

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Grundlagen</b>	1
1.1 Geschichte, Definition, Bedeutung	2
1.1.1 Entstehungsgeschichte	2
1.1.2 Definition und Abgrenzung	8
1.1.3 Aufgabe und Bedeutung	8
1.2 Fahrwerkrausbau	9
1.2.1 Fahrzeugklassen	9
1.2.2 Antriebskonzepte	11
1.2.3 Fahrwerkkonzeption	14
1.2.4 Trends in der Fahrwerkkonzeption	14
1.3 Fahrwerkauslegung	16
1.3.1 Anforderungen an das Fahrwerk	17
1.3.2 Fahrwerk-Kinematikauslegung	19
1.3.3 Kinematik der Radaufhängung	19
1.3.3.1 Kenngrößen des Fahrwerks am Fahrzeug	19
1.3.3.2 Momentanpole der Radaufhängung	21
1.3.3.3 Radhubkinematik	22
1.3.3.4 Kenngrößen der Radhubkinematik	22
1.3.3.5 Kenngrößen der Lenkkinematik	25
1.3.3.6 Kinematische Kennwerte aktueller Fahrzeugsmodelle	29
1.3.3.7 Raderhebungskurven	29
1.3.3.8 Software zur Radkinematikberechnung	32
1.3.4 Elastokinematik und Bauteilelastizitäten der Radaufhängung	33
1.3.5 Zielwerte für die Kenngrößen	34
1.3.6 Synthese der Radaufhängungen	34
<b>2 Fahrdynamik</b>	37
2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf	38
2.1.1 Fahrwiderstände	38
2.1.1.1 Radwiderstände	38
2.1.1.2 Anteil der Fahrbahn $F_{R,T}$	42
2.1.1.3 Luftwiderstand	46
2.1.1.4 Steigungswiderstand	46
2.1.1.5 Beschleunigungswiderstand	48
2.1.1.6 Gesamtfahrwiderstand	49
2.1.2 Seitenwindkräfte	49
2.1.3 Leistungs- und Energiebedarf	52
2.1.4 Kraftstoffverbrauch	53
2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	55
2.2.1 Physik der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	57
2.2.1.1 Bremsen und Antreiben	60
2.2.1.2 Kurvenfahrt	62
2.2.2 Reifenkräfte im Detail	66
2.2.3 Wirkung der Reifenkräfte auf die Fahrstabilität	68
2.3 Längsdynamik	69
2.3.1 Anfahren und Bremsen	70
2.3.1.1 Bremsnickausgleich	70
2.3.1.2 Anfahrnickausgleich	71
2.3.1.3 Lastwechsel bei Geradeausfahrt	71
2.4 Vertikaldynamik	72
2.4.1 Aufbaufedern	72
2.4.1.1 Federübersetzung	73
2.4.1.2 Eigenfrequenzen	73
2.4.2 Schwingungsdämpfer	74

2.4.3 Fahrbahn als Anregung .....	75
2.4.3.1 Harmonische Anregungen .....	75
2.4.3.2 Periodische Unebenheiten .....	76
2.4.3.3 Stochastische Unebenheiten .....	76
2.4.3.4 Spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten .....	77
2.4.3.5 Gemessene, reale Fahrbahnunebenheiten .....	77
2.4.4 Zweimassen Feder-Dämpfersystem mit dem Reifen als Federelement .....	78
2.4.5 Federungsmodelle .....	80
2.4.5.1 Einmassen-Ersatzsystem .....	80
2.4.5.2 Zweimassen-Ersatzsystem .....	80
2.4.5.3 Erweiterung um Sitzfederung .....	81
2.4.5.4 Einspur-Federungsmodell .....	82
2.4.5.5 Zweispur-Federungsmodell .....	83
2.4.6 Parametervariation .....	85
2.4.7 Verknüpfung Fahrbahn-Fahrzeug .....	87
2.4.7.1 Spektrale Dichte der Aufbaubeschleunigung .....	88
2.4.7.2 Spektrale Dichte der Radlastschwankungen .....	89
2.4.8 Menschliche Schwingungsbewertung .....	90
2.4.9 Erkenntnisse aus den vertikaldynamischen Grundlagen .....	91
2.5 Querdynamik .....	92
2.5.1 Anforderungen an das Fahrverhalten .....	92
2.5.2 Lenkkinematik .....	93
2.5.2.1 Statische Lenkungsauslegung .....	94
2.5.2.2 Dynamische Lenkungsauslegung .....	94
2.5.3 Fahrzeugmodellierung .....	95
2.5.3.1 Einfaches Einspurmodell .....	95
2.5.3.2 Einfache Betrachtungen der Fahrdynamik .....	97
2.5.3.3 Bewegungsvorgänge beim Über- und Untersteuern .....	100
2.5.3.4 Erweitertes Einspurmodell mit Hinterradlenkung .....	100
2.5.3.5 Nichtlineares Einspurmodell .....	102
2.5.3.6 Instationäre Betrachtungen des einfachen Einspurmodells .....	103
2.5.4 Die Regelstrecke „Fahrzeug“ im Regelkreis .....	106
2.5.4.1 Dynamisches Verhalten der Regelstrecke Fahrzeug .....	106
2.5.4.2 Schwimmwinkelkompensation mittels Hinterradlenkung .....	109
2.5.5 Frequenzgangbetrachtung bei variierten Fahrzeugkonfigurationen .....	110
2.5.5.1 Variation der Fahrgeschwindigkeit .....	111
2.5.5.2 Variation des Gierträgheitsmomentes .....	111
2.5.5.3 Variation der hinteren Schräglauftsteifigkeit .....	111
2.5.6 Zweispur-Fahrzeugmodellierung .....	112
2.5.7 Parametervariation .....	115
2.5.7.1 Variation der Schwerpunktthöhe (Variante 1) .....	115
2.5.7.2 Variation der Schwerpunktlage in Längsrichtung (Variante 2) .....	116
2.5.7.3 Variation der Wankachse (Variante 3) .....	116
2.5.7.4 Variation der Wankfederverteilung (Variante 4) .....	117
2.5.7.5 Variation des Antriebskonzepts (Variante 5) .....	118
2.6 Allgemeine Fahrdynamik .....	119
2.6.1 Wechselwirkungen zwischen Vertikal-, Längs- und Querdynamik .....	119
2.6.1.1 Vertikalkraftschwankungen .....	119
2.6.2 Kritische Fahrsituationen .....	120
2.6.2.1 Bremsen in der Kurve .....	120
2.6.2.2 Beschleunigte Kurvenfahrt .....	121
2.6.2.3 Lastwechsel in der Kurve .....	122
2.6.2.4 Vertikalanregung durch Fahrbahnunebenheiten bei Kurvenfahrt .....	123
2.6.2.5 Bremsen und Anfahren auf einer inhomogenen Fahrbahnoberfläche ( $\mu$ -Split) .....	123
2.7 Fahrverhalten .....	124
2.7.1 Beurteilung des Fahrverhaltens .....	125
2.7.2 Fahrmanöver .....	126
2.7.3 Fahrmanöver Parameterraum .....	129
2.7.4 Abstimmungsmaßnahmen .....	131
2.7.4.1 Abstimmungsmaßnahmen zum stationären Lenkverhalten .....	131

2.7.5	Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung .....	131
2.7.5.1	Bewertungsmethoden und Darstellung .....	131
2.7.5.2	Anfahrverhalten .....	134
2.7.5.3	Bremsverhalten .....	134
2.7.5.4	Lenkverhalten .....	134
2.7.5.5	Kurveverhalten .....	138
2.7.5.6	Geradeausfahrt .....	138
2.7.5.7	Fahrkomfort (subjektiv) .....	138
2.7.6	Objektive Fahrverhaltensbeurteilung .....	143
2.7.6.1	Messgrößen .....	143
2.7.6.2	Anfahrverhalten .....	143
2.7.6.3	Bremsverhalten .....	144
2.7.6.4	Lenkverhalten .....	146
2.7.6.5	Kurveverhalten .....	147
2.7.6.6	Geradeausfahrt .....	149
2.7.6.7	Fahrkomfort (objektiv) .....	151
2.8	Aktive und passive Sicherheit .....	151
<b>3</b>	<b>Bestandteile des Fahrwerks .....</b>	<b>155</b>
3.1	Struktur des Fahrwerks .....	155
3.1.1	Funktionelle Struktur des Fahrwerks .....	155
3.1.2	Modulare Struktur des Fahrwerks .....	156
3.1.3	Bestandteile des Fahrwerks .....	156
3.2	Antriebsstrang .....	157
3.2.1	Anordnungen .....	157
3.2.2	Achsgetriebe .....	157
3.2.2.1	Differenziale .....	157
3.2.2.2	Sperrdifferenziale .....	158
3.2.2.3	Aktive Sperrdifferenziale .....	159
3.2.2.4	Torque Vectoring .....	159
3.2.3	Allradantrieb (Längsverteiler) .....	161
3.2.4	Allradantrieb (Längs-/Querverteiler) .....	162
3.2.5	Betriebsstrategien .....	163
3.2.6	Aktuelle Allradsysteme .....	163
3.2.7	Seitenwellen .....	165
3.3	Radbremsen und Bremssysteme .....	166
3.3.1	Aufgaben und Grundlagen .....	166
3.3.2	Arten von Bremsanlagen .....	167
3.3.2.1	Allgemeine Anforderungen .....	167
3.3.3	Gesetzliche Vorschriften .....	169
3.3.4	Auslegung der Bremsanlage .....	169
3.3.4.1	Bremeskraftverteilung .....	169
3.3.4.2	Dimensionierung .....	171
3.3.4.3	Bremskennung .....	171
3.3.5	Bremsmomente und Dynamik .....	172
3.3.5.1	Bremsmomente .....	172
3.3.5.2	Bremsdynamik .....	173
3.3.6	Komponenten des Bremssystems .....	173
3.3.6.1	Bremssattel .....	174
3.3.6.2	Bremsscheiben .....	178
3.3.6.3	Bremsbeläge .....	179
3.3.6.4	Trommelbremsen .....	179
3.3.6.5	Bremsleitungen und -schläuche .....	181
3.3.6.6	Bremsflüssigkeit .....	181
3.3.6.7	Bremeskraftverstärker .....	182
3.3.6.8	Tandem-Hauptzylinder .....	184
3.3.6.9	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) .....	185
3.3.7	Elektronische Bremsregelsysteme .....	189
3.3.7.1	Bremssistent (MBA, EBA, HBA) .....	189
3.3.7.2	Hydraulisch/Elektronische Regeleinheit (HECU) .....	191

3.3.7.3 Raddrehzahlsensor . . . . .	192
3.3.7.4 Funktionen der elektronischen Bremssysteme . . . . .	193
3.3.8 Neuartige Bremssysteme . . . . .	199
3.3.8.1 Elektrohydraulische Bremse (EHB) . . . . .	199
3.3.8.2 Elektromechanische Bremse (EMB) . . . . .	200
3.3.8.3 Elektrohydraulische Kombibremse (EHC) . . . . .	201
3.3.8.4 Regenerative Bremssysteme . . . . .	202
3.3.9 Vernetztes Chassis . . . . .	203
3.4 Lenksysteme . . . . .	205
3.4.1 Anforderungen und Bauformen . . . . .	205
3.4.2 Hydraulische Zahnstangenlenkung . . . . .	207
3.4.2.1 Technik und Funktion . . . . .	207
3.4.2.2 Aufbau und Bauteile . . . . .	210
3.4.2.3 Spurstangen . . . . .	213
3.4.3 Lenkstrang und Lenksäule . . . . .	217
3.4.3.1 Komponenten und Funktionseinheiten . . . . .	217
3.4.3.2 Auslegung und Erprobung . . . . .	219
3.4.3.3 Crashanforderungen und Energieverzehrmechanismen . . . . .	220
3.4.3.4 Ausblick und Modularisierung . . . . .	223
3.4.4 Lenkrad . . . . .	223
3.4.5 Elektromechanische Lenkung . . . . .	225
3.4.5.1 Bauformen . . . . .	225
3.4.5.2 Aufbau und Vorteile . . . . .	227
3.4.5.3 Bedeutung der Lenkung für die Assistenzsysteme . . . . .	230
3.4.6 Überlagerungs- oder Aktivlenkung . . . . .	231
3.4.6.1 Überlagerung von Momenten . . . . .	231
3.4.6.2 Überlagerung von Winkeln . . . . .	232
3.4.6.3 Stellervarianten der Aktivlenkung . . . . .	232
3.4.6.4 Überlagerungsaktor am Lenkgetriebe . . . . .	232
3.4.6.5 Überlagerungsaktor in der Lenksäule . . . . .	234
3.4.6.6 Steuergerät und Sicherheitskonzept . . . . .	235
3.4.6.7 Funktionen der Aktivlenkung . . . . .	235
3.4.7 Zahnstangenservolenkung mit Momenten- und Winkelsteller . . . . .	237
3.4.8 Hinterachs- und Allradlenkung . . . . .	238
3.4.9 Steer-by-wire-Lenksystem und Einzelradlenkung . . . . .	240
3.4.9.1 Systemkonzept und Bauteile . . . . .	241
3.4.9.2 Technik, Vorteile und Chancen . . . . .	243
3.5 Federn und Stabilisatoren . . . . .	244
3.5.1 Aufgabe der Federung . . . . .	244
3.5.2 Systematik der Federarten . . . . .	245
3.5.3 Konstruktion und Berechnung von Stahlfedern . . . . .	245
3.5.3.1 Blattfedern . . . . .	245
3.5.3.2 Drehstabfedern . . . . .	248
3.5.3.3 Stabilisatoren . . . . .	249
3.5.3.4 Schraubenfedern . . . . .	257
3.5.4 Werkstoffe für Stahlfedern . . . . .	265
3.5.5 Herstellung von Stahlfedern . . . . .	267
3.5.5.1 Warmumformung . . . . .	267
3.5.5.2 Vergütung warmgeformter Federn . . . . .	269
3.5.5.3 Kaltumformung . . . . .	269
3.5.5.4 Kugelstrahlen . . . . .	270
3.5.5.5 Plastifizieren . . . . .	271
3.5.5.6 Korrosionsschutz . . . . .	271
3.5.5.7 Endkontrolle und Markierung . . . . .	272
3.5.6 Compositfedern . . . . .	272
3.5.7 Federung für Niveauregelung . . . . .	273
3.5.7.1 Aufgaben und Bauarten . . . . .	273
3.5.7.2 Berechnung von Gasfedern und deren Eigenschaften . . . . .	274
3.5.8 Federung durch Elastomerfeder . . . . .	277
3.5.9 Federung durch Gaskompression . . . . .	277

3.5.9.1 Vor- und Nachteile von Gasfedern .....	278
3.5.9.2 Luftfederung .....	278
3.5.9.3 Hydropneumatische Federung .....	279
3.6 Dämpfung .....	279
3.6.1 Aufgabe der Dämpfung .....	279
3.6.2 Teleskopdämpfer-Bauarten .....	283
3.6.2.1 Zweirohrdämpfer .....	283
3.6.2.2 Einrohrdämpfer .....	284
3.6.2.3 Vergleich beider Dämpferarten .....	284
3.6.2.4 Sonderbauarten .....	285
3.6.3 Stoßdämpferberechnung .....	285
3.6.4 Zusatzfunktionen im Dämpfer .....	286
3.6.4.1 Zug- und Druckanschläge .....	286
3.6.4.2 Hubabhängige Dämpfung .....	289
3.6.4.3 Amplitudenselektive Dämpfung .....	290
3.6.5 Dämpferlager .....	291
3.6.6 Semiaktive Dämpfung .....	292
3.6.6.1 Lastabhängige Dämpfung .....	292
3.6.6.2 Elektrisch verstellbare Dämpfung .....	292
3.6.7 Alternative Dämpfungsprinzipien .....	296
3.6.7.1 Dämpfer mit rheologischen Flüssigkeiten .....	297
3.6.7.2 Verbunddämpfung .....	297
3.6.7.3 Elektrischer Dämpfer .....	298
3.6.8 Kombinierte Feder-/Dämpfereinheiten .....	298
3.6.8.1 Federträger und Federbein .....	298
3.6.8.2 Hydropneumatische Federung .....	300
3.6.8.3 Selbstpumpendes, hydropneumatisches Feder- und Dämpferelement .....	300
3.6.8.4 Luftfederung und hydraulischer Dämpfer .....	303
3.6.9 Gas-Feder-Dämpfereinheiten (GFD) .....	305
3.6.9.1 Physikalische Grundlagen .....	305
3.6.9.2 Auslegung der Gas-Feder-Dämpfereinheit .....	309
3.6.9.3 Ausführungsbeispiele von Gas-Feder-Dämpfereinheiten .....	315
3.6.9.4 Formelzeichen und Basisformeln der Gas-Feder-Dämpfer-Einheiten .....	317
3.7 Radführung .....	317
3.7.1 Aufgaben, Struktur und Systematik .....	317
3.7.2 Lenker Aufgaben, Struktur und Systematik .....	319
3.7.2.1 Führungslenker .....	320
3.7.2.2 Traglenker .....	320
3.7.2.3 Hilfslenker .....	321
3.7.2.4 Anforderungen an Fahrwerkslenker .....	321
3.7.2.5 Werkstoffe für Fahrwerkslenker .....	321
3.7.2.6 Herstellverfahren für Fahrwerklenker .....	322
3.7.2.7 Herstellverfahren für Aluminiumlenker .....	330
3.7.2.8 Auslegung und Optimierung der Lenker .....	331
3.7.2.9 Integration der Gelenke an den Lenker .....	332
3.7.3 Kugelgelenk .....	333
3.7.3.1 Aufgabe und Anforderungen .....	333
3.7.3.2 Systematik für Kugelgelenke .....	334
3.7.3.3 Aufbau der Kugelgelenke .....	334
3.7.3.4 Lagersystem (Schale, Fett) .....	337
3.7.3.5 Dichtsystem (Balg, Spannring) .....	340
3.7.3.6 Führungsgelenke .....	343
3.7.3.7 Traggelenke .....	344
3.7.3.8 Hülsengelenke .....	346
3.7.4 Gummilager .....	347
3.7.4.1 Aufgabe, Anforderungen, Funktion .....	347
3.7.4.2 Ausführungen .....	350
3.7.5 Drehgelenk .....	351
3.7.6 Drehschubgelenk .....	352
3.7.7 Kugelschubgelenk .....	353

3.7.8 Achsträger .....	353
3.7.8.1 Aufgabe und Anforderungen .....	353
3.7.8.2 Systematik und Bauarten .....	354
3.8 Radträger und Radlager .....	356
3.8.1 Bauarten für Radträger .....	357
3.8.2 Werkstoffe und Herstellverfahren für Radträger .....	358
3.8.3 Bauarten für Radlager .....	358
3.8.3.1 Dichtung .....	362
3.8.3.2 Schmierung .....	362
3.8.3.3 ABS-Sensoren .....	363
3.8.4 Herstellung von Radlagern .....	365
3.8.4.1 Ringe und Flansche .....	365
3.8.4.2 Käfige und Wälzkörper .....	365
3.8.4.3 Montage .....	366
3.8.5 Anforderung, Auslegung und Erprobung .....	366
3.8.5.1 Ermüdungslebensdauer (Überrollfestigkeit) des Radlagers .....	368
3.8.5.2 Bauteilstfestigkeit und Kippsteifigkeit .....	370
3.8.5.3 Verifizierung durch Prüfmethoden .....	371
3.8.6 Ausblick .....	373
3.9 Reifen und Räder .....	377
3.9.1 Anforderungen an den Reifen .....	377
3.9.1.1 Gebrauchseigenschaften .....	377
3.9.1.2 Gesetzliche Anforderungen .....	381
3.9.1.3 Umweltaspekte .....	382
3.9.2 Bauarten, Aufbau und Material .....	383
3.9.2.1 Reifenbauarten .....	383
3.9.2.2 Reifenaufbau .....	383
3.9.2.3 Sommer-, Winter-, All-Seasonreifen .....	384
3.9.2.4 Reifenmaterialien .....	384
3.9.2.5 Viskoelastische Eigenschaften von Gummi .....	386
3.9.3 Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn .....	387
3.9.3.1 Tragverhalten .....	387
3.9.3.2 Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften .....	387
3.9.3.3 Antreiben und Bremsen, Umfangskräfte .....	388
3.9.3.4 Schräglauf, Seitenkräfte und Rückstellmomente .....	389
3.9.3.5 Schräglaufsteifigkeit .....	390
3.9.3.6 Reifen unter Quer- und Längsschlupf .....	391
3.9.3.7 Reifengleichförmigkeit .....	392
3.9.4 Reifenmodelle für die Simulation .....	392
3.9.4.1 Reifenmodelle für die Horizontaldynamik .....	392
3.9.4.2 Reifenmodelle mit Finiten Elementen (FEM-Modelle) .....	394
3.9.4.3 Reifenmodelle für die Vertikaldynamik .....	394
3.9.4.4 Reifenmoden .....	395
3.9.4.5 Eigenschwingung der Kavität .....	395
3.9.4.6 Gesamtmodelle .....	395
3.9.5 Auswahl und Entwicklung von Reifen und Rädern .....	396
3.9.5.1 Reifen .....	396
3.9.5.2 Rad .....	396
3.9.6 Moderne Reifentechnologien .....	397
3.9.6.1 Reifensoristik .....	397
3.9.6.2 Reifennotlaufsysteme .....	399
3.9.6.3 Reifen und Regelsysteme .....	400
3.9.6.4 High-Performance-(HP-) und Ultra-High-Performance-(UHP-)Reifen .....	401
3.9.7 Test und Messmethoden im Fahrversuch .....	403
3.9.7.1 Subjektive Testverfahren .....	403
3.9.7.2 Objektive Testverfahren für die Längshaftung .....	404
3.9.7.3 Objektive Testverfahren für die Seitenhaftung .....	405
3.9.7.4 Akustik .....	405
3.9.8 Test und Messmethoden im Labor .....	405
3.9.8.1 Grundkonzepte für Reifenprüfstände .....	405

3.9.8.2 Festigkeitsprüfung .....	406
3.9.8.3 Charakteristikmessungen am Prüfstand .....	406
3.9.8.4 Charakteristikmessungen mit dem Laborfahrzeug .....	407
3.9.8.5 Rollwiderstandsmessung .....	407
3.9.8.6 Uniformity- und Geometrie-Messung .....	408
3.9.8.7 Streckenmessung und Modellierung .....	409
3.9.8.8 Verlustleistungsanalyse .....	409
3.9.8.9 Reifentemperaturverfahren .....	410
3.9.9 Zukünftige Reifentechnologien .....	411
3.9.9.1 Materialentwicklung .....	411
3.9.9.2 Rollwiderstandsenkung (Sparreifen) .....	411
3.9.9.3 Neuartige Reifenkonzepte .....	412
<b>4 Achsen und Radaufhängungen .....</b>	<b>417</b>
4.1 Starrachsen .....	419
4.1.1 Starrachsen mit Längsblattfederführung .....	421
4.1.2 Starrachsen mit Längs- und Querlenker .....	422
4.1.3 De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse mit Zentralgelenk .....	424
4.1.4 Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse) .....	424
4.2 Halbstarrachsen .....	424
4.2.1 Verbundlenkerachsen .....	424
4.2.1.1 Torsionskurbelachse .....	426
4.2.1.2 Koppellenkerachse .....	426
4.2.1.3 Verbundlenkerachse .....	427
4.2.1.4 Verbundlenkerachse mit Wattgestänge .....	427
4.2.1.5 Verbundlenkerachse mit entkoppeltem Radträger .....	427
4.2.2 Dynamische Verbundachse (DVA) .....	428
4.3 Einzelradaufhängungen .....	428
4.3.1 Kinematik der Einzelradaufhängung .....	428
4.3.2 Eigenschaften der Einzelradaufhängungen .....	431
4.3.3 Einzelradaufhängungen mit einem Lenker .....	431
4.3.3.1 Längslenker-Einzelradaufhängungen .....	431
4.3.3.2 Schräglenger-Einzelradaufhängungen .....	432
4.3.3.3 Schraublenker-Einzelradaufhängungen .....	434
4.3.4 Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern .....	434
4.3.4.1 Quer-Längs-Pendelachsen .....	434
4.3.4.2 Trapezlenker mit einem Querlenker .....	434
4.3.4.3 Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse) .....	435
4.3.5 Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern .....	435
4.3.5.1 Längslenker mit zwei Querlenkern .....	435
4.3.5.2 Längslenker mit zwei Schräglenkern (Zentrallenker-Einzelradaufhängung) .....	436
4.3.5.3 Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen .....	436
4.3.6 Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Hinterachse (Mehrlenker) .....	439
4.3.6.1 Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung des unteren 3-Punkt-Lenkers .....	440
4.3.6.2 Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung der oberen 3-Punkt-Lenker .....	441
4.3.6.3 Trapezlenkeraufhängung (Integrallenker) .....	441
4.3.6.4 Mehrlenkerhinterachsen mit Längslenker .....	442
4.3.7 Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Vorderachse (Mehrlenker) .....	444
4.3.8 Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern .....	446
4.3.8.1 Fünflenker Einzelradaufhängung – Vorderachse .....	446
4.3.8.2 Fünflenker Einzelradaufhängung – Hinterachse (Raumlenker) .....	446
4.3.9 Federbein-Einzelradaufhängungen .....	448
4.3.9.1 Dreieckslenker-Federbeinaufhängung .....	448
4.3.9.2 McPherson mit Querverbindungstraverse .....	450
4.3.9.3 McPherson mit optimiertem Lenker .....	450
4.3.9.4 McPherson mit aufgelöstem unteren Lenker (Dreilenker-Federbein) .....	450
4.3.9.5 McPherson mit doppeltem Radträger .....	451
4.3.9.6 Federbeinaufhängung für die Hinterachse .....	451
4.4 Einzelradaufhängungen der Vorderachse .....	452
4.4.1 Anforderungen an die Vorderachsaufhängungen .....	452

4.4.2 Komponenten der Vorderachse .....	453
4.4.3 Einsatzgebiete der Vorderachstypen .....	454
4.4.4 Besonderheiten der Vorderachsauflösungen .....	454
4.5 Einzelradaufhängungen der Hinterachse .....	455
4.5.1 Anforderungen an die Hinterachse .....	455
4.5.2 Komponenten der Hinterachse .....	457
4.5.3 Einsatzgebiete der Hinterachstypen .....	457
4.5.4 Besonderheiten der Hinterachsauflösungen .....	458
4.5.4.1 Nicht angetriebene Hinterachse .....	458
4.5.4.2 Angetriebene Hinterachse .....	458
4.5.4.3 Verbundlenker Hinterachsen .....	458
4.5.4.4 Mehrlenker Hinterachsen .....	459
4.6 Gesamtfahrwerk .....	459
4.6.1 Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse .....	459
4.6.2 Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs .....	459
4.6.3 Achslastverlagerungen .....	459
4.6.4 Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen .....	459
4.7 Radaufhängungen der Zukunft .....	460
4.7.1 Achstypen der letzten 20 Jahre .....	460
4.7.2 Häufigkeit der aktuellen Achstypen .....	460
4.7.3 Die zukünftigen Vorderachstypen (Tendenzen) .....	462
4.7.4 Die zukünftigen Hinterachstypen (Tendenzen) .....	462
<b>5 Fahrkomfort .....</b>	<b>465</b>
5.1 Grundlagen, Mensch und NVH .....	465
5.1.1 Begriffe und Definitionen .....	465
5.1.2 Schwingungs- und Geräuschquellen .....	467
5.1.3 Wahrnehmungsgrenzen des Menschen .....	467
5.1.4 Das Wohlbefinden des Menschen .....	468
5.1.5 Maßnahmen gegen Schwingungen und Geräusche .....	469
5.1.6 Vorgehen bei der NVH-Optimierung .....	470
5.2 Gummiverbundteile .....	471
5.2.1 Funktion der Gummiverbundteile .....	471
5.2.1.1 Kräfte übertragen .....	471
5.2.1.2 Definierte Bewegungen ermöglichen .....	471
5.2.1.3 Geräusche isolieren .....	471
5.2.1.4 Schwingungen dämpfen .....	472
5.2.2 Elastomer spezifische Definitionen .....	473
5.2.2.1 Kennlinien .....	473
5.2.2.2 Dämpfung .....	474
5.2.2.3 Setzung .....	474
5.3 Aggregatelager .....	475
5.4 Fahrwerk – Gummilager .....	479
5.4.1 Hülsenlager .....	479
5.4.2 Gleitlager .....	481
5.4.3 Hydraulisch dämpfende Buchsen .....	481
5.4.4 Verbundlenkerlager .....	484
5.5 Achsträgerlager .....	484
5.6 Federbeinstützlager .....	486
5.7 Berechnungsmethoden .....	487
5.8 Akustische Bewertung von Gummiverbundteilen .....	488
5.9 Zukünftige Bauteilausführungen .....	489
5.9.1 Sensorik .....	490
5.9.2 Schaltbares Fahrwerk .....	491
5.9.3 Regelbares Fahrwerk .....	492
<b>6 Fahrwerkentwicklung .....</b>	<b>495</b>
6.1 Entstehung des Fahrwerks .....	495
6.1.1 Entwicklungsprozess .....	496
6.1.2 Projektmanagement (PM) .....	501

6.2 Planung und Definitionsphase .....	501
6.2.1 Zielwertkaskadierung .....	502
6.3 Konzeptphase .....	503
6.4 Virtuelle Simulation .....	503
6.4.1 Software für die Mehrkörpersimulation (MKS) .....	504
6.4.1.1 Aufbau von MKS-Fahrwerksmodellen mit ADAMS/Car .....	504
6.4.1.2 CAD-Fahrwerkmodell und Mehrkörpersystem .....	504
6.4.1.3 Mehrkörpersimulation mit starren und flexiblen MKS-Modellen .....	504
6.4.1.4 Mehrkörpersimulation mit Gesamt-fahrzeug-, Fahrwerk- und Achsmodellen .....	506
6.4.1.5 Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die kinematischen Kennwerte .....	506
6.4.2 Software für Finite Elemente Methode (FEM) .....	506
6.4.2.1 Klassifizierung der Analysen .....	508
6.4.2.2 Festigkeitsanalysen .....	508
6.4.2.3 Steifigkeitsanalysen .....	508
6.4.2.4 Eigenfrequenzanalysen .....	508
6.4.2.5 Lebensdauer-Betriebsfestigkeit .....	509
6.4.2.6 Crash-Simulationen .....	510
6.4.2.7 Topologie- und Formoptimierung .....	510
6.4.2.8 Simulation der Fertigungsverfahren .....	510
6.4.3 Vollfahrzeugsimulation .....	511
6.4.3.1 Fahrdynamiksimulation .....	511
6.4.3.2 Kinematik/Elastokinematik .....	511
6.4.3.3 Standard-Lastfälle .....	512
6.4.3.4 MKS-Modellverifikation .....	512
6.4.3.5 NVH .....	513
6.4.3.6 Loadmanagement (Lastenkaskadierung vom System zur Komponente) .....	514
6.4.3.7 Vollfahrzeug Betriebsfestigkeitssimulation .....	518
6.4.4 Software zur 3D-Modellierung CAD .....	518
6.5 Integrierte Simulationsumgebung .....	519
6.5.1 Kinematische Analyse: Basistool ABE .....	519
6.5.2 Vollautomatische Kinematik- und Elastokinematik-Optimierung OPT .....	521
6.5.3 Virtuelle Produktentwicklungsumgebung .....	522
6.6 Serienentwicklung und Absicherung .....	524
6.6.1 Konstruktion .....	524
6.6.1.1 Bauteilkonstruktion .....	525
6.6.1.2 Bauraum „Package“ .....	525
6.6.1.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse .....	526
6.6.1.4 Toleranzuntersuchungen .....	526
6.6.2 Validierung .....	526
6.6.2.1 Prototypen .....	526
6.6.2.2 Validierung am Prüfstand .....	527
6.6.2.3 Straßen-Simulationsprüfstand (SSP) .....	529
6.6.3 Validierung am Gesamtfahrzeug .....	530
6.6.4 Optimierung und Abstimmung .....	531
6.7 Serienbegleitende Entwicklung .....	531
6.8 Ausblick und Zusammenfassung .....	532
 7 Fahrwerkelektronik .....	535
7.1 Motivation und Nutzen .....	535
7.1.1 Grenzen passiver Fahrwerke .....	535
7.1.1.1 Zielkonflikt Dämpfungsauslegung .....	535
7.1.1.2 Zielkonflikt Federungsauslegung .....	536
7.1.1.3 Zielkonflikt Lenkübersetzung .....	536
7.1.1.4 Forderung nach aktiven Systemen .....	536
7.1.2 Fahrzeugführung .....	537
7.1.2.1 Regelkreis Fahrer–Fahrzeug .....	537
7.1.2.2 Vereinfachte Fahrzeugführung .....	537
7.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme .....	538
7.2.1 Begriffsbestimmungen .....	538
7.2.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme in Domänen .....	538

7.3 Längsdynamikfunktionen . . . . .	539
7.3.1 Traktionsregelung mit dem Allradverteilergetriebe . . . . .	539
7.3.2 Traktionsregelung Achsgetriebe . . . . .	540
7.3.3 Torque Vectoring . . . . .	541
7.4 Vertikaldynamikfunktionen . . . . .	542
7.4.1 Variable Dämpfer . . . . .	542
7.4.2 Aktiver Stabilisator . . . . .	543
7.4.3 Niveauregulierung . . . . .	544
7.5 Querdynamikfunktionen . . . . .	544
7.5.1 Elektrolenkung . . . . .	545
7.5.2 Überlagerungslenkung . . . . .	546
7.5.3 Hinterachslenkung . . . . .	546
7.6 Systemvernetzung und Funktionsintegration . . . . .	547
7.6.1 Systemvernetzung . . . . .	547
7.6.2 Fahrdynamikregelung . . . . .	548
7.6.3 Funktionsintegration . . . . .	551
7.6.4 Funktionsarchitektur . . . . .	551
7.6.5 Standardschnittstellen / Autosar . . . . .	552
7.7 Elektronik-Hardware, Sensorik und Aktuatorik . . . . .	553
7.7.1 Technologiebeispiele . . . . .	553
7.7.2 Umweltanforderungen . . . . .	556
7.7.3 Bussysteme im Fahrwerk . . . . .	557
7.7.3.1 CAN-Bus . . . . .	557
7.7.3.2 FlexRay . . . . .	557
7.7.4 Aktuatoren im Fahrwerk . . . . .	558
7.7.5 Sensoren im Fahrwerk . . . . .	559
7.8 Entwicklung der Fahrwerkregelsysteme . . . . .	561
7.8.1 Entwicklung gemäß Automotive SPICE . . . . .	561
7.8.2 Funktionale Sicherheit . . . . .	563
7.8.3 Simulation der Fahrwerkelektronik . . . . .	564
7.8.4 Hardware-in-the-Loop-Simulation . . . . .	565
<b>8 Elektronische Systeme im Fahrwerk . . . . .</b>	<b>569</b>
8.1 Elektronische Struktur des Fahrwerks . . . . .	569
8.2 Mechatronische Längsdynamiksysteme . . . . .	569
8.2.1 Antriebssysteme . . . . .	569
8.2.1.1 xDrive . . . . .	570
8.2.1.2 Active Yaw Control (AYC) . . . . .	571
8.2.1.3 Quattro Sport Differential . . . . .	572
8.2.1.4 Weitere aktive Allradantriebssysteme . . . . .	574
8.2.1.5 Systeme mit Frontantrieb-Querverteiler Überlagerungsdifferenzial . . . . .	574
8.2.1.6 4Motion von VW . . . . .	575
8.2.2 Bremssysteme . . . . .	575
8.2.2.1 Grundlagen des Bremsen-Fahrdynamikreglers . . . . .	575
8.2.2.2 Zusatzfunktionen in aktiven Bremssystemen . . . . .	576
8.3 Mechatronische Vertikaldynamiksysteme . . . . .	577
8.3.1 Anforderungen an die Vertikalsysteme . . . . .	577
8.3.2 Einteilung der Vertikalsysteme . . . . .	577
8.3.3 Dämpfungssysteme . . . . .	578
8.3.3.1 Adaptive Dämpfungssysteme . . . . .	579
8.3.3.2 Semi-aktive Dämpfungssysteme . . . . .	580
8.3.3.3 Regelstrategien für semi-aktive Dämpfer . . . . .	582
8.3.4 Niveauregulierungssysteme . . . . .	583
8.3.5 Adaptive Luftfederungssysteme . . . . .	584
8.3.6 Aktuelle aktive Federungssysteme . . . . .	585
8.3.6.1 Langsam-aktive Fahrwerksysteme . . . . .	586
8.3.6.2 Voll-aktive, integrierte Fahrwerksysteme . . . . .	588
8.3.7 Lagersysteme . . . . .	591
8.4 Mechatronische Querdynamiksysteme . . . . .	592
8.4.1 Vorderradlenkung . . . . .	593

8.4.2 Hinterradlenkung .....	595
8.4.3 Wankstabilisierungssysteme .....	601
8.4.3.1 Passiver Stabilisator .....	602
8.4.3.2 Schaltbare Off-Road-Stabilisatoren .....	602
8.4.3.3 Schaltbare On-Road-Stabilisatoren .....	602
8.4.3.4 Semiaktive Stabilisatoren .....	603
8.4.3.5 Hydraulische aktive Stabilisatoren .....	604
8.4.3.6 Elektrische aktive Stabilisatoren .....	607
8.4.4 Aktive Kinematik .....	609
8.4.5 Gegenüberstellung der Fahrdynamiksysteme .....	612
8.4.6 Vernetzung der Fahrwerksysteme .....	614
8.5 X-by-wire .....	615
8.5.1 Steer-by-wire .....	615
8.5.2 Brake-by-wire .....	616
8.5.2.1 Elektrohydraulische Bremse (EHB) .....	617
8.5.2.2 Elektromechanische Bremse (EMB) .....	617
8.5.2.3 Elektromechanische Bremse von Teves .....	617
8.5.2.4 Elektrohydraulische Combi-Bremse (EHC) .....	618
8.5.2.5 Radialbremse .....	619
8.5.2.6 Keilbremse .....	619
8.5.2.7 Mechatronische Bremse .....	620
8.5.3 Leveling-by-wire .....	621
8.6 Fahrerinformationssysteme .....	621
8.7 Fahrerwarnsysteme .....	622
8.7.1 Fahrerwarnung bei der Längsführung .....	622
8.7.2 Fahrerwarnung bei der Querfahrung .....	623
8.8 Fahrerassistenzsysteme .....	623
8.8.1 Bremsassistenz .....	625
8.8.1.1 Sicherheitsrelevante Bremsassistenz .....	625
8.8.1.2 Komfortorientierte Bremsassistenz .....	626
8.8.1.3 Anforderungen an die Bremsassistenz .....	626
8.8.2 Distanzhalteassistenz .....	626
8.8.3 Lenkassistenz .....	627
8.8.3.1 Lenkassistenz durch Anpassung der Unterstützungskraft .....	628
8.8.3.2 Lenkassistenz durch Überlagerung des Fahrerhandmoments .....	628
8.8.3.3 Lenkassistenz durch Überlagerung des Fahrerlenkwinkels .....	631
8.8.3.4 Lenkassistenz durch kombinierten Eingriff aus Lenkradwinkel und -moment .....	631
8.8.4 Einparkassistenz .....	631
8.8.4.1 Einführung .....	631
8.8.4.2 Parklückenerkennung .....	632
8.8.4.3 Einparkvorgang .....	633
8.8.4.4 Lenkaktuator .....	634
8.8.5 Zusammenfassung .....	634
<b>9 Zukunftsaspekte des Fahrwerks .....</b>	<b>639</b>
9.1 Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert .....	640
9.1.1 Auslegung des Fahrverhaltens .....	640
9.1.2 Diversifizierung und Stabilisierung der Fahrwerkskonzepte .....	641
9.1.2.1 Vorderachsen .....	642
9.1.2.2 Hinterachsen .....	642
9.1.3 Fahrwerkbestandteile der Zukunft .....	642
9.1.3.1 Achsantrieb der Zukunft .....	642
9.1.3.2 Bremse der Zukunft .....	643
9.1.3.3 Lenkung der Zukunft .....	643
9.1.3.4 Federung der Zukunft .....	643
9.1.3.5 Dämpfung der Zukunft .....	643
9.1.3.6 Radführung der Zukunft .....	643
9.1.3.7 Radlager der Zukunft .....	643
9.1.3.8 Reifen und Räder der Zukunft .....	643

9.1.4 Elektronische Fahrwerksysteme der Zukunft .....	643
9.1.4.1 Systemvernetzung .....	644
9.1.4.2 Leistungsfähigkeit .....	644
9.1.4.3 Systemsicherheit .....	645
9.1.4.4 Elektronik Entwicklungsprozess .....	645
9.1.4.5 Anforderungen an die Datenübertragung .....	645
9.2 Umweltschutz und CO <sub>2</sub> .....	646
9.2.1 Bedeutung der CO <sub>2</sub> -Senkung .....	646
9.2.2 Beitrag des Fahrwerks zur CO <sub>2</sub> -Senkung .....	646
9.2.2.1 Reifen und Bremse .....	646
9.2.2.2 Nebenaggregate mit Elektroantrieb .....	647
9.2.2.3 Fahrwerksgewicht .....	647
9.2.2.4 Fahrwiderstand .....	648
9.2.2.5 Energierückgewinnung an Stoßdämpfern .....	648
9.2.2.6 Zusammenfassung .....	648
9.2.3 Beitrag des Hybridantriebs zur CO <sub>2</sub> -Senkung .....	648
9.2.3.1 Mild- und Parallel-Hybridantriebe .....	650
9.2.3.2 Seriell-Hybridantriebe .....	650
9.2.4 Bremsblending für Rekuperation .....	651
9.3 Elektrofahrzeuge .....	653
9.3.1 Antriebskonzepte für das Elektrofahrzeug .....	653
9.3.2 Fahrwerkskonzepte für Elektro-Autos .....	655
9.3.2.1 Fahrwerkskonzepte mit zentralem Elektromotor .....	655
9.3.2.2 Fahrwerkskonzepte für zwei Elektromotoren .....	655
9.3.2.3 Fahrwerkskonzepte für radnahe Antrieb .....	656
9.3.2.4 Fahrwerkskonzepte für Radnaben-Antriebe .....	657
9.3.2.5 Gegenüberstellung radnahe Antriebe und Radnaben-Antriebe .....	659
9.3.3 Elektro-Radnabenfahrwerk „eCorner“ .....	659
9.4 X-by-wire-Systeme der Zukunft .....	660
9.5 Fahrerassistenz-Systeme der Zukunft .....	661
9.6 Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft .....	662
9.6.1 Fahrzeugsensorik .....	662
9.6.2 Aktuatorik .....	663
9.6.3 Vorausschauendes Fahren .....	663
9.7 Autonomes Fahren in der Zukunft? .....	666
9.7.1 Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis .....	666
9.7.2 Urban Challenge 2007: Die ersten Schritte zum autonomen Fahren .....	667
9.7.3 Autofahren ohne Fahrer .....	669
9.8 Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk .....	670
9.8.1 Trends aus der Vergangenheit .....	671
9.8.2 Trends aus der Gegenwart .....	671
9.8.3 Trends der Zukunft .....	671
9.8.4 Szenarioanalyse .....	671
9.8.5 Mögliche Zukunftsvisionen .....	672
9.9 Ausblick .....	673
<b>Glossar .....</b>	677
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	700