

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	Grundlegendes zum Bremsvorgang	10
2.1	Bremmung als Fahraufgabe	10
2.2	Besonderheiten des Bremsvorgangs	11
2.3	Anhalteweg	12
2.4	Bremsstabilität und Bremskraftverteilung	14
2.5	Ausfallsicherheit	16
3	Fahrzeugtechnische Anforderungen	18
3.1	Leistungsvermögen	18
3.1.1	Bremsweg	18
3.1.2	Standfestigkeit	19
3.1.3	Unebenheit der Straße	20
3.1.4	Reibwertabhängigkeit	21
3.2	Fahrzeugverhalten	22
3.2.1	Stabilität	22
3.2.2	Aufbaunicken	25
3.3	Betätigung/Bedienung	27
3.3.1	Ansprechen und Dosierbarkeit	27
3.3.2	Kräfte, Wege, Kennung	28
3.4	Package/Einbausituation	29
3.4.1	Baugrößen und Einbauverhältnisse	29
3.4.2	Massen	30
3.5	Energieversorgung Bremskraftverstärkung	31
3.6	Thermische Randbedingungen	32
3.7	Umgebungsbedingungen	34
3.8	Geräusche und Schwingungen	34
3.8.1	Vibrationen	35
3.8.2	Geräusche	36
3.9	Crashanforderungen	36
3.10	Umweltschutz	37
3.10.1	Bremsbeläge	37
3.10.2	Korrosionsschutz	37
3.10.3	Bremsflüssigkeit	37
3.11	Energierückgewinnung	37
4	Menschliche Anforderungen	39
4.1	Einleitung	39
4.2	Bremssituation	39
4.2.1	Informationsaufnahme	41
4.2.2	Informationsverarbeitung i. e. S.	41
4.2.3	Reaktion	43
4.2.4	Zeitlicher Ablauf des Informationsverarbeitungsprozesses beim Bremsen	43

4.3	Bremshandlung	44
4.3.1	Fußbewegung	44
4.3.2	Betätigung des Bremspedals	44
4.4	Ergonomische Bremsengestaltung	45
4.4.1	Geometrie	45
4.4.2	Pedalkennlinien	46
4.4.3	Alternative Konzepte	46
4.4.4	Bremsassistenten	47
5	Interaktion Fahrbahn–Reifen–Bremse	50
5.1	Einleitung	50
5.2	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn	50
5.2.1	Gummireibung	50
5.2.2	Wechselwirkung Reifen–Fahrbahn	51
5.2.3	Aufbau Reifenkräfte	53
5.2.3.1	Bremskräfte/Umfangskräfte	53
5.2.3.2	Schräglauf; Kräfte und Momente	55
5.3	Interaktion Reifen-Bremse	56
5.3.1	Reifenmodelle	56
5.3.2	Dynamische Umfangskraft-Schlupf-Charakteristik des Reifens beim Bremsen	57
5.3.3	Umfangskräfte beim ABS-Bremsen	57
5.3.4	Kombinierte Umfangs- und Seitenkraft, Bremsen bei Seitenkraftbedarf	58
5.4	Integration des Reifens in das Gesamtsystem Fahrzeug	60
5.4.1	Produktoptimierung Reifen – ABS-Regelung am Beispiel Winterreifen	61
5.4.2	Bremsspuren in der Unfallrekonstruktion	62
5.5	Ausblick	64
6	Auslegung und Simulation von Pkw-Bremsanlagen	66
6.1	Grundlagen der Bremsdynamik	67
6.2	Grundlagen der Bremsenberechnung	68
6.2.1	Pedaleinheit	69
6.2.2	Unterdruckverstärker mit Hauptbremszylinder	69
6.2.3	Bremse	69
6.2.3.1	Scheibenbremse	70
6.2.3.2	Trommelbremse	70
6.3	Bremssystem-Auslegung	71
6.3.1	Bremskreisaufteilung	71
6.3.2	Auslegungskriterien für Bremssysteme	72
6.3.3	Auslegung von Radbremsen	74
6.3.3.1	Bremsleistung	74
6.3.3.2	Thermische Auslegung	74
6.3.3.3	Lebensdauer/Verschleiß	75
6.3.3.4	Komfort	76
6.3.3.5	Kosten	77
6.3.3.6	Gewicht	78
6.3.4	Auslegung von Bremsregelsystemen	78
6.3.4.1	Auslegungskriterien für ABS-Anlagen	79
6.3.4.2	Auslegungskriterien für die Antriebsschlupfregelung	80
6.3.4.3	Auslegungskriterien für die Fahrdynamikregelung	81
6.3.5	Auslegungskriterien von Elektro-Hydraulischen Bremssystemen	82
6.4	Simulation von Bremssystemen	83
6.4.1	Bremssystem-Auslegung	83
6.4.2	Analyse der Bremssystemkomponenten mit der Finite-Elemente-Methode	84
6.4.3	Simulation von Bremssystemkomponenten	86
6.4.4	Gesamtsystem-Simulation	87

7	Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen	89
7.1	Einführung	89
7.1.1	Physikalische Grundlagen	89
7.1.2	Arten von Bremsanlagen	91
7.1.3	Aufbau von Pkw-Bremsanlagen	92
7.2	Bremskraft-Generierung	93
7.2.1	Scheibenbremsen	94
7.2.1.1	Festsattel	97
7.2.1.2	Rahmensattel	97
7.2.1.3	Faustsattel	98
7.2.1.4	Faustsattel FN	99
7.2.1.5	Faustrahmensattel FNR	99
7.2.1.6	Kombinierter Faustsattel	99
7.2.1.7	Bremsscheiben	100
7.2.1.8	Bremsbeläge	102
7.2.2	Trommelbremsen	102
7.2.2.1	Simplex-Trommelbremse	102
7.2.2.2	Duplex-Trommelbremsen	103
7.2.2.3	Duo-Servo-Trommelbremse	103
7.2.3	Elektrischer Generator	104
7.3	Bremsenergieübertragung und -modulation	105
7.3.1	Mechanisch-Hydraulische Bremsdruckmodulation	105
7.3.2	Elektro-Hydraulische Bremsdruckmodulation	107
7.3.2.1	Hydraulisch-elektronische Regeleinheit (HCU)	108
7.3.2.2	Elektronische Regeleinheit (ECU)	109
7.3.2.3	Elektronische Regelfunktionen	110
7.3.2.4	Sensoren für elektronische Brems-Regelsysteme	115
7.3.3	Übertragungselemente	118
7.3.3.1	Bremsflüssigkeit	118
7.3.3.2	Bremsleitungen und -schläuche	119
7.4	Bremsbetätigung	119
7.4.1	Bremskraftverstärker	119
7.4.1.1	Vakuum-Bremskraftverstärker	119
7.4.1.2	Hydraulik-Bremskraftverstärker	122
7.4.2	(Tandem)-Hauptzylinder	123
7.4.2.1	Schnüffelloch-Tandem-Hauptzylinder	123
7.4.2.2	Zentralventil-Tandem-Hauptzylinder	124
7.4.2.3	Plunger-Tandem-Hauptzylinder	124
7.4.2.4	Ausgleichbehälter	124
7.5	Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. = HMI)	125
7.5.1	Betriebsbremse HMI	125
7.5.2	Feststellbremse HMI	126
7.5.3	Pedalcharakteristik (Ergonomie)	126
7.6	Neue und zukünftige Systemarchitekturen	128
7.6.1	Elektro-Hydraulische Kombibremse	128
8	Bremssysteme und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen	130
8.1	Auslegung einer Bremsanlage	130
8.1.1	Fahrzeugstabilität beim Bremsen	130
8.1.2	Verteilung der Bremskräfte auf die Achsen	130
8.1.3	Der Bremsvorgang im Bremskraftverteilungsdiagramm	133
8.1.4	Bremskraftsteuerungen (ALB)	133
8.1.4.1	Bremskraftbegrenzer	133
8.1.4.2	Bremskraftminderer	134
8.1.5	Einfluss von Motorbremsmomenten, Massenträgheitsmomenten und Bremsmomenten von Dauerbremsanlagen	134
8.1.6	Ermittlung von Kennwertschwankungen und ihr Einfluss auf die Bremskraftverteilung	136
8.1.7	Bremskreisaufteilungen und Bremskreisausfall	136

8.2	Bremsanlagen für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge	138
8.2.1	Bremsanlagenaufbau	138
8.2.2	Radbremse und Betätigungskomponenten	140
8.3	Dauerbremsanlagen	142
8.3.1	Motorbremssysteme	142
8.3.2	Retarder	143
8.4	Brems- und Antriebschlupf-Regelsysteme	145
8.4.1	Antiblockiersysteme	145
8.4.2	Traktionsregelungen	147
8.5	Elektronisches Bremsenmanagement	147
8.5.1	Integration von Dauerbremsanlagen	149
8.5.2	Stabilitätsregelung mit integrierter Überschlagerverhinderung	150
8.5.3	Optimierung der Kompatibilität zwischen Zug- und Anhängerfahrzeug	151
8.5.4	Bremsassistent	151
8.5.5	Rückrollsperrung	152
8.5.6	Bremsbelagverschleißregelung	152
8.5.7	Abstandsregeltempomat	152
8.5.8	Systeme zur automatischen Fahrzeugführung	153
8.6	Systemintegration und elektronische Vernetzung	154
8.7	Zusammenfassende Betrachtung von X-by-wire-Systemen	154
9	Nutzfahrzeugbremsen	156
9.1	Bauarten von druckluftbetätigten NfZ-Bremsen	156
9.1.1	Trommelbremsen	156
9.1.2	Scheibenbremsen	156
9.2	Aufbau und Wirkungsweise der druckluftbetätigten Schiebesattel-Scheibenbremse	157
9.2.1	Betätigungssystem	157
9.2.1.1	Betriebsbremse	157
9.2.1.2	Feststell- und Hilfsbremse	158
9.2.2	Automatisches Verschleißnachstellsystem	158
9.2.3	Nachstellverhalten	159
9.2.4	Bedeutung des Lüftspieles	159
9.2.5	Zusammenwirken Bremse/Radnabe	160
9.2.5.1	Kraftwirkung der Bremse	161
9.2.5.2	Thermische Belastung der Radlegung	161
9.3	Leistungs- und Lebensdauerverhalten	162
9.3.1	Auslegungsdaten	162
9.3.1.1	Dauerhaltbarkeit	162
9.3.1.2	Dauerbremsleistung	163
9.4	Reibkörper	164
9.4.1	Bremsbeläge	164
9.4.2	Bremsscheibe	164
9.5	Entwicklung und Erprobung von Bremse und Reibkörpern	168
9.6	Anhängerbremse	170
9.6.1	Anhängerspezifische Besonderheiten	170
9.6.2	Anhängerspezifische Vorschriften	173
9.6.3	Anhängerspezifische Bremsanlagen	173
9.7	Kompatibilität in Zügen	175
9.7.1	Gesetzgebung	175
9.7.2	Zugabstimmung	175
9.7.3	Ursachen und Folgen unzureichender Kompatibilität	176
10	Bremsverhalten und Bremsen von Einspurfahrzeugen	177
10.1	Krafträder	177
10.1.1	Fahrdynamik von Einspurfahrzeugen	177
10.1.2	Bremsverhalten von Einspurfahrzeugen	178
10.1.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	183

10.1.4	Bremssysteme von Einspurfahrzeugen	184
10.1.4.1	Der Bremsattel	184
10.1.4.2	Bremsscheiben	187
10.1.4.3	Bremsbeläge	190
10.1.5	Auslegung des Bremssystems	191
10.1.6	Integralbremssysteme und Bremsregelsysteme	196
10.1.6.1	Antiblockiersysteme (ABS)	196
10.1.6.2	Bestandteile des ABS	196
10.1.6.3	Der ABS-Regelvorgang	196
10.1.6.4	Arbeitsprinzipien	198
10.1.7	Integralbremssysteme	202
10.1.8	Brake-by-Wire	205
10.2	Fahrräder	205
10.2.1	Einführung	205
10.2.2	Bremsverhalten von Fahrrädern	205
10.2.3	Typische Fahrfehler beim Bremsen	206
10.2.4	Bremssysteme von Fahrrädern	206
10.2.4.1	Felgenbremsen	206
10.2.4.2	Nabenbremsen	208
10.2.4.3	Scheibenbremsen	209
11	Auflaufbremsanlagen	213
11.1	Einleitung	213
11.2	Aufbau und Wirkung der Bremsanlage	213
11.2.1	Komponenten	213
11.2.1.1	Auflaufeinrichtung	213
11.2.1.2	Übertragungseinrichtung	215
11.2.1.3	Radbremse	216
11.2.2	Funktionen	217
11.2.2.1	Betriebsbremse Vorwärtsfahrt	217
11.2.2.2	Rückfahrautomatik Rückwärtsfahrt	217
11.2.2.3	Feststellbremse	217
11.2.2.4	Abreibbremse	219
11.3	Auslegung der Bremsanlage	219
11.3.1	Zuordnungsberechnung gemäß Richtlinie 71/320/EWG	219
11.3.2	Kraftschlussausnutzung	219
11.3.3	ABS-Verträglichkeit	220
11.4	Wartung – Pflege	221
11.4.1	Wartung	221
11.4.2	Nachstellung	221
11.5	Neue Entwicklungen	221
12	Bremsen von Off-Road Radfahrzeugen	223
12.1	Historische Entwicklung der Bremsen in Off-Road Fahrzeugen	223
12.2	Überblick über nationale und internationale Rechtsvorschriften für Bremsanlagen	223
12.2.1	Verkehrsgesetze in der Bundesrepublik Deutschland (StVZO)	223
12.2.2	Richtlinien der Europäischen Gemeinschaften (EG)	224
12.2.3	Regelungen der Economic Commission for Europe (ECE)	224
12.2.4	Normen der Society of Automotive Engineers (SAE)	224
12.3	Technische Ausführungen und Dimensionierung	225
12.3.1	Trommelbremse	225
12.3.2	Scheibenbremse	226
12.3.3	Lamellenbremse	226
12.3.3.1	Aufbau einer Lamellenbremse	226
12.3.3.2	Berechnung des Bremsmoments	227
12.3.3.3	Reibeigenschaften	228
12.3.3.4	Verlustleistung und Wirkungsgrad	229

12.4	Bremsprüfung und Bremswirkung	230
12.4.1	Prüfungen im Laborbereich	230
12.4.1.1	Nachweis der Einhaltung von gesetzlichen Vorschriften	230
12.4.1.2	Lebensdauer- und Verschleißprüfungen	230
12.4.2	Prüfungen im Fahrzeug	230
12.4.2.1	Abbremsung bei kalter Bremse (Typ 0)	230
12.4.2.2	Abbremsung bei heißer Bremse (Wärmefading)	231
12.4.2.3	Vergleich der Vorschriften	231
12.5	Ausblicke und Tendenzen	233
12.5.1	Die Radbremse im Zusammenspiel mit anderen Bremssystemen im Fahrzeug (Bremsenmanagement)	233
12.5.2	Umweltschutz durch neue Bremskonzepte	233
13	Bremsen für Kettenfahrzeuge	235
13.1	Einleitung	235
13.2	Besondere Anforderungen an Kettenfahrzeugbremsen	235
13.3	Mechanische Bremsen für Kettenfahrzeuge	236
13.3.1	Mechanische Reibungsbremsen	236
13.3.2	Nasslaufende Lamellenbremsen	237
13.3.3	Trockenlaufende Ein- und Mehrscheibenbremsen	238
13.3.4	Die Ansteuerung von mechanischen Bremsen	239
13.4	Kombinationsbremssysteme	240
13.4.1	Kombination mit Primärretarder	240
13.4.2	Kombination mit hydrodynamischer Betriebsbremse (Hochleistungssekundärretarder)	241
13.4.3	Andere Kombinationen	242
13.5	Abnahme von Kettenfahrzeugbremsen	242
13.6	Zusammenfassung und Ausblick	242
14	Flugzeugbremsen	243
14.1	Allgemeine Beschreibung eines Flugzeugbremssystems	243
14.1.1	Mechanische Ansteuerung	245
14.1.2	Elektronische Ansteuerung (Brake-by-wire)	246
14.1.3	Untersysteme des Bremssystems (Subsystems)	246
14.1.3.1	Antiblockiersystem (Anti-skid system)	246
14.1.3.2	Automatisches Bremskontrollsystem (Auto-braking system)	247
14.1.3.3	Parkbremssystem (Parking brake system)	247
14.1.3.4	Notbremssystem (Emergency braking system)	247
14.1.3.5	Bremsenkühlungssystem (Brake cooling system)	248
14.1.3.6	Anzeige- und Überwachungssystem (Indicating and monitoring system)	248
14.2	Auslegungskriterien für militärische und zivile Flugzeuge	248
14.2.1	Qualifikationsrichtlinien	248
14.2.1.2	Zivile Luftfahrtbestimmungen	248
14.2.1.3	Militärische Luftfahrtbestimmungen	249
14.2.2	Simulationsverfahren	249
14.3	Aufbau und Komponenten eines Bremssystems	250
14.3.1	Pedalbaugruppe (Pedal assembly)	250
14.3.2	Bremssteuergerät (Brake Control Unit, BCU)	252
14.3.3	Ventile (Valves)	252
14.3.3.1	Bremsventil (Brake control valve)	252
14.3.3.2	Absperrventile (Shut off valves)	252
14.3.3.3	Sicherheitsventile (Hydraulic fuses)	252
14.3.4	Sensoren	252
14.3.4.1	Wärmesensor (Thermocouple)	252
14.3.4.2	Bremsmomentsensor (Brake torque transducer)	252
14.3.4.3	Tachogenerator (Wheel speed sensor)	253
14.3.5	Radbremsen (Wheel brakes)	253
14.4	Reibwerkstoffe	254

14.5	Kühlung und Temperaturüberwachung	255
14.5.1	Thermische Belastungen	255
14.5.2	Kühlung	255
14.5.3	Temperaturüberwachung	256
14.6	Ausblick, Perspektiven	256
15	Bremssysteme für Rennwagen	257
15.1	Einführung	257
15.2	Leistungsfähigkeit eines Bremssystems für Rennwagen	257
15.3	Bremsanlage	259
15.3.1	Bremszange	260
15.3.2	Hauptzylinder	260
15.4	Kühlung der Bremsanlage	262
15.5	Reibungsmaterialien	263
15.5.1	Herstellung von Karbon	264
16	Bremssysteme von Schienenfahrzeugen	266
16.1	Einführung	266
16.2	Fahrzeuganforderungen an Schienenfahrzeugbremsen	266
16.2.1	Hochgeschwindigkeitszüge	266
16.2.2	Lokomotiven	266
16.2.3	Reisezugwagen	266
16.2.4	Güterwagen	266
16.2.5	Multiple Units (EMU, DMU)	267
16.2.6	Metros	267
16.3	Bremsbetrieb und Sicherheitsanforderungen	267
16.3.1	Grundlegende Sicherheitsanforderungen	268
16.3.2	Anforderungen der Signaltechnik	268
16.3.3	Anforderungen aus Wartung und Lebensdauer	268
16.3.4	Anforderungen im Bereich der AAR-Bahnen	268
16.4	Zulassung und Regelwerke	268
16.4.1	UIC-Merkblätter	268
16.4.2	EU-Richtlinien und TSI	268
16.4.3	Europäische Normen	268
16.4.4	Zulassungsbehörden	268
16.4.5	Betreiberspezifische Normen und Richtlinien	269
16.5	Auslegung von Schienenfahrzeugbremsen	269
16.5.1	Kraftschluss	269
16.5.2	Leistungsvermögen	269
16.5.3	Bremsgewicht	269
16.6	Bremssysteme	270
16.6.1	Bremsarten	270
16.6.2	Indirekte pneumatische Bremse (HL-Bremse)	270
16.6.2.1	Bremsstellungen	271
16.6.2.2	Lastabbremmung	271
16.6.2.3	Direkte pneumatische Bremse	271
16.6.2.4	Zweileitungsbremse	271
16.6.3	Direkte elektropneumatische Bremse	272
16.6.4	Bremsmanagement	273
16.6.4.1	Retarder	273
16.6.4.2	ED-Bremse	273
16.6.4.3	Zusammenwirken der Bremssysteme	273
16.7	Komponenten und Subsysteme	273
16.7.1	Luftversorgung	273
16.7.2	Luftabsperrhähne und Bremskupplungen	274
16.7.3	Steuerventile	274
16.7.4	Führerbremsanlage	274

16.7.5	Bremsgeräteeinheiten	274
16.7.6	Mechatronische Module	275
16.7.7	Gleitschutz	275
16.7.8	Klotzbremse	275
16.7.9	Scheibenbremse	276
16.7.10	Parkbremse	276
16.7.11	Magnetschienenbremse	277
16.7.12	Wirbelstrombremse	277
16.8	Hydraulische Bremsanlagen in Straßenbahnen	277
16.8.1	Regelwerke und Vorschriften für Straßenbahnbremsen	278
16.8.2	Fahrzeugstruktur	278
16.8.3	Bremssysteme	278
16.8.3.1	Magnetschienenbremse	278
16.8.3.2	Elektrodynamische Bremse	278
16.8.3.3	Elektrohydraulische Bremse	278
16.8.4	Bremsmatrix	278
16.8.5	Schema einer Straßenbahnbremsanlage	279
16.8.6	Hauptkomponenten eines hydraulischen Bremssystems	279
16.8.6.1	Bremsrafterzeuger, Brems Scheibe, Bremsbeläge	279
16.8.6.2	Elektrohydraulische Versorgungs- und Steuereinheiten	280
16.8.6.3	Bremssteuerelektronik	280
17	Mechatronische Systeme – eine kurze Einführung	281
17.1	Vom mechanischen zum mechatronischen System	281
17.2	Mechanische Systeme und mechatronische Entwicklungen	282
17.3	Funktionen mechatronischer Systeme	284
17.3.1	Mechanischer Grundaufbau	284
17.3.2	Funktionsaufteilung Mechanik – Elektronik	285
17.3.3	Betriebseigenschaften	285
17.3.4	Neue Funktionen	285
17.3.5	Sonstige Entwicklungen	286
17.4	Integrationsformen von Prozess und Elektronik	286
17.5	Entwurfsmethodik für mechatronische Systeme	288
17.6	Rechnergestützter Entwurf von mechatronischen Systemen	290
18	Grundlagen elektrisch betätigter Pkw-Bremssysteme	293
18.1	Einleitung	293
18.2	Definition von ‚Brake-by-wire‘	294
18.3	Strukturierung elektrisch betätigter Bremssysteme	295
18.4	Gestaltung der Betätigungseinrichtung	296
18.4.1	Stellglied	296
18.4.2	Basiseigenschaften	296
18.4.3	Informationsrückmeldung	297
18.5	Elektrohydraulische Bremssysteme	297
18.5.1	EHB-Systeme mit Druckmodulator und Druckspeicher	297
18.5.2	EHB-Systeme mit elektrohydraulischem Wandler	298
18.6	Elektromechanische Bremssysteme	299
18.6.1	Elektrisch betätigte Fahrzeugbremsen	300
18.6.1.1	Komponenten	301
18.6.1.2	Betriebsarten – Interaktion der Komponenten	302
18.6.2	Energiebedarf	304
18.6.3	Betrieb elektrisch betätigter Radbremsen	305
18.6.4	Bremssystemaufbau	308
18.6.5	Fail-safe-Konzept	309
18.7	Mechatronische Eingriffe in die Bremsenselbstverstärkung	310
18.7.1	Aktive Belagführung	310
18.7.2	Aktiver Eingriff in den Kennwertmechanismus	312

18.8	Konzeptvergleich	312
18.9	Hybride elektrische Bremssysteme	313
18.10	Perspektiven	314
19	Elektrohydraulisch betätigte Bremsen	316
19.1	Zielkonflikte und Einschränkungen konventioneller Bremsanlagen	316
19.2	Konzeptvergleich verschiedener Bremssysteme	316
19.3	Merkmale elektrohydraulisch betätigter Bremsanlagen	319
19.4	System- und Komponentenbeschreibung	319
19.4.1	Betätigungseinheit	319
19.4.2	Hydraulikeinheit	321
19.4.3	Steuergeräte und Sensorik	322
19.5	Funktionale Systemeigenschaften	322
19.5.1	Pedalgefühl	322
19.5.2	Anhalteweg	323
20	Elektromechanisch betätigte Bremsen	324
20.1	Zielsetzung	324
20.2	Systemaufbau – Zusammenwirken der Komponenten	324
20.2.1	Betätigungseinrichtung	324
20.2.2	Elektromechanische Radbremse	325
20.2.2.1	Wandler	325
20.2.2.2	Getriebesysteme	325
20.2.2.3	Sensorik	326
20.2.3	Regelkonzepte	326
20.2.4	Energieversorgung	326
20.2.5	Aspekte der passiven Sicherheit	327
20.3	Elektrische Parkbremse (EPB) und Aktive Parkbremse (APB)	327
20.4	Hybrid-Bremssystem	328
20.5	Forschungsbremsen mit Selbstverstärkung	329
20.6	Elektromechanisch betätigte Keilbremse	330
20.6.1	Grundlagen	331
20.6.2	Ausführungsformen	332
20.6.3	Ansteuerung + Regelung	334
20.6.4	Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse	334
20.6.5	Ausblick	336
21	Die Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	337
21.1	Übersicht, Funktion und Anforderungen an die Fahrerassistenzsysteme für Pkw	337
21.1.1	Antiblockiersystem ABS	337
21.1.2	Antriebsschlupfregelung ASR	340
21.1.3	Elektronisches Stabilitätsprogramm ESP	342
21.1.3.1	Fahrdynamikregler	344
21.1.3.2	Bremsschlupfregler	347
21.1.3.3	Antriebsschlupfregler	348
21.1.4	Elektronische Bremskraftverteilung EBV	350
21.1.5	Electronically Controlled Deceleration ECD	350
21.1.6	Hilldescent HDC	350
21.1.7	Bremsassistent BA	351
21.1.8	Aktive Spannstablisierung	353
21.2	Funktion der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	353
21.3	Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme an die Bremsanlage	354
21.4	Ausführungen der Bremsanlage für die Fahrerassistenzsysteme	354
21.5	Überwachung der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen	358
21.6	Ausblick und Perspektiven	358

22 Die Bremse im mechatronischen Fahrwerk	359
22.1 Einleitung	359
22.2 Fahrwerksmechanik	359
22.2.1 Funktionsstruktur und Schnittstellen von Radaufhängungen	359
22.2.2 Wechselwirkungen zwischen Bremse und Radaufhängung	360
22.2.3 Darstellung von Fahrwerksparametern	360
22.3 Grenzen passiver Fahrwerksysteme	361
22.3.1 Einschränkungen konventionell hydraulisch betätigter Radbremsen	361
22.3.2 Dynamik	362
22.3.3 Bremskomfort	362
22.3.4 Zielkonflikt zwischen Sicherheit und Komfort	362
22.4 Lösungspotenzial durch Mechatronik	363
22.4.1 Möglichkeiten der Mechatronik	363
22.4.2 Mechatronik in der Bremsanlage	364
22.4.3 Mechatronik in der Radaufhängung	366
22.4.4 Wechselwirkung zwischen Lenkung und Bremse	368
22.4.5 Wechselwirkung zwischen Reifen und Bremse	370
22.5 Ausblick	371
23 Reibbeläge	373
23.1 Einführung	373
23.2 Anforderung an Reibbeläge	373
23.3 Materialkonzepte	374
23.3.1 Semimetallische Reibbeläge	375
23.3.2 Low Steel Reibmaterialien	375
23.3.3 NAO-Reibbeläge	376
23.3.4 Metallfreie Reibbeläge	377
23.3.5 Hybridbeläge	377
23.3.6 Reibbeläge für keramische Scheiben	377
23.3.7 Zwischenschichten	378
23.4 Ökologie	379
23.5 Rohstoffe und ihre Eigenschaften in Reibbelägen	381
23.6 Prüfverfahren für Rohstoffe	383
23.6.1 Geräteanalytische Untersuchungsverfahren	384
23.7 Fertigungsverfahren	386
23.8 Ausblick	387
24 Eigenschaften der Reibpaarungen im Bremsprozess	389
24.1 Einführung	389
24.2 Prüfmöglichkeiten, Belastungskenngrößen und Beurteilungskriterien	389
24.2.1 Prüfmöglichkeiten und Messsysteme	389
24.2.2 Belastungskenngrößen	391
24.2.3 Kriterien zur Beurteilung der Reibungs- und Verschleißigenschaften	391
24.2.4 Reibflächentemperatur $\vartheta(t)$	393
24.3 Der Einlaufprozess	393
24.4 Der Funktionsmechanismus in der Kontaktfläche	394
24.5 Lokaler Belagverschleiß	396
24.6 Lokale Reibungszahlen	396
24.7 Erklärung des Funktionsmechanismus in der Kontaktfläche	397
24.8 Einflussgrößen auf die Reibungs- und Verschleißigenschaften	397
25 Mechanische Bremsen in stationären Industrieanlagen	401
25.1 Einführung	401
25.2 Industriebremsen	401
25.2.1 Bauarten	401
25.2.2 Das energetische Zusammenspiel zwischen Triebwerk und Bremse	403

25.2.3	Reibungs- und Verschleißeigenschaften der Reibpaarungen	404
25.2.4	Dimensionierung der Reibpaarungen von Industriebremsen	407
25.3	Reibscheibenbremsen	410
26	Schwingungen und Geräusche	412
26.1	Definition	412
26.2	Erscheinungsformen	412
26.2.1	Niederfrequente Schwingungen und Geräusche	412
26.2.2	Hochfrequente Geräusche	413
26.3	Erregungsquellen	413
26.3.1	Ursachen niederfrequenter Geräusche und Schwingungen	413
26.3.2	Entstehungsmechanismen hochfrequenter Geräusche	414
26.4	Auswirkungen	414
26.5	Prüf- und Beurteilungsmethoden	414
26.5.1	Simulation	415
26.5.2	Prüfstandsuntersuchungen	416
26.5.3	Fahrversuche	416
26.6	Maßnahmen zur Reduzierung bzw. Vermeidung	417
26.6.1	Maßnahmen an der Erregungsquelle	417
26.6.2	Maßnahmen an den Übertragungsstrecken	417
26.6.3	Einsatz von Sekundärmaßnahmen	418
26.7	Ausblick, Perspektiven	418
27	Bremsen mit nichtmetallischen Brems scheiben	420
27.1	Einleitung	420
27.1.1	Historie	420
27.1.2	Carbon-Brems scheiben	420
27.2	Werkstoff	420
27.2.1	Definition, Eigenschaften, Einsatzgebiete	420
27.2.2	Fertigung Carbon-Keramik-Brems scheibe	421
27.2.2.1	Fertigungsprozess	421
27.2.3	Qualitätssicherung	422
27.2.3.1	Fertigungsbegleitende Prüfungen	422
27.2.3.2	Serienbegleitende Prüfungen	422
27.3	Anwendung	422
27.3.1	Die Gestaltung von Keramikbremsen	422
27.3.1.1	Dimensionierung der Bremsanlage	422
27.3.1.2	Brems scheibenring	422
27.3.1.3	Brems scheibentopf	423
27.3.1.4	Bremsbeläge	424
27.3.2	Die Auswirkung der Keramikbremsen auf die Fahrzeugeigenschaften	424
27.3.2.1	Auswirkung auf die Brems eigenschaften	424
27.3.2.2	Auswirkungen auf Fahrleistungen, Fahreigenschaften und Fahrkomfort	424
27.3.3	Verschleißverhalten	424
27.3.3.1	Abrasiver Verschleiß	424
27.3.3.2	Rissbildung aufgrund von Wärmespannungen	424
27.3.3.3	Thermischer Verschleiß (Faserabbrand)	425
27.3.3.4	Verschleißindikation	425
27.4	Weiterentwicklung der Carbon-Keramik-Brems scheiben	425
28	Bremsflüssigkeiten	427
28.1	Bremsflüssigkeitstypen	427
28.1.1	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Glykolen, Glykolethern und deren Borsäureester	427
28.1.2	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Silikonestern	428
28.1.3	Bremsflüssigkeiten auf Basis von Mineralölen	428
28.2	Nationale und internationale Normen	428

28.3	Bremsflüssigkeitseigenschaften	429
28.3.1	Fahrzeugspezifische Eignung	429
28.3.2	Verträglichkeit mit anderen Bremsflüssigkeiten	429
28.3.3	Physikalische Kennwerte	429
28.4	Umgang mit Bremsflüssigkeiten	431
28.4.1	Handhabung	431
28.4.2	Lagerung	431
28.4.3	Entsorgung von Bremsflüssigkeiten	431
29	Bremsentechnisches Versuchswesen	432
29.1	Radbremse	432
29.1.1	Laborversuche	432
29.1.1.1	Funktionsverhalten	432
29.1.1.2	Dichtheit	433
29.1.1.3	Festigkeit	433
29.1.1.4	Vibration	434
29.1.1.5	Korrosion	434
29.1.2	Prüfstandsversuche	435
29.1.2.1	Bremsenprüfstände	435
29.1.2.2	Festigkeit und Bremsscheibenerprobung	440
29.1.2.3	Funktion der Radbremse	441
29.1.2.4	Performance	442
29.1.2.5	Komfort	443
29.1.3	Fahrversuche	445
29.1.3.1	Grundvermessung statisch/dynamisch	445
29.1.3.2	Reibwertuntersuchungen Bremsbelag	445
29.1.3.3	Leistungstests	446
29.1.3.4	Komforttests	447
29.1.3.5	Dauerläuferprobung	447
29.1.3.6	Gesetzliche Anforderungen	447
29.2	Elektronische Bremssysteme (EBS)	448
29.2.1	Laborversuche	448
29.2.1.1	Umweltsimulationen	448
29.2.1.2	Prüfung der Medienbeständigkeit	449
29.2.1.3	Prüfung in Schadgasatmosphären	449
29.2.1.4	Korrosionsprüfungen	449
29.2.2	Prüfstandsversuche	450
29.2.2.1	Funktionsentwicklungen am Prüfstand Gesamtsystem	450
29.2.2.2	Dauerläuferprobung EBS-Gesamtsystem	451
29.2.2.3	Vibrationsfestigkeit	452
29.2.3	Fahrversuche	452
30	Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremsanlagen	457
30.1	Die Bremse als Fehlerquelle	457
30.1.1	Sicherheitsbetrachtungen an konservativen Bremsanlagen	457
30.1.2	Sicherheitsbetrachtungen an Bremssystemen neuerer Technologien	458
30.1.2.1	Zuverlässigkeit von Systemen	459
30.1.2.2	Verfügbarkeit von Systemen	460
30.1.2.3	Anforderungen an sicherheitsgerichtete elektronische Systeme	460
30.2	Schlankes Testen („Lean Testing“) in der Fahrzeugindustrie	462
30.2.1	Begleitung der Entwicklungsphase	462
30.2.2	Die Homologation (Typbegutachtung)	462
30.2.3	Erfahrungen aus dem Feld	462
30.3	Entwicklung von Test- und Prüfgrundlagen	463
30.3.1	Weiterentwicklung der Hauptuntersuchung	463
30.3.2	Die zukünftige Typbegutachtung	465

31 Regelwerke und Prüfverfahren	467
31.1 Zulassungsverfahren in Europa und den USA	467
31.2 Entwicklung von Vorschriften in Europa und den USA	468
31.2.1 Entwicklung der Vorschriften in der EU	468
31.2.2 Entwicklung der Vorschriften bei der UN-ECE	468
31.2.3 Entwicklung der Vorschriften in den USA	469
31.3 Europäische Vorschriften für Straßenfahrzeuge	469
31.3.1 Allgemeine Vorschriften, ECE-Regelung 13 und EU-Richtlinie 71/320/EWG	470
31.3.2 Wirkvorschriften	471
31.3.3 Bremskraftverteilung und Kompatibilität zwischen Zugfahrzeug und Anhänger	473
31.3.4 Vorschriften für ABS-Systeme	474
31.3.5 Vorschriften für komplexe elektronische Systeme	474
31.3.6 Prüfung von Ersatzreibbelägen	475
31.4 US-amerikanische Bremsenvorschriften	475
31.4.1 FMVSS 105 – Hydraulische Bremsanlagen	475
31.4.2 FMVSS 121 – Pneumatische Bremsanlagen	475
31.4.3 FMVSS 106 – Bremsschlauchleitungen	475
31.4.4 FMVSS 116 – Bremsflüssigkeiten für Kraftfahrzeuge	475
31.5 Weltweite Harmonisierung	475
31.5.1 FMVSS 135 und ECE R.13H	475
31.5.2 Harmonisierung, ein Ausblick	476
32 Wartung und Diagnose von Bremsanlagen	477
32.1 Einfluss von Normen, Regeln und Gesetzen in der Praxis	477
32.2 Bremsendiagnose	478
32.2.1 Geräusche und Vibrationen	478
32.2.2 Pedalbox	478
32.2.3 Bremskraftverstärker	479
32.2.4 Hauptbremszylinder	480
32.2.5 Rohrleitungen und Bremsschläuche	480
32.2.6 Bremsen	481
32.2.6.1 Scheibenbremsen	481
32.2.6.2 Trommelbremsen	483
32.2.7 Druckregler	483
32.2.8 Bremsflüssigkeit	484
32.2.9 ABS, BA, EHB, VSC und weitere	484
32.3 Umwelt- und zeitwertgerechte Reparatur und Wartung	484
32.4 Testgeräte	485
33 Entwicklungstendenzen und Zukunftsaspekte	487
33.1 Gesellschaftliche und wirtschaftliche Tendenzen	487
33.2 Die Fahrzeugführungsaufgabe heute und morgen	488
33.3 Entwicklungssprünge durch neue Technologien	489
33.4 Grenzen der Hilfskraft-, Potenziale der Fremdkraftanlagen	490
33.5 Die Mensch-Maschine-Schnittstelle	491
33.6 Beispiele für By-wire-Technologien und Assistenzsysteme im Chassisbereich	491
33.6.1 Throttle-by-wire (E-Gas)	491
33.6.2 Shift-by-wire	492
33.6.3 Steer-by-wire	493
33.6.4 Brake-by-wire (EHB und EMB)	494
33.6.5 Energiemanagement im Auto von morgen: das 42-Volt-Bordnetz	494
33.7 Global Chassis Control, die Vernetzung der Assistenz- und Chassisysteme	495
33.7.1 ESP II – Vernetzung mit fremdansteuerbarer Überlagerungslenkung	495
33.7.2 Elektronisches Luftfederfahrwerk, Dämpfer- und Stabilisatorverstellung	496
33.7.3 Technische und wirtschaftliche Notwendigkeiten	497
33.7.4 APIA – Der umfassende Sicherheitsgedanke	498
33.7.5 Fernziel Unfallvermeidung	499
Sachwortverzeichnis	501