

# Inhaltsverzeichnis

---

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

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

6.3.4	Auslegung von Bremsregelsystemen .....	100
6.3.5	Auslegungskriterien von Elektro-Hydraulischen Bremssystemen .....	104
6.4	<b>Simulation von Bremssystemen .....</b>	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	<b>Aufbau und Komponenten von Pkw-Bremsanlagen .....</b>	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	<b>Bremssysteme und Bremsverhalten von Nutzfahrzeugen und Zügen .....</b>	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	Bremsekreisauflösungen und Bremsekreisausfall .....	175
8.2	Bremsanlagen für mittlere und schwere Nutzfahrzeuge .....	175
8.2.1	Bremsanlagenaufbau .....	177
8.2.2	Radbremsen und Betätigungs komponenten .....	179
8.3	Dauerbremsanlagen .....	181
8.3.1	Motorbremssysteme .....	182
8.3.2	Retarder .....	183

8.4	<b>Brems- und Antriebsschlupf – Regelsysteme</b> .....	186
8.4.1	Antiblockiersysteme .....	186
8.4.2	Traktionsregelung .....	187
8.5	<b>Elektronisches Bremsenmanagement</b> .....	188
8.5.1	Integration von Dauerbremsanlagen .....	190
8.5.2	Stabilitätsregelung mit integrierter Überschlagverhinderung .....	190
8.5.3	Optimierung der Kompatibilität zwischen Zug- und Anhängefahrzeug .....	192
8.5.4	Bremsassistent .....	193
8.5.5	Rückrollsperrre .....	194
8.5.6	Bremsbelagverschleißregelung .....	194
8.5.7	Abstandsregeltempomat .....	194
8.5.8	Systeme zur automatischen Fahrzeugführung .....	195
8.6	<b>Systemintegration und elektronische Vernetzung</b> .....	196
8.7	<b>Zusammenfassende Betrachtung von X-by-Wire Systemen</b> .....	196
	<b>Literatur</b> .....	197
9	<b>Nutzfahrzeugbremsen</b> .....	199
	<i>Hans Baumgartner, Eduard Gerum, Wolfgang Pahle, Alf Siebke und Michael Pehle</i>	
9.1	<b>Bauarten von druckluftbetätigten NFZ-Bremsen</b> .....	200
9.1.1	Trommelbremsen .....	200
9.1.2	Scheibenbremsen .....	200
9.2	<b>Aufbau und Wirkungsweise der druckluftbetätigten Schiebesattel-Scheibenbremse</b> .....	200
9.2.1	Betätigungsstystem .....	200
9.2.2	Automatisches Verschleißnachstellsystem .....	202
9.2.3	Nachstellverhalten .....	203
9.2.4	Bedeutung des Lüftspiels .....	204
9.2.5	Zusammenwirken Bremse/Radnabe .....	205
9.3	<b>Leistungs- und Lebensdauerverhalten</b> .....	207
9.3.1	Auslegungsdaten .....	207
9.4	<b>Reibkörper</b> .....	210
9.4.1	Bremsbeläge .....	210
9.4.2	Bremsscheibe .....	210
9.5	<b>Entwicklung und Erprobung von Bremse und Reibkörpern</b> .....	214
9.5.1	Berechnungsannahmen .....	215
9.5.2	Erprobung .....	216
9.6	<b>Anhängerbremsen</b> .....	217
9.6.1	Anhängerspezifische Besonderheiten .....	218
9.6.2	Anhängerspezifische Vorschriften .....	220
9.6.3	Anhängerspezifische Bremsanlagen .....	221
9.7	<b>Kompatibilität in Zügen</b> .....	223
9.7.1	Gesetzgebung .....	224
9.7.2	Zugabstimmung .....	225
9.7.3	Ursachen und Folgen unzureichender Kompatibilität .....	225
	<b>Literatur</b> .....	225
10	<b>Bremsverhalten und Bremsen von Einspurfahrzeugen</b> .....	227
	<i>Christian Landerl, Helmut Köhler, Hans-Albert Wagner, Ralf Lewien, Gerd Vilsmeier, Gerrit Heyl und Stefan Fritschle</i>	
10.1	<b>Krafträder</b> .....	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	<b>Auflaufbremsanlagen</b> .....	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	<b>Auslegung der Bremsanlage</b> .....	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	<b>Wartung – Pflege</b> .....	281
11.4.1	Wartung .....	281
11.4.2	Nachstellung .....	283
11.5	<b>Neue Entwicklungen</b> .....	283
11.5.1	Automatische Nachstellung in der Radbremse .....	283
11.5.2	Elektronische Anhängerstabilisierung .....	284
	Literaturverzeichnis .....	284
12	<b>Bremsen von Off-Road Radfahrzeugen</b> .....	285
	<i>Hermann Beck und Wolfgang Grünbeck</i>	
12.1	<b>Historische Entwicklung der Bremsen in Off-Road Fahrzeugen</b> .....	286
12.2	<b>Überblick über nationale und internationale Rechtsvorschriften für Bremsanlagen</b> .....	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	<b>Technische Ausführungen und Dimensionierung</b> .....	287
12.3.1	Trommelbremse .....	288
12.3.2	Scheibenbremse .....	288
12.3.3	Lamellenbremse .....	290
12.4	<b>Bremsprüfung und Bremswirkung</b> .....	294
12.4.1	Prüfungen im Laborbereich .....	294
12.4.2	Prüfungen im Fahrzeug .....	295
12.5	<b>Ausblicke und Tendenzen</b> .....	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

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

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

<b>17</b>	<b>Mechatronische Systeme – eine kurze Einführung</b>	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
<b>18</b>	<b>Grundlagen elektrisch betätigter Pkw-Bremssysteme</b>	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 Betätigungsseinrichtung	386
18.4.1	Stellglied	388
18.4.2	Basis-eigenschaften	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 betätigtes 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

<b>19</b>	<b>Regenerative Bremssysteme</b> .....	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	Volumenverbeldung .....	413
19.2.2	Pedalkraftsimulation .....	414
19.3	Beschreibung Systemkonzepte .....	415
19.3.1	Konzepte ohne Volumenverbeldung/Pedalkraftsimulation .....	415
19.3.2	Konzepte mit Volumenverbeldung/ohne Pedalkraftsimulation .....	417
19.3.3	Konzepte mit Volumenverbeldung/Pedalkraftsimulation .....	420
19.4	Zusammenfassung .....	422
<b>20</b>	<b>Integrierte Bremssysteme</b> .....	425
	<i>Hans-Jörg Feigel, Anton van Zanten, Heinz Leiber, Thomas Leiber, Christian Köglspurger und Valentin Unterfrauner</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
<b>21</b>	<b>Elektromechanisch betätigte Bremse</b> .....	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	Betätigungsseinrichtung .....	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
<b>22</b>	<b>Elektrisches Bremsen</b> .....	447
	<i>Marcus Bletz und Thorsten Wickenhäuser</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	<b>Bremssystemvarianten</b> .....	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	<b>Systemauslegung des Teilsystems Reibbremse</b> .....	457
22.4.1	Hydraulik THZ bis Sattel .....	457
22.4.2	Reibpaarung Bremsbelag/-Scheibe .....	457
22.4.3	Vakumbereitstellung .....	458
22.4.4	Fahrerwunsch-Sensorik .....	458
22.5	<b>Sicherheitskonzepte</b> .....	458
22.6	<b>Einfluss auf Verbrauch bzw. CO<sub>2</sub>-Emission und Reichweite</b> .....	459
22.6.1	Verbrauchszyklen .....	459
22.7	<b>Ausblick</b> .....	460
23	<b>Die Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen</b> .....	463
	<i>Anton van Zanten</i>	
23.1	<b>Übersicht, Funktion und Anforderungen an die Fahrerassistenzsysteme für PKW</b> .....	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	Bremssistent BA .....	481
23.1.8	Aktive Gespannstabilisierung .....	483
23.2	<b>Funktion der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen</b> .....	484
23.3	<b>Anforderungen der Fahrerassistenzsysteme an die Bremsanlage</b> .....	484
23.4	<b>Ausführungen der Bremsanlage für die Fahrerassistenzsysteme</b> .....	485
23.5	<b>Überwachung der Bremsanlage in Fahrerassistenzsystemen</b> .....	488
23.6	<b>Ausblick und Perspektiven</b> .....	489
	<b>Literatur</b> .....	490
24	<b>Die Bremse im mechatronischen Fahrwerk</b> .....	491
	<i>Hermann Winner, Thomas Degenstein, Tobias Bischof-Niemz und Marcus Schumann</i>	
24.1	<b>Einleitung</b> .....	492
24.2	<b>Fahrwerksmechanik</b> .....	492
24.2.1	Funktionsstruktur und Schnittstellen von Radaufhängungen .....	492
24.2.2	Darstellung von Fahrwerksparametern .....	494
24.3	<b>Grenzen passiver Fahrwerksysteme</b> .....	495
24.3.1	Einschränkungen konventionell hydraulisch betätigter Radbremsen .....	495
24.3.2	<b>Dynamik</b> .....	495
24.3.3	<b>Bremskomfort</b> .....	495
24.3.4	Zielkonflikt zwischen Sicherheit und Komfort .....	496
24.4	<b>Lösungspotentiale durch Mechatronik</b> .....	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	<b>Ausblick</b> .....	507
	<b>Literatur</b> .....	507

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

28.2.1	Niederfrequente Schwingungen und Geräusche .....	562
28.2.2	Hochfrequente Geräusche .....	562
28.3	<b>Erregungsquellen</b> .....	562
28.3.1	Ursachen niederfrequenter Geräusche und Schwingungen .....	562
28.3.2	Entstehungsmechanismen hochfrequenter Geräusche .....	564
28.4	<b>Auswirkungen</b> .....	565
28.4.1	Schwingungen .....	565
28.4.2	Akustische Auswirkungen .....	565
28.5	<b>Prüf- und Beurteilungsmethoden</b> .....	565
28.5.1	Simulation .....	565
28.5.2	Prüfstandsuntersuchungen .....	566
28.5.3	Fahrversuche .....	567
28.6	<b>Maßnahmen zur Reduzierung bzw. Vermeidung</b> .....	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	<b>Ausblick, Perspektiven</b> .....	569
	Literatur .....	570
29	<b>Bremsen mit nichtmetallischen Bremsscheiben</b> .....	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	<b>Werkstoff</b> .....	572
29.2.1	Definition, Eigenschaften, Einsatzgebiete .....	572
29.2.2	Fertigung Carbon-Keramik-Bremsscheibe .....	572
29.2.3	Qualitätssicherung .....	574
29.3	<b>Anwendung</b> .....	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	<b>Bremsflüssigkeiten</b> .....	581
	<i>Harald A. Dietl</i>	
30.1	<b>Bremsflüssigkeitstypen</b> .....	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	<b>Nationale und internationale Normen</b> .....	583
30.3	<b>Bremsflüssigkeitseigenschaften</b> .....	584
30.3.1	Fahrzeugspezifische Eignung .....	584
30.3.2	Verträglichkeit mit anderen Bremsflüssigkeiten .....	585
30.3.3	Physikalische Kennwerte .....	586
30.4	<b>Umgang mit Bremsflüssigkeiten</b> .....	586
30.4.1	Handhabung .....	586
30.4.2	Lagerung .....	587
30.4.3	Entsorgung von Bremsflüssigkeiten .....	587
	Literatur .....	587

<b>31</b>	<b>Bremsentechnisches Versuchswesen</b> .....	589
	<i>Holger Marschner, Hilmar Teige, 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	<b>Elektronische Bremsysteme (EBS)</b> .....	607
31.2.1	Laborversuche .....	607
31.2.2	Prüfstandversuche .....	611
31.2.3	Fahrversuche .....	614
<b>32</b>	<b>Sicherheit und Zuverlässigkeit von Bremsanlagen</b> .....	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	<b>Schlankes Testen (»Lean Testing«) in der Fahrzeugindustrie</b> .....	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	<b>Entwicklung von Test- und Prüfgrundlagen</b> .....	627
32.3.1	Weiterentwicklung der Hauptuntersuchung .....	628
32.3.2	Die zukünftige Typbegutachtung .....	630
	Literatur .....	631
<b>33</b>	<b>Regelwerke und Prüfverfahren</b> .....	633
	<i>Hans-Thomas Ebner</i>	
33.1	<b>Zulassungsverfahren in Europa und den USA</b> .....	634
33.2	<b>Entwicklung von Vorschriften in Europa und den USA</b> .....	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	<b>Europäische Vorschriften für Straßenfahrzeuge</b> .....	636
33.4	<b>ECE-Regelung 13</b> .....	637
33.4.1	Allgemeine Vorschriften .....	637
33.4.2	Wirkvorschriften .....	638
33.4.3	Bremsekraftverteilung 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	<b>ECE-Regelung 13 H</b> .....	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	<b>Prüfung von Ersatzreibrillen</b> .....	644
33.7	<b>Notbremsassistenzsysteme</b> .....	644
33.8	<b>US-amerikanische Bremsenvorschriften</b> .....	645
33.8.1	<b>FMVSS 105–Hydraulische Bremsanlagen</b> .....	645
33.8.2	<b>FMVSS 121–Pneumatische Bremsanlagen</b> .....	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	<b>Wartung und Diagnose von Bremsanlagen .....</b>	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	Bremsekraftverstärker .....	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	<b>Entwicklungstendenzen und Zukunftsaspekte .....</b>	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 Chassisysteme .....	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
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	681