	30
3.2	Fahrzeugverhalten	30
3.2.1	Stabilität	31
3.2.2	Aufbaunicken	36
3.3	Betätigung/Bedienung	37
3.3.1	Ansprechen und Dosierbarkeit	37
3.3.2	Kräfte, Wege, Kennung	37
3.4	Package/Einbausituation	39
3.4.1	Baugrößen und Einbauverhältnisse	39
3.4.2	Ungefederte Massen	40
3.5	Energieversorgung Bremskraftverstärkung	41
3.6	Thermische Randbedingungen	42
3.7	Umgebungsbedingungen	44
3.8	Geräusche und Schwingungen	44
3.8.1	Vibrationen	45
3.8.2	Geräusche	46
3.9	Crashanforderungen	47
3.10	Crashanforderungen	47
3.11	Umweltschutz	47
3.11.1	Bremsbeläge	47
3.11.2	Korrosionsschutz	47
3.11.3	Bremsflüssigkeit	47

3.12	Energierückgewinnung	49
	Literatur	49
4	Menschliche Anforderungen	51
	<i>Bettina Abendroth, Kurt Landau und Jochen Weiße</i>	
4.1	Einleitung	52
4.2	Bremssituation	52
4.2.1	Informationsaufnahme	54
4.2.2	Informationsverarbeitung i. e. S.	55
4.2.3	Reaktion	56
4.2.4	Zeitlicher Ablauf des Informationsverarbeitungsprozesses beim Bremsen	56
4.3	Bremshandlung	58
4.3.1	Fußbewegung.....	58
4.3.2	Betätigung des Bremspedals	58
4.4	Ergonomische Bremsengestaltung	58
4.4.1	Geometrie	58
4.4.2	Pedalkennlinien	60
4.4.3	Alternative Konzepte	61
4.4.4	Bremsassistenten	61
	Literatur	63
5	Interaktion Fahrbahn-Reifen-Bremse	65
	<i>Heinrich Huinink, Heiner Volk und Manfred Becke</i>	
5.1	Einleitung	66
5.2	Kraftübertragung Reifen – Fahrbahn	66
5.2.1	Gummireibung	66
5.2.2	Wechselwirkung Reifen-Fahrbahn	68
5.2.3	Aufbau Reifenkräfte	70
5.3	Interaktion Reifen-Bremse	72
5.3.1	Reifenmodelle	73
5.3.2	Dynamische Umfangskraft-Schlupf-Charakteristik des Reifens beim Bremsen	74
5.3.3	Umfangskräfte beim ABS-Bremsen	75
5.3.4	Kombinierte Umfangs- und Seitenkraft, Bremsen bei Seitenkraftbedarf	76
5.4	Integration des Reifens in das Gesamtsystem Fahrzeug	78
5.4.1	Produktoptimierung Reifen – ABS-Regelung am Beispiel Winterreifen	79
5.4.2	Bremsspuren in der Unfallrekonstruktion	80
5.5	Ausblick	83
	Literatur	83
6	Auslegung und Simulation von Pkw-Bremsanlagen	85
	<i>Josef Pickenhahn und Thomas Straub</i>	
6.1	Grundlagen der Bremsdynamik	86
6.1.1	Linien gleicher Verzögerung	88
6.1.2	Linien konstanten Kraftschlussbeiwertes zwischen Reifen und Fahrbahn	88
6.2	Grundlagen der Bremsenberechnung	88
6.2.1	Pedaleinheit	89
6.2.2	Unterdruckverstärker mit Hauptbremszylinder	89
6.2.3	Bremse	91
6.3	Bremssystem-Auslegung	92
6.3.1	Bremskreisaufteilung	93
6.3.2	Auslegungskriterien für Bremssysteme	93
6.3.3	Auslegung von Radbremsen	95

6.3.4	Auslegung von Bremsregelsystemen	100
6.3.5	Auslegungskriterien von Elektro-Hydraulischen Bremssystemen	104
6.4	Simulation von Bremssystemen	105
6.4.1	Bremssystem-Auslegung	106
6.4.2	Analyse der Bremssystemkomponenten mit der Finite-Elemente-Methode	107
6.4.3	Simulation von Bremssystemkomponenten	108
6.4.4	Gesamtsystem-Simulation	110
	Literatur	111
7	Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen	113
	<i>James Remfrey, Steffen Gruber und Norbert Ocvirk</i>	
7.1	Einführung	114
7.1.1	Physikalische Grundlagen	114
7.1.2	Arten von Bremsanlagen	117
7.1.3	Aufbau von Pkw-Bremsanlagen	118
7.2	Bremskraft-Generierung	119
7.2.1	Scheibenbremsen	120
7.2.2	Trommelbremsen	130
7.2.3	Elektrischer Generator	133
7.3	Bremsenergieübertragung und -modulation	133
7.3.1	Mechanisch-Hydraulische Bremsdruckmodulation	133
7.3.2	Elektro-Hydraulische Bremsdruckmodulation	134
7.3.3	Übertragungselemente	149
7.4	Bremsbetätigung	152
7.4.1	Bremskraftverstärker	152
7.4.2	(Tandem-) Hauptzylinder	155
7.5	Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. = HMI)	158
7.5.1	Betriebsbremse HMI	158
7.5.2	Feststellbremse HMI	158
7.5.3	Pedalcharakteristik (Ergonomie)	159
7.6	Neue und zukünftige Bremssysteme	160
7.6.1	Elektro-Hydraulische Bremsbetätigung	160
7.6.2	Elektrisch-Hydraulische Kombibremse	161
	Literatur	162
8	Bremssysteme und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen	165
	<i>Egon-Christian von Glasner</i>	
8.1	Auslegung einer Bremsanlage	167
8.1.1	Fahrzeugstabilität beim Bremsen	167
8.1.2	Verteilung der Bremskräfte auf die Achsen	167
8.1.3	Der Bremsvorgang im Bremskraftverteilungsdiagramm	170
8.1.4	Bremskraftsteuerungen (ALB)	171
8.1.5	Einfluss von Motorbremsmomenten, Massenträgheitsmomenten und Bremsmomenten von Dauerbremsanlagen	172
8.1.6	Ermittlung von Kennwertschwankungen und ihr Einfluss auf die Bremskraftverteilung ...	174
8.1.7	Bremskreisaufteilungen und Bremskreisausfall	175
8.2	Bremsanlagen für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge	175
8.2.1	Bremsanlagenaufbau	177
8.2.2	Radbremsen und Betätigungskomponenten	179
8.3	Dauerbremsanlagen	181
8.3.1	Motorbremssysteme	182
8.3.2	Retarder	183

8.4	Brems- und Antriebsschlupf – Regelsysteme	186
8.4.1	Antiblockiersysteme	186
8.4.2	Traktionsregelung	187
8.5	Elektronisches Bremsenmanagement	188
8.5.1	Integration von Dauerbremsanlagen	190
8.5.2	Stabilitätsregelung mit integrierter Überschlagerverhinderung	190
8.5.3	Optimierung der Kompatibilität zwischen Zug- und Anhängerfahrzeug	192
8.5.4	Bremsassistent	193
8.5.5	Rückrollsperr	194
8.5.6	Bremsbelagverschleißregelung	194
8.5.7	Abstandsregeltempomat	194
8.5.8	Systeme zur automatischen Fahrzeugführung	195
8.6	Systemintegration und elektronische Vernetzung	196
8.7	Zusammenfassende Betrachtung von X-by-Wire Systemen	196
	Literatur	197
9	Nutzfahrzeugbremsen	199
	<i>Hans Baumgartner, Eduard Gerum, Wolfgang Pahle, Alf Siebke und Michael Pehle</i>	
9.1	Bauarten von druckluftbetätigten NFZ-Bremsen	200
9.1.1	Trommelbremsen	200
9.1.2	Scheibenbremsen	200
9.2	Aufbau und Wirkungsweise der druckluftbetätigten Schiebesattel-Scheibenbremse	200
9.2.1	Betätigungssystem	200
9.2.2	Automatisches Verschleißnachstellsystem	202
9.2.3	Nachstellverhalten	203
9.2.4	Bedeutung des Lüftspieles	204
9.2.5	Zusammenwirken Bremse/Radnabe	205
9.3	Leistungs- und Lebensdauerverhalten	207
9.3.1	Auslegungsdaten	207
9.4	Reibkörper	210
9.4.1	Bremsbeläge	210
9.4.2	Bremsscheibe	210
9.5	Entwicklung und Erprobung von Bremse und Reibkörpern	214
9.5.1	Berechnungsannahmen	215
9.5.2	Erprobung	216
9.6	Anhängerbremsen	217
9.6.1	Anhängerspezifische Besonderheiten	218
9.6.2	Anhängerspezifische Vorschriften	220
9.6.3	Anhängerspezifische Bremsanlagen	221
9.7	Kompatibilität in Zügen	223
9.7.1	Gesetzgebung	224
9.7.2	Zugabstimmung	225
9.7.3	Ursachen und Folgen unzureichender Kompatibilität	225
	Literatur	225
10	Bremsverhalten und Bremsen von Einspurfahrzeugen	227
	<i>Christian Landerl, Helmut Köhler, Hans-Albert Wagner, Ralf Lewien, Gerd Vilsmeier, Gerrit Heyl und Stefan Fritschle</i>	
10.1	Krafträder	228
10.1.1	Fahrdynamik von Einspurfahrzeugen	228
10.1.2	Bremsverhalten von Einspurfahrzeugen	229

10.1.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	234
10.1.4	Bremssysteme von Einspurfahrzeugen	235
10.1.5	Auslegung des Bremssystems	243
10.1.6	Bremsregelsysteme	249
10.1.7	Integralbremssysteme	257
10.1.8	Brake by wire System	262
10.1.9	Ausblick	263
10.2	Fahrräder	263
10.2.1	Einführung	263
10.2.2	Bremsverhalten von Fahrrädern	263
10.2.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	263
10.2.4	Bremssysteme von Fahrrädern	264
	Literatur	270
11	Auflaufbremsanlagen	271
	<i>Johann Loipl und Josef Strasser</i>	
11.1	Einleitung	272
11.2	Aufbau und Wirkung der Bremsanlage	272
11.2.1	Komponenten	272
11.2.2	Funktionen	276
11.3	Auslegung der Bremsanlage	279
11.3.1	Zuordnungsberechnung gemäß Richtlinie ECE R13, Anhang XII	279
11.3.2	Kraftschlussausnutzung	279
11.3.3	ABS-Verträglichkeit	281
11.4	Wartung – Pflege	281
11.4.1	Wartung	281
11.4.2	Nachstellung	283
11.5	Neue Entwicklungen	283
11.5.1	Automatische Nachstellung in der Radbremse	283
11.5.2	Elektronische Anhängerstabilisierung	284
	Literaturverzeichnis	284
12	Bremsen von Off-Road Radfahrzeugen	285
	<i>Hermann Beck und Wolfgang Grünbeck</i>	
12.1	Historische Entwicklung der Bremsen in Off-Road Fahrzeugen	286
12.2	Überblick über nationale und internationale Rechtsvorschriften für Bremsanlagen	286
12.2.1	Verkehrsgesetze in der Bundesrepublik Deutschland (StVZO)	286
12.2.2	Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften (EG)	286
12.2.3	Regelungen der Economic Commission for Europe (ECE)	287
12.2.4	Normen der Society of Automotive Engineers (SAE)	287
12.3	Technische Ausführungen und Dimensionierung	287
12.3.1	Trommelbremse	288
12.3.2	Scheibenbremse	288
12.3.3	Lamellenbremse	290
12.4	Bremsprüfung und Bremswirkung	294
12.4.1	Prüfungen im Laborbereich	294
12.4.2	Prüfungen im Fahrzeug	295
12.5	Ausblicke und Tendenzen	297
12.5.1	Die Radbremse im Zusammenspiel mit anderen Bremssystemen im Fahrzeug (Bremsenmanagement)	297
12.5.2	Umweltschutz durch neue Bremskonzepte	299
	Literatur	299

13	Bremsen für Kettenfahrzeuge	301
	<i>Manfred Hirt und Max Witzemberger</i>	
13.1	Einleitung	302
13.2	Besondere Anforderungen an Kettenfahrzeugbremsen	302
13.3	Mechanische Bremsen für Kettenfahrzeuge	303
13.3.1	Mechanische Reibungsbremsen	304
13.3.2	Nasslaufende Lamellenbremsen	304
13.3.3	Trockenlaufende Ein- und Mehrscheibenbremsen	305
13.3.4	Die Ansteuerung von mechanischen Bremsen	307
13.4	Kombinationsbremssysteme	308
13.4.1	Kombination mit Primärretarder	308
13.4.2	Kombination mit hydrodynamischer Betriebsbremse (Hochleistungssekundärretarder) ...	309
13.4.3	Andere Kombinationen	310
13.5	Abnahme von Kettenfahrzeugbremsen	311
13.6	Zusammenfassung und Ausblick	311
	Bildquellen	311
14	Flugzeugbremsen	313
	<i>Gerd Roloff und Burkard Ohly</i>	
14.1	Allgemeine Beschreibung eines Flugzeugbremssystems	314
14.1.1	Mechanische Ansteuerung	316
14.1.2	Elektronische Ansteuerung (Brake-by-Wire)	316
14.1.3	Untersysteme des Bremssystems (Subsystems)	318
14.2	Auslegungskriterien für militärische und zivile Flugzeuge	320
14.2.1	Qualifikationsrichtlinien	320
14.2.2	Simulationsverfahren	322
14.3	Aufbau und Komponenten eines Bremssystems	323
14.3.1	Pedalbaugruppe (Pedal assembly)	323
14.3.2	Bremssteuergerät (Brake Control Unit, BCU)	325
14.3.3	Ventile (Valves)	325
14.3.4	Sensoren	325
14.3.5	Radbremsen (Wheel brakes)	326
14.4	Reibwerkstoffe	328
14.5	Kühlung und Temperaturüberwachung	329
14.5.1	Thermische Belastungen	329
14.5.2	Kühlung	329
14.5.3	Temperaturüberwachung	330
14.6	Ausblick, Perspektiven	330
	Literatur	331
15	Bremssysteme für Rennwagen	333
	<i>Riccardo Cesarini, Omar Cividini und Mauro Piccoli</i>	
15.1	Einführung	334
15.2	Leistungsfähigkeit eines Bremssystems für Rennwagen	334
15.3	Bremsanlage	334
15.3.1	Bremszange	337
15.3.2	Hauptzylinder	338
15.4	Kühlung der Bremsanlage	340
15.5	Reibmaterialien	340
15.5.1	Carbon-Carbon-Vorgang	342
15.5.2	Carbon-keramischer Vorgang	343

16	Bremssysteme von Schienenfahrzeugen	345
	<i>Ulrich Kleemann, Robert Haupt, Jens Galander und Reinhard Loebner</i>	
16.1	Einführung	347
16.2	Fahrzeuganforderungen an Schienenfahrzeugbremsen	347
16.2.1	Hochgeschwindigkeitszüge	347
16.2.2	Lokomotiven	347
16.2.3	Reisezugwagen	347
16.2.4	Güterwagen	348
16.2.5	Multiple Units (EMU, DMU)	348
16.2.6	Metros	349
16.3	Bremsbetrieb und Sicherheitsanforderungen	349
16.3.1	Grundlegende Sicherheitsanforderungen	349
16.3.2	Anforderungen der Signaltechnik	349
16.3.3	Anforderungen aus Wartung und Lebensdauer	349
16.3.4	Anforderungen im Bereich der AAR-Bahnen	349
16.4	Zulassung und Regelwerke	350
16.4.1	UIC-Merkblätter	350
16.4.2	EU-Richtlinien und TSI	350
16.4.3	Europäische Normen	350
16.4.4	Zulassungsbehörden	350
16.4.5	Betreiberspezifische Normen und Richtlinien	350
16.5	Auslegung von Schienenfahrzeugbremsen	350
16.5.1	Kraftschluss	350
16.5.2	Leistungsvermögen	351
16.5.3	Bremsgewicht	351
16.6	Bremssysteme	351
16.6.1	Bremsarten	351
16.6.2	Indirekte pneumatische Bremse (HL-Bremse)	352
16.6.3	Direkte elektropneumatische Bremse	354
16.6.4	Bremsmanagement	355
16.7	Komponenten und Subsysteme	356
16.7.1	Luftversorgung	356
16.7.2	Luftabsperrhähne und Bremskupplungen	356
16.7.3	Steuerventile	357
16.7.4	Führerbremsanlage	357
16.7.5	Bremsgeräteeinheiten	357
16.7.6	Mechatronische Module	357
16.7.7	Gleitschutz	358
16.7.8	Klotzbremse	358
16.7.9	Scheibenbremse	359
16.7.10	Parkbremse	359
16.7.11	Magnetschienenbremse	359
16.7.12	Wirbelstrombremse	360
16.8	Hydraulische Bremsanlagen in Straßenbahnen	360
16.8.1	Regelwerke und Vorschriften für Straßenbahnbremsen	360
16.8.2	Fahrzeugstruktur	361
16.8.3	Bremssysteme	361
16.8.4	Bremsmatrix	361
16.8.5	Schema einer Straßenbahnbremsanlage	362
16.8.6	Hauptkomponenten eines hydraulischen Bremssystems	362
	Literatur	364

17	Mechatronische Systeme – eine kurze Einführung	365
	<i>Rolf Isermann</i>	
17.1	Vom mechanischen zum mechatronischen System	366
17.2	Mechanische Systeme und mechatronische Entwicklungen	368
17.2.1	Maschinenelemente, mechanische Komponenten	368
17.2.2	Elektrische Antriebe und Servoantriebe	369
17.2.3	Kraftmaschinen	369
17.2.4	Arbeitsmaschinen	370
17.2.5	Kraftfahrzeuge	370
17.2.6	Bahnen	370
17.3	Funktionen mechatronischer Systeme	370
17.3.1	Mechanischer Grundaufbau	370
17.3.2	Funktionsaufteilung Mechanik – Elektronik	371
17.3.3	Betriebseigenschaften	372
17.3.4	Neue Funktionen	372
17.3.5	Sonstige Entwicklungen	372
17.4	Integrationsformen von Prozess und Elektronik	372
17.5	Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme	376
17.6	Rechnergestützter Entwurf von mechatronischen Systemen	377
17.7	Ausblick	380
	Literatur	381
18	Grundlagen elektrisch betätigter Pkw-Bremssysteme	383
	<i>Karlheinz H. Bill</i>	
18.1	Einleitung	384
18.2	Definition von Brake-by-wire	384
18.3	Strukturierung elektrisch betätigter Bremssysteme	385
18.4	Gestaltung der Betätigungseinrichtung	386
18.4.1	Stellglied	388
18.4.2	Basiseigenschaften	388
18.4.3	Informationsrückmeldung	389
18.5	Elektrohydraulische Bremssysteme	389
18.5.1	EHB-Systeme mit Druckmodulator und Druckspeicher	389
18.5.2	EHB-Systeme mit elektrohydraulischem Wandler	390
18.6	Elektromechanische Bremssysteme	391
18.6.1	Gestaltung elektrisch betätigter Radbremsen	392
18.6.2	Elektrisch betätigte Fahrzeugbremsen	393
18.6.3	Energiebedarf	395
18.6.4	Betrieb elektrisch betätigter Radbremsen	398
18.6.5	Bremssystemaufbau	402
18.6.6	Fail-safe Konzept	403
18.7	Mechatronische Eingriffe in die Bremsenselbstverstärkung	403
18.7.1	Aktive Belagführung	404
18.7.2	Aktiver Eingriff in den Kennwertmechanismus	405
18.8	Konzeptvergleich	406
18.9	Hybride elektrische Bremssysteme	407
18.10	Perspektiven	409
	Literatur	409

19	Regenerative Bremssysteme	411
	<i>Michael Kunz, Rachad Mahmoud, Andreas van de Sand und Ralph Michalski</i>	
19.1	Einleitung/Motivation	412
19.2	Anforderungen des regenerativen Bremsens	412
19.2.1	Volumenverblendung	413
19.2.2	Pedalkraftsimulation	414
19.3	Beschreibung Systemkonzepte	415
19.3.1	Konzepte ohne Volumenverblendung/Pedalkraftsimulation	415
19.3.2	Konzepte mit Volumenverblendung/ohne Pedalkraftsimulation	417
19.3.3	Konzepte mit Volumenverblendung/Pedalkraftsimulation	420
19.4	Zusammenfassung	422
20	Integrierte Bremssysteme	425
	<i>Hans-Jörg Feigel, Anton van Zanten, Heinz Leiber, Thomas Leiber, Christian Köglspurger und Valentin Unterfrauer</i>	
20.1	Motivation für neue Bremssysteme	426
20.2	Technik der integrierten Bremssysteme	426
20.3	Integriertes Bremssystem MK C1	428
20.4	Integriertes Bremssystem IBS	430
20.4.1	Systemfunktion	431
20.4.2	Druckmodulation	434
20.4.3	Aufbau und Modularität	436
20.4.4	Anforderungen an das zukünftige Bremsenmanagement	436
20.4.5	Zusammenfassung	438
	Literatur	438
21	Elektromechanisch betätigte Bremse	439
	<i>Martin Semsch, Hans-Jörg Feigel und Jens Hoffmann</i>	
21.1	Zielsetzung elektro-mechanisch betätigte Radbremse	440
21.2	Historie	440
21.3	Systemaufbau – Zusammenwirken der Komponenten	442
21.3.1	Betätigungseinrichtung	442
21.3.2	Elektromechanische Radbremse	442
21.3.3	Regelkonzepte	444
21.3.4	Energieversorgung	444
21.3.5	Gesamtbetrachtung für Hybrid- und Elektrofahrzeuge	444
21.3.6	Aspekte der aktiven und passiven Sicherheit	445
	Literatur	445
22	Elektrisches Bremsen	447
	<i>Marcus Bletz und Thorsten Wickenhöfer</i>	
22.1	Einleitung	448
22.1.1	Technische Grundlagen	448
22.1.2	Fahrzeugkonzepte	448
22.1.3	Antriebs-/Achskonfigurationen	450
22.1.4	System-Architektur	453
22.2	Anforderungen an das Bremssystem	453
22.2.1	Anforderung Fahrerwahrnehmung	453
22.2.2	Transition Reib-/Generatorbremse	454
22.2.3	Notwendigkeit der Adaptierung und Konditionierung der Reibbremse	455

22.3	Bremssystemvarianten	455
22.3.1	Bremssystem ohne Transitionsfähigkeit	455
22.3.2	Bremssystem mit begrenzter Transitionsfähigkeit	456
22.3.3	Bremssysteme mit voller Transitionsfähigkeit	457
22.4	Systemauslegung des Teilsystems Reibbremse	457
22.4.1	Hydraulik THZ bis Sattel	457
22.4.2	Reibpaarung Bremsbelag/-Scheibe	457
22.4.3	Vakuumbereitstellung	458
22.4.4	Fahrerwunsch-Sensorik	458
22.5	Sicherheitskonzepte	458
22.6	Einfluss auf Verbrauch bzw. CO₂-Emission und Reichweite	459
22.6.1	Verbrauchszyklen	459
22.7	Ausblick	460
23	Die Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	463
	<i>Anton van Zanten</i>	
23.1	Übersicht, Funktion und Anforderungen an die Fahrerassistenzsysteme für PKW	464
23.1.1	Antiblockiersystem ABS	464
23.1.2	Antriebsschlupfregelung ASR	467
23.1.3	Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP	470
23.1.4	Elektronische Bremskraftverteilung EBV	479
23.1.5	Electronically Controlled Deceleration ECD	480
23.1.6	Hilldescent HDC	480
23.1.7	Bremsassistent BA	481
23.1.8	Aktive Gespannstabilisierung	483
23.2	Funktion der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	484
23.3	Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme an die Bremsanlage	484
23.4	Ausführungen der Bremsanlage für die Fahrerassistenzsysteme	485
23.5	Überwachung der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	488
23.6	Ausblick und Perspektiven	489
	Literatur	490
24	Die Bremse im mechatronischen Fahrwerk	491
	<i>Hermann Winner, Thomas Degenstein, Tobias Bischof-Niemz und Marcus Schumann</i>	
24.1	Einleitung	492
24.2	Fahrwerksmechanik	492
24.2.1	Funktionsstruktur und Schnittstellen von Radaufhängungen	492
24.2.2	Darstellung von Fahrwerksparametern	494
24.3	Grenzen passiver Fahrwerksysteme	495
24.3.1	Einschränkungen konventionell hydraulisch betätigter Radbremsen	495
24.3.2	Dynamik	495
24.3.3	Bremskomfort	495
24.3.4	Zielkonflikt zwischen Sicherheit und Komfort	496
24.4	Lösungspotentiale durch Mechatronik	496
24.4.1	Möglichkeiten der Mechatronik	496
24.4.2	Mechatronik in der Bremsanlage	498
24.4.3	Mechatronik in der Radaufhängung	500
24.4.4	Wechselwirkung zwischen Lenkung und Bremse	504
24.4.5	Wechselwirkung zwischen Reifen und Bremse	505
24.5	Ausblick	507
	Literatur	507

25	Reibbeläge	511
	<i>Christian Wiaterek</i>	
25.1	Einführung	512
25.2	Anforderung an Reibbeläge	512
25.3	Materialkonzepte	514
25.3.1	Semimetallische Reibbeläge	514
25.3.2	Low Steel Reibmaterialien	515
25.3.3	NAO-Reibbeläge	516
25.3.4	Metallfreie Reibbeläge	516
25.3.5	Hybridbeläge	516
25.3.6	Reibbeläge für keramische Scheiben	517
25.3.7	Zwischenschichten	518
25.4	Ökologie	519
25.5	Rohstoffe und ihre Eigenschaften in Reibbelägen	521
25.6	Prüfverfahren für Rohstoffe	524
25.6.1	Geräteanalytische Untersuchungsverfahren	524
25.7	Fertigungsverfahren	526
25.8	Ausblick	528
	Literatur	528
26	Eigenschaften der Reibpaarungen im Bremsprozess	529
	<i>Claus Kleinlein und Dietrich Severin</i>	
26.1	Einführung	530
26.2	Prüfmöglichkeiten, Belastungskenngrößen und Beurteilungskriterien	530
26.2.1	Prüfmöglichkeiten und Messsysteme	530
26.2.2	Belastungskenngrößen	532
26.2.3	Kriterien zur Beurteilung der Reibungs- und Verschleißigenschaften	533
26.2.4	Reibflächentemperatur $\vartheta(t)$	535
26.3	Der Einlaufprozess	535
26.4	Der Funktionsmechanismus in der Kontaktfläche	537
26.5	Lokaler Belagverschleiß	540
26.6	Lokale Reibungszahlen	540
26.7	Erklärung des Funktionsmechanismus in der Kontaktfläche	540
26.8	Einflussgrößen auf die Reibungs- und Verschleißigenschaften	541
	Literatur	545
27	Mechanische Bremsen in stationären Industrieanlagen	547
	<i>Claus Kleinlein und Dietrich Severin</i>	
27.1	Einführung	548
27.2	Industriebremsen	548
27.2.1	Bauarten	548
27.2.2	Das energetische Zusammenspiel zwischen Triebwerk und Bremse	549
27.2.3	Reibungs- und Verschleißigenschaften der Reibpaarungen	552
27.2.4	Dimensionierung der Reibpaarungen von Industriebremsen	556
27.3	Reibscheibenbremsen	558
	Literatur	560
28	Schwingungen und Geräusche	561
	<i>Horst Brunner und Lars Koch</i>	
28.1	Definition	562
28.2	Erscheinungsformen	562

28.2.1	Niederfrequente Schwingungen und Geräusche	562
28.2.2	Hochfrequente Geräusche	562
28.3	Erregungsquellen	562
28.3.1	Ursachen niederfrequenter Geräusche und Schwingungen	562
28.3.2	Entstehungsmechanismen hochfrequenter Geräusche	564
28.4	Auswirkungen	565
28.4.1	Schwingungen	565
28.4.2	Akustische Auswirkungen	565
28.5	Prüf- und Beurteilungsmethoden	565
28.5.1	Simulation	565
28.5.2	Prüfstandsuntersuchungen	566
28.5.3	Fahrversuche	567
28.6	Maßnahmen zur Reduzierung bzw. Vermeidung	567
28.6.1	Maßnahmen an der Erregungsquelle	568
28.6.2	Maßnahmen an den Übertragungsstrecken	568
28.6.3	Einsatz von Sekundärmaßnahmen	568
28.7	Ausblick, Perspektiven	569
	Literatur	570
29	Bremsen mit nichtmetallischen Bremsscheiben	571
	<i>Donatus Neudeck und Andreas Wüllner</i>	
29.1	Einleitung	572
29.1.1	Historie	572
29.1.2	Carbon-Bremsscheiben	572
29.2	Werkstoff	572
29.2.1	Definition, Eigenschaften, Einsatzgebiete	572
29.2.2	Fertigung Carbon-Keramik-Bremsscheibe	572
29.2.3	Qualitätssicherung	574
29.3	Anwendung	574
29.3.1	Die Gestaltung von Keramikbremsen	574
29.3.2	Die Auswirkung der Keramikbremsen auf die Fahrzeugeigenschaften	576
29.3.3	Verschleißverhalten	577
29.4	Weiterentwicklung der Carbon- Keramik- Bremsscheiben	578
30	Bremsflüssigkeiten	581
	<i>Harald A. Dietl</i>	
30.1	Bremsflüssigkeitstypen	582
30.1.1	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Glykolen, Glykolethern und deren Borsäureester	582
30.1.2	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Silikonestern	582
30.1.3	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Mineralölen	583
30.2	Nationale und internationale Normen	583
30.3	Bremsflüssigkeitseigenschaften	584
30.3.1	Fahrzeugspezifische Eignung	584
30.3.2	Verträglichkeit mit anderen Bremsflüssigkeiten	585
30.3.3	Physikalische Kennwerte	586
30.4	Umgang mit Bremsflüssigkeiten	586
30.4.1	Handhabung	586
30.4.2	Lagerung	587
30.4.3	Entsorgung von Bremsflüssigkeiten	587
	Literatur	587

31	Bremsentechnisches Versuchswesen	589
	<i>Holger Marschner, Hilmar Teitge, Martin Semsch, Marcus Bletz und Dieter Weiss</i>	
31.1	Radbremse	590
31.1.1	Laborversuche	590
31.1.2	Prüfstandsversuche	593
31.1.3	Fahrversuche	605
31.2	Elektronische Bremssysteme (EBS)	607
31.2.1	Laborversuche	607
31.2.2	Prüfstandsversuche	611
31.2.3	Fahrversuche	614
32	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremsanlagen	619
	<i>Thomas Aubel, Hans-Wilfried Mäder und Jürgen Westphäling</i>	
32.1	Die Bremse als Fehlerquelle	620
32.1.1	Sicherheitsbetrachtungen an konservativen Bremsanlagen	620
32.1.2	Funktionale Sicherheit komplexer elektronischer Systeme in modernen Bremsanlagen ...	621
32.2	Schlankes Testen (»Lean Testing«) in der Fahrzeugindustrie	626
32.2.1	Begleitung der Entwicklungsphase	626
32.2.2	Die Homologation (Typbegutachtung)	627
32.2.3	Erfahrungen aus dem Feld	627
32.3	Entwicklung von Test- und Prüfgrundlagen	627
32.3.1	Weiterentwicklung der Hauptuntersuchung	628
32.3.2	Die zukünftige Typbegutachtung	630
	Literatur	631
33	Regelwerke und Prüfverfahren	633
	<i>Hans-Thomas Ebner</i>	
33.1	Zulassungsverfahren in Europa und den USA	634
33.2	Entwicklung von Vorschriften in Europa und den USA	635
33.2.1	Entwicklung der Vorschriften in der EU	635
33.2.2	Entwicklung der Vorschriften bei der UN-ECE	635
33.2.3	Entwicklung der Vorschriften in den USA	636
33.3	Europäische Vorschriften für Straßenfahrzeuge	636
33.4	ECE-Regelung 13	637
33.4.1	Allgemeine Vorschriften	637
33.4.2	Wirkvorschriften	638
33.4.3	Bremskraftverteilung und Kompatibilität zwischen Zugfahrzeug und Anhänger	640
33.4.4	Vorschriften für ABS-Systeme und für Fahrzeugstabilisierungssysteme	641
33.4.5	Vorschriften für komplexe elektronische Systeme	643
33.5	ECE-Regelung 13 H	643
33.5.1	Allgemeine Vorschriften	643
33.5.2	Wirkvorschriften	643
33.5.3	Elektronisches Stabilisierungssystem ESC und Bremsassistent BAS	643
33.5.4	Vorschriften für ABS Systeme	644
33.5.5	Vorschriften für komplexe elektronische Systeme	644
33.6	Prüfung von Ersatzreibbelägen	644
33.7	Notbremsassistentensysteme	644
33.8	US-amerikanische Bremsenvorschriften	645
33.8.1	FMVSS 105– Hydraulische Bremsanlagen	645
33.8.2	FMVSS 121– Pneumatische Bremsanlagen	645

33.8.3	FMVSS 106– Bremsschlauchleitungen	645
33.8.4	FMVSS 116– Bremsflüssigkeiten für Kraftfahrzeuge	645
33.8.5	FMVSS 135 und ECE R.13H	646
	Literatur	646
34	Wartung und Diagnose von Bremsanlagen	647
	<i>Ulrich Güllering, Peter Jobelius und Roman Rotter</i>	
34.1	Einfluss von Normen, Regeln und Gesetzen in der Praxis	648
34.1.1	Grundlagen	648
34.1.2	Bremsflüssigkeit	648
34.1.3	Bremsschläuche	648
34.1.4	Hauptbremszylinder, Radzylinder, Bremsgehäuse	649
34.1.5	Bremsscheiben	649
34.1.6	Bremsbeläge/Bremsbacken	649
34.2	Bremsendiagnose	649
34.2.1	Geräusche und Vibrationen	649
34.2.2	Pedalbox	650
34.2.3	Bremskraftverstärker	650
34.2.4	Hauptbremszylinder	651
34.2.5	Rohrleitungen und Bremsschläuche	652
34.2.6	Bremsen	652
34.2.7	Druckregler	655
34.2.8	Bremsflüssigkeit	656
34.2.9	ABS, BA, EHB, VSC) und weitere	657
34.3	Umwelt- und zeitwertgerechte Reparatur und Wartung	657
34.4	Testgeräte	657
34.4.1	Diagnosetestgeräte	657
35	Entwicklungstendenzen und Zukunftsaspekte	659
	<i>Peter Rieth</i>	
35.1	Gesellschaftliche und wirtschaftliche Tendenzen	660
35.2	Die Fahrzeugführungsaufgabe heute und morgen	660
35.3	Entwicklungssprünge durch neue Technologien	663
35.4	Grenzen der Hilfskraft-, Potenziale der Fremdkraftanlagen	664
35.5	Die Mensch-Maschine-Schnittstelle	665
35.6	Beispiele für By-wire-Technologien und Assistenzsysteme im Chassisbereich	665
35.6.1	Throttle-by-wire (E-Gas)	666
35.6.2	Shift-by-wire	666
35.6.3	Steer-by-wire	667
35.6.4	Brake-by-wire (EHB und EMB)	667
35.6.5	Energiemanagement im Auto von morgen: das 48-Volt-Bordnetz	670
35.7	Global Chassis Control, die vernetzte Regelung der Chassisssysteme	670
35.7.1	ESP II – Vernetzung mit elektrischer Lenkung	670
35.7.2	Elektronisches Luftfederfahrwerk, Dämpfer- und Stabilisatorverstellung	672
35.7.3	Technische und wirtschaftliche Notwendigkeiten	673
35.7.4	APIA – der integrale Sicherheitsgedanke	675
35.7.5	Fernziel Unfallvermeidung	678
	Literatur	679
	Stichwortverzeichnis	681