

# 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 .....	7
1.1.3 Aufgabe und Bedeutung .....	8
1.2 Fahrwerkaufbau .....	9
1.2.1 Fahrzeugklassen .....	9
1.2.2 Antriebskonzepte .....	10
1.2.3 Fahrwerkkonzeption .....	13
1.2.4 Trends in der Fahrwerkkonzeption .....	13
1.3 Fahrwerkauslegung .....	15
1.3.1 Anforderungen an das Fahrwerk .....	16
1.3.2 Fahrwerk-Kinematikauslegung .....	18
1.3.3 Kinematik der Radaufhängung .....	18
1.3.3.1 Kenngrößen des Fahrwerks am Fahrzeug .....	18
1.3.3.2 Momentanpole der Radaufhängung .....	20
1.3.3.3 Radhubkinematik .....	20
1.3.3.4 Kenngrößen der Radhubkinematik .....	21
1.3.3.5 Kenngrößen der Lenkkinematik .....	24
1.3.3.6 Kinematische Kenngrößen aktueller Fahrzeugmodelle .....	28
1.3.3.7 Raderhebungskurven .....	28
1.3.3.8 Software zur Radkinematikberechnung .....	31
1.3.4 Elastokinematik und Bauteilelastizitäten der Radaufhängung .....	31
1.3.5 Zielwerte für die Kenngrößen .....	32
1.3.6 Synthese der Radaufhängungen .....	33
<b>2 Fahrdynamik</b> .....	35
2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf .....	35
2.1.1 Fahrwiderstände .....	35
2.1.1.1 Radwiderstände .....	35
2.1.1.2 Anteil der Fahrbahn $F_{R,Tr}$ .....	40
2.1.1.3 Luftwiderstand .....	43
2.1.1.4 Steigungswiderstand .....	44
2.1.1.5 Beschleunigungswiderstand .....	45
2.1.1.6 Gesamtfahrwiderstand .....	46
2.1.2 Seitenwindkräfte .....	46
2.1.3 Leistungs- und Energiebedarf .....	49
2.1.4 Kraftstoffverbrauch .....	50
2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn .....	52
2.2.1 Physik der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn .....	54
2.2.1.1 Bremsen und Antreiben .....	57
2.2.1.2 Kurvenfahrt .....	59
2.2.2 Reifenkräfte im Detail .....	63
2.3 Längsdynamik .....	65
2.3.1 Anfahren und Bremsen .....	65
2.3.1.1 Bremsnickausgleich .....	65
2.3.1.2 Anfahrnickausgleich .....	66
2.3.1.3 Lastwechsel bei Geradeausfahrt .....	67
2.4 Vertikaldynamik .....	67
2.4.1 Aufbaufedern .....	67
2.4.1.1 Federübersetzung .....	68
2.4.1.2 Eigenfrequenzen .....	68
2.4.2 Schwingungsdämpfer .....	69

2.4.3	Fahrbahn als Anregung .....	70
2.4.3.1	Harmonische Anregungen .....	70
2.4.3.2	Periodische Unebenheiten .....	71
2.4.3.3	Stochastische Unebenheiten .....	71
2.4.3.4	Spektrale Dichte der Fahrbahnebenheiten .....	72
2.4.3.5	Gemessene, reale Fahrbahnebenheiten .....	72
2.4.4	Reifen als Feder- und Dämpferelement .....	73
2.4.5	Federungsmodelle .....	73
2.4.5.1	Einmassen-Ersatzsystem .....	74
2.4.5.2	Zweimassen-Ersatzsystem .....	75
2.4.5.3	Erweiterung um Sitzfederung .....	75
2.4.5.4	Einspur-Federungsmodell .....	76
2.4.5.5	Zweispur-Federungsmodell .....	77
2.4.6	Parametervariation .....	79
2.4.7	Verknüpfung Fahrbahn–Fahrzeug .....	81
2.4.7.1	Spektrale Dichte der Aufbaubeschleunigung .....	82
2.4.7.2	Spektrale Dichte der Radlastschwankungen .....	84
2.4.8	Menschliche Schwingungsbewertung .....	84
2.4.9	Erkenntnisse aus den vertikaldynamischen Grundlagen .....	86
2.5	Querdynamik .....	86
2.5.1	Anforderungen an das Fahrverhalten .....	86
2.5.2	Lenkkinematik .....	87
2.5.2.1	Statische Lenkungsauslegung .....	87
2.5.2.2	Dynamische Lenkungsauslegung .....	88
2.5.3	Fahrzeugmodellierung .....	89
2.5.3.1	Einfaches Einspurmodell .....	89
2.5.3.2	Einfache Betrachtungen der Fahrdynamik .....	91
2.5.3.3	Bewegungsvorgänge beim Über- und Untersteuern .....	93
2.5.3.4	Erweitertes Einspurmodell mit Hinterradlenkung .....	94
2.5.3.5	Nichtlineares Einspurmodell .....	96
2.5.3.6	Instationäre Betrachtungen des einfachen Einspurmodells .....	97
2.5.3.7	Die Regelstrecke „Fahrzeug“ im Regelkreis .....	100
2.5.3.8	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke Fahrzeug .....	101
2.5.3.9	Schwimmwinkelkompensation mittels Hinterradlenkung .....	103
2.5.3.10	Frequenzgangbetrachtung bei variierten Fahrzeugkonfigurationen .....	105
2.5.3.11	Zweispurmodell .....	106
2.5.3.12	Parametervariation .....	109
2.6	Allgemeine Fahrdynamik .....	114
2.6.1	Wechselwirkungen zwischen Vertikal-, Längs- und Querdynamik .....	114
2.7	Fahrwerkregelsysteme .....	118
2.7.1	Begriffsbestimmungen .....	118
2.7.2	Grenzen des passiven Fahrzeugs – Basis-Zielkonflikte .....	119
2.7.3	Regelkreis Fahrer–Fahrzeug .....	120
2.7.4	Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme in Domänen .....	121
2.7.4.1	Längsdynamik .....	121
2.7.4.2	Querdynamik .....	122
2.7.4.3	Vertikaldynamik .....	122
2.7.5	Forderungen an Fahrwerkregelsysteme .....	122
2.8	Fahrverhalten .....	122
2.8.1	Beurteilung des Fahrverhaltens .....	123
2.8.2	Fahrmanöver .....	124
2.8.3	Fahrmanöver Parameterraum .....	125
2.8.4	Abstimmungsmaßnahmen .....	128
2.8.4.1	Abstimmungsmaßnahmen zum stationären Lenkverhalten .....	128
2.8.5	Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung .....	128
2.8.5.1	Bewertungsmethoden und Darstellung .....	128
2.8.5.2	Anfahrverhalten .....	128

2.8.5.3	Bremsverhalten .....	128
2.8.5.4	Lenkverhalten .....	134
2.8.5.5	Kurvenverhalten .....	134
2.8.5.6	Geradeausfahrt .....	137
2.8.5.7	Fahrkomfort .....	137
2.8.6	Objektive Fahrverhaltensbeurteilung .....	137
2.8.6.1	Messgrößen .....	138
2.8.6.2	Anfahrverhalten .....	138
2.8.6.3	Bremsverhalten .....	138
2.8.6.4	Lenkverhalten .....	140
2.8.6.5	Kurvenverhalten .....	142
2.8.6.6	Geradeausfahrt .....	144
2.8.6.7	Fahrkomfort .....	146
2.9	Aktive und passive Sicherheit .....	146
<b>3</b>	<b>Bestandteile des Fahrwerks .....</b>	<b>149</b>
3.1	Struktur des Fahrwerks .....	149
3.1.1	Funktionelle Struktur des Fahrwerks .....	149
3.1.2	Modulare Struktur des Fahrwerks .....	150
3.1.3	Bestandteile des Fahrwerks .....	150
3.2	Antriebsstrang .....	151
3.2.1	Anordnungen .....	151
3.2.2	Achsgetriebe .....	151
3.2.2.1	Differenziale .....	151
3.2.2.2	Sperrdifferenziale .....	151
3.2.2.3	Aktive Sperrdifferenziale .....	153
3.2.2.4	Torque Vectoring .....	153
3.2.3	Allradantrieb .....	154
3.2.4	Betriebsstrategien .....	155
3.2.5	Seitenwellen .....	156
3.3	Radbremsen und Bremssysteme .....	157
3.3.1	Aufgaben und Grundlagen .....	157
3.3.2	Arten von Bremsanlagen .....	158
3.3.2.1	Allgemeine Anforderungen .....	159
3.3.3	Gesetzliche Vorschriften .....	160
3.3.4	Auslegung der Bremsanlage .....	160
3.3.4.1	Bremskraftverteilung .....	160
3.3.4.2	Dimensionierung .....	162
3.3.5	Bremsmomente und Dynamik .....	162
3.3.5.1	Bremsmomente .....	162
3.3.5.2	Bremsdynamik .....	163
3.3.6	Komponenten des Bremssystems .....	164
3.3.6.1	Bremssattel .....	164
3.3.6.2	Bremsscheiben .....	168
3.3.6.3	Bremsbeläge .....	169
3.3.6.4	Trommelbremsen .....	169
3.3.6.5	Bremsflüssigkeit .....	172
3.3.6.6	Bremskraftverstärker .....	172
3.3.6.7	Tandem-Hauptzylinder .....	173
3.3.6.8	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) .....	174
3.3.7	Elektronische Bremsregelsysteme .....	178
3.3.7.1	Bremsassistent (MBA, EBA, HBA) .....	178
3.3.7.2	Raddrehzahlsensor .....	180
3.3.7.3	Funktionen des elektronischen Bremssystems .....	182
3.3.7.4	Elektrohydraulische Bremse (EHB) .....	187
3.3.7.5	Elektromechanische Bremse (EMB) .....	189
3.3.7.6	Vernetztes Chassis .....	190

3.4	Lenksysteme .....	192
3.4.1	Anforderungen und Bauformen .....	192
3.4.2	Hydraulische Zahnstangenlenkung .....	194
3.4.2.1	Technik und Funktion .....	194
3.4.2.2	Aufbau und Bauteile .....	197
3.4.3	Spurstangen .....	201
3.4.4	Lenkstrang und Lenksäule .....	203
3.4.4.1	Komponenten und Funktionseinheiten .....	203
3.4.4.2	Auslegung und Erprobung .....	206
3.4.4.3	Crashanforderungen und Energieverzehrmechanismen .....	206
3.4.4.4	Ausblick und Modularisierung .....	209
3.4.5	Elektromechanische Lenkung .....	209
3.4.5.1	Bauformen .....	210
3.4.5.2	Aufbau und Vorteile .....	212
3.4.6	Aktivlenkung und Überlagerungslenkung .....	215
3.4.6.1	Wirkprinzip und Aufbau .....	215
3.4.6.2	Funktionen – heute und morgen .....	217
3.4.7	Zahnstangenservolenkung mit Momenten- und Winkelsteller .....	219
3.4.8	Hinterachs- und Allradlenkung .....	220
3.4.9	Steer-by-wire-Lenksystem und Einzelradlenkung .....	222
3.4.9.1	Systemkonzept und Bauteile .....	224
3.4.9.2	Technik, Vorteile und Chancen .....	225
3.5	Federn und Stabilisatoren .....	226
3.5.1	Aufgabe der Federung .....	226
3.5.2	Konstruktion und Berechnung von Stahlfedern .....	226
3.5.2.1	Blattfedern .....	227
3.5.2.2	Drehstabfedern .....	229
3.5.2.3	Stabilisatoren .....	231
3.5.2.4	Schraubenfedern .....	239
3.5.3	Werkstoffe für Stahlfedern .....	247
3.5.4	Herstellung von Stahlfedern .....	249
3.5.4.1	Warmumformung .....	249
3.5.4.2	Vergütung warmgeformter Federn .....	251
3.5.4.3	Kaltumformung .....	251
3.5.4.4	Kugelstrahlen .....	252
3.5.4.5	Plastifizieren .....	253
3.5.4.6	Korrosionsschutz .....	253
3.5.4.7	Endkontrolle und Markierung .....	254
3.5.5	Stabilisatoren zur Wankregulierung .....	254
3.5.5.1	Passiver Stabilisator .....	255
3.5.5.2	Schaltbarer Off-Road-Stabilisator .....	255
3.5.5.3	Schaltbarer On-Road-Stabilisator .....	255
3.5.5.4	Semiaktiver Stabilisator .....	256
3.5.5.5	Aktiver Stabilisator .....	257
3.5.6	Federung für Niveauregelung .....	257
3.5.6.1	Aufgaben und Bauarten .....	257
3.5.6.2	Niveauänderung mit Gasfeder .....	258
3.5.7	Hydropneumatische Federung .....	261
3.5.7.1	Selbstpumpendes, hydropneumatisches Feder- und Dämpferelement .....	261
3.5.8	Luftfederung .....	264
3.6	Dämpfung .....	266
3.6.1	Aufgabe der Dämpfung .....	266
3.6.2	Teleskopdämpfer-Bauarten .....	270
3.6.2.1	Zweirohrdämpfer .....	270
3.6.2.2	Einrohrdämpfer .....	271
3.6.2.3	Vergleich der beiden Dämpferarten .....	272
3.6.2.4	Sonderbauarten .....	272

3.6.3	Federträger und Federbein .....	272
3.6.4	Stoßdämpfereberechnung .....	274
3.6.5	Zusatzfunktionen im Dämpfer .....	275
3.6.5.1	Zug- und Druckanschläge .....	275
3.6.5.2	Hubabhängige Dämpfung .....	278
3.6.5.3	Amplitudenselektive Dämpfung .....	279
3.6.6	Dämpferlager .....	280
3.6.7	Semiaktive Dämpfung und Federung .....	281
3.6.8	Alternative Dämpfungsprinzipien .....	285
3.6.8.1	Dämpfer mit magnetoreologischen Flüssigkeiten (MRF) .....	286
3.6.8.2	Verbunddämpfung .....	286
3.6.8.3	Lastabhängige Dämpfung (PDC) .....	286
3.7	Radführung .....	287
3.7.1	Aufgaben, Struktur und Systematik .....	287
3.7.2	Lenker Aufgaben, Struktur und Systematik .....	288
3.7.2.1	Führungslenker .....	290
3.7.2.2	Traglenker .....	290
3.7.2.3	Hilfslenker .....	290
3.7.2.4	Anforderungen an Fahrwerkslenker .....	291
3.7.2.5	Werkstoffe für Fahrwerkslenker .....	291
3.7.2.6	Herstellverfahren für Fahrwerklenker .....	292
3.7.2.7	Herstellverfahren für Aluminiumlenker .....	298
3.7.2.8	Auslegung und Optimierung der Lenker .....	300
3.7.2.9	Integration der Gelenke an den Lenker .....	300
3.7.3	Kugelgelenk .....	301
3.7.3.1	Aufgabe und Anforderungen .....	301
3.7.3.2	Systematik für Kugelgelenke .....	302
3.7.3.3	Aufbau der Kugelgelenke .....	303
3.7.3.4	Lagersystem (Schale, Fett) .....	305
3.7.3.5	Dichtsystem (Balg, Spannring) .....	308
3.7.3.6	Führungsgelenke .....	311
3.7.3.7	Traggelenke .....	313
3.7.3.8	Hülsengelenke .....	314
3.7.4	Gummilager .....	315
3.7.4.1	Aufgabe, Anforderungen, Funktion .....	315
3.7.4.2	Ausführungen .....	318
3.7.5	Drehgelenk .....	319
3.7.6	Drehschubgelenk .....	320
3.7.7	Achsträger .....	321
3.7.7.1	Aufgabe und Anforderungen .....	321
3.7.7.2	Systematik und Bauarten .....	322
3.8	Radträger und Radlager .....	324
3.8.1	Bauarten für Radträger .....	325
3.8.2	Werkstoffe und Herstellverfahren für Radträger .....	327
3.8.3	Bauarten für Radlager .....	327
3.8.3.1	Dichtung .....	330
3.8.3.2	Schmierung .....	331
3.8.3.3	ABS-Sensoren .....	331
3.8.4	Herstellung von Radlagern .....	333
3.8.4.1	Ringe und Flansche .....	333
3.8.4.2	Käfige und Wälzkörper .....	334
3.8.4.3	Montage .....	334
3.8.5	Anforderung, Auslegung und Erprobung .....	334
3.8.5.1	Ermüdungslebensdauer (Überrollfestigkeit) des Radlagers .....	336
3.8.5.2	Bauteilfestigkeit und Kippsteifigkeit .....	338
3.8.5.3	Verifizierung durch Prüfmethode .....	340
3.8.6	Ausblick .....	341

3.9	Reifen und Räder .....	345
3.9.1	Anforderungen an den Reifen .....	345
3.9.1.1	Gebrauchseigenschaften .....	346
3.9.1.2	Gesetzliche Anforderungen .....	348
3.9.2	Bauarten, Aufbau und Material .....	349
3.9.2.1	Reifenbauarten .....	349
3.9.2.2	Reifenaufbau .....	350
3.9.2.3	Reifenmaterialien .....	350
3.9.2.4	Viskoelastische Eigenschaften von Gummi .....	351
3.9.3	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn .....	352
3.9.3.1	Tragverhalten .....	352
3.9.3.2	Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften .....	353
3.9.3.3	Antreiben und Bremsen, Umfangskräfte .....	354
3.9.3.4	Schräglauf, Seitenkräfte und Rückstellmomente .....	355
3.9.3.5	Schräglaufsteifigkeit .....	356
3.9.3.6	Reifen unter Quer- und Längsschlupf .....	357
3.9.3.7	Reifengleichförmigkeit .....	358
3.9.4	Reifenmodelle für die Simulation .....	358
3.9.4.1	Reifenmodelle für die Horizontaldynamik .....	358
3.9.4.2	Reifenmodelle mit Finiten Elementen (FEM-Modelle) .....	360
3.9.4.3	Reifenmodelle für die Vertikaldynamik .....	361
3.9.4.4	Reifenmoden .....	361
3.9.4.5	Eigenschwingung der Kavität .....	362
3.9.4.6	Gesamtmodelle .....	362
3.9.5	Moderne Reifentechnologien .....	365
3.9.5.1	Reifensensorik .....	365
3.9.5.2	Reifennotlaufsysteme .....	367
3.9.5.3	Reifen und Regelsysteme .....	367
3.9.5.4	High Performance (HP) und Ultra High Performance (UHP) Reifen .....	368
3.9.6	Test und Messmethoden im Fahrversuch .....	369
3.9.6.1	Subjektive Testverfahren .....	370
3.9.6.2	Objektive Testverfahren für die Längshaftung .....	371
3.9.6.3	Objektive Testverfahren für die Seitenhaftung .....	372
3.9.6.4	Akustik .....	372
3.9.7	Test und Messmethoden im Labor .....	373
3.9.7.1	Grundkonzepte für Reifenprüfstände .....	373
3.9.7.2	Festigkeitsprüfung .....	373
3.9.7.3	Charakteristikmessungen am Prüfstand .....	374
3.9.7.4	Charakteristikmessungen mit dem Laborfahrzeug .....	374
3.9.7.5	Rollwiderstandsmessung .....	374
3.9.7.6	Uniformity- und Geometrie-Messung .....	376
3.9.7.7	Streckenmessung und Modellierung .....	376
3.9.7.8	Verlustleistungsanalyse .....	377
3.9.7.9	Reifentemperaturverfahren .....	378
3.9.8	Zukünftige Reifentechnologien .....	379
3.9.8.1	Materialentwicklung .....	379
<b>4</b>	<b>Achsen im Fahrwerk .....</b>	<b>383</b>
4.1	Starrachsen .....	385
4.1.1	De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse .....	387
4.1.2	Starrachsen mit Längsblattfederführung .....	387
4.1.3	Starrachsen mit Längs- und Querlenker .....	388
4.1.4	Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse) .....	389

4.2	Halbstarrachsen .....	390
4.2.1	Verbundlenkerachsen .....	390
4.2.1.1	Torsionskurbelachse .....	391
4.2.1.2	Verbundlenkerachse .....	392
4.2.1.3	Koppellenkerachse .....	392
4.2.2	Dynamische Verbundachse .....	392
4.3	Einzelradaufhängung .....	393
4.3.1	Kinematik der Einzelradaufhängung .....	393
4.3.2	Vorteile der Einzelradaufhängungen .....	395
4.3.3	Einzelradaufhängungen mit einem Lenker .....	395
4.3.3.1	Längslenker-Einzelradaufhängungen .....	396
4.3.3.2	Schräglenker-Einzelradaufhängungen .....	397
4.3.3.3	Schraublenker-Einzelradaufhängungen .....	398
4.3.4	Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern .....	398
4.3.4.1	Quer-Längs-Pendelachsen .....	398
4.3.4.2	Trapezlenker mit einem Querlenker (Audi 100 Quattro) .....	399
4.3.4.3	Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse) .....	399
4.3.5	Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern .....	399
4.3.5.1	Zentrallenker-Einzelradaufhängung .....	399
4.3.5.2	Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen .....	400
4.3.6	Einzelradaufhängungen mit vier Lenkern .....	402
4.3.6.1	Mehrtenker-Einzelradaufhängungen an Hinterachsen .....	402
4.3.6.2	Mehrtenkerachsen durch Auflösung der unteren 3-Punkt-Lenker der DQL-Achse .....	403
4.3.6.3	Trapezlenkeraufhängung (Integrallenker) .....	403
4.3.6.4	Zwei Längs- und zwei Querlenker .....	404
4.3.6.5	Ein Längs- und drei Querlenker .....	404
4.3.6.6	Ein Schräg- und drei Querlenker .....	405
4.3.7	Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern .....	405
4.3.7.1	Fünftenker-Vorderachsaufhängung (mit zwei aufgelösten 3-Punkt-Lenkern der DQL) .....	405
4.3.7.2	Fünftenker-Hinterachsaufhängung (Raumenker) .....	406
4.3.8	Federbein-Einzelradaufhängungen .....	407
4.4	Einzelradaufhängungen der Vorderachse .....	410
4.4.1	Forderungen an die Vorderachsaufhängungen .....	410
4.4.2	Komponenten der Vorderachse .....	411
4.4.3	Bauarten der Vorderachse .....	411
4.4.3.1	McPherson-Achse mit Verbindungstraverse .....	411
4.4.3.2	McPherson-Aufhängung mit optimiertem unteren Lenker .....	412
4.4.3.3	McPherson-Aufhängung mit aufgelöstem unteren Lenker .....	412
4.4.3.4	McPherson mit doppeltem Radträger .....	412
4.4.3.5	Doppelquerlenker mit aufgelösten Lenker .....	413
4.5	Einzelradaufhängungen der Hinterachse .....	413
4.5.1	Forderungen an die Hinterachse .....	413
4.5.2	Komponenten der Hinterachse .....	413
4.5.3	Bauarten der Hinterachse .....	413
4.5.3.1	Nicht angetriebene Hinterachse .....	413
4.5.3.2	Angetriebene Hinterachse .....	414
4.5.4	ULSAS-Benchmark für Hinterachsen .....	414
4.6	Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen .....	415
4.7	Gesamtfahrwerk .....	415
4.7.1	Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse .....	415
4.8	Radaufhängungen der Zukunft .....	417
4.8.1	Achstypen der letzten 20 Jahren .....	417
4.8.2	Häufigkeit der aktuellen Achstypen .....	417
4.8.3	Die zukünftigen Achstypen (Tendenzen) .....	417

<b>5 Fahrkomfort</b> .....	421
5.1 Grundlagen, Mensch und NVH .....	421
5.1.1 Begriffe und Definitionen .....	421
5.1.2 Schwingungs- und Geräuschquellen .....	422
5.1.3 Wahrnehmungsgrenzen des Menschen .....	423
5.1.4 Das Wohlbefinden des Menschen .....	424
5.1.5 Maßnahmen gegen Schwingungen und Geräusche .....	425
5.2 Gummiverbundteile .....	426
5.2.1 Funktion der Gummiverbundteile .....	426
5.2.1.1 Kräfte übertragen .....	426
5.2.1.2 Definierte Bewegungen ermöglichen .....	426
5.2.1.3 Geräusche isolieren .....	427
5.2.1.4 Schwingungen dämpfen .....	427
5.2.2 Elastomer spezifische Definitionen .....	428
5.2.2.1 Kennlinien .....	428
5.2.2.2 Dämpfung .....	428
5.2.2.3 Setzung .....	429
5.3 Aggregatelager .....	430
5.4 Hülsenlager (Gummilager) .....	434
5.5 Gleitlager .....	435
5.6 Hydraulisch dämpfende Buchsen .....	436
5.7 Achsträgerlager (Hilfsrahmenlager) .....	439
5.8 Federbeinstützlager, Dämpferlager .....	441
5.9 Verbundenkerlager .....	442
5.10 Zukünftige Bauteilausführungen .....	443
5.10.1 Sensorik .....	444
5.10.2 Schaltbare Fahrwerkklager .....	444
5.11 Berechnungsmethoden .....	445
5.12 Akustische Bewertung von Gummiverbundteilen .....	446
<b>6 Fahrwerkentwicklung</b> .....	449
6.1 Entwicklungsprozess .....	449
6.2 Projektmanagement (PM) .....	455
6.3 Planungs- oder Definitionsphase .....	455
6.3.1 Zielwertkaskadierung .....	456
6.4 Konzeptphase .....	457
6.5 Virtuelle Simulation .....	457
6.5.1 Software für die Mehrkörpersimulation (MKS) .....	458
6.5.1.1 Aufbau von MKS-Fahrwerksmodellen mit ADAMS/Car .....	458
6.5.1.2 CAD-Fahrwerkmodell und Mehrkörpersystem .....	458
6.5.1.3 Mehrkörpersimulation mit starren und flexiblen MKS .....	459
6.5.1.4 Mehrkörpersimulation mit Gesamtfahrzeug-, Fahrwerk- und Achsmodellen .....	460
6.5.1.5 Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die kinematischen Kennwerte .....	461
6.5.2 Software für Finite Elemente Methode (FEM) .....	462
6.5.2.1 Klassifizierung der Analysen .....	462
6.5.2.2 Festigkeitsanalysen .....	463
6.5.2.3 Steifigkeitsanalysen .....	463
6.5.2.4 Eigenfrequenzanalysen .....	464
6.5.2.5 Lebensdauer-Betriebsfestigkeit .....	464
6.5.2.6 Crash-Simulationen .....	464
6.5.2.7 Topologie- und Formoptimierung .....	465
6.5.2.8 Simulation der Fertigungsverfahren .....	465
6.5.3 Vollfahrzeugsimulation .....	466
6.5.3.1 Fahrdynamiksimulation .....	466
6.5.3.2 Kinematik/Elastokinematik .....	466
6.5.3.3 Standard-Lastfälle .....	468
6.5.3.4 MKS-Modellverifikation .....	468



6.5.3.5	NVH .....	469
6.5.3.6	Loadmanagement (Lastenkaskadierung vom System zur Komponente) .....	470
6.5.3.7	Vollfahrzeug Betriebsfestigkeitssimulation .....	474
6.5.3.8	Fahrdynamischer Fingerprint .....	474
6.5.3.9	Auslegung der Elastokinematik nach der regelungstechnischen Methode .....	475
6.5.4	Software zur 3D-Modellierung CAD .....	476
6.5.5	Integrierte Simulationsumgebung .....	477
6.5.5.1	Kinematische Analyse: Basistool ABE .....	477
6.5.5.2	Virtuelle Produktentwicklungsumgebung .....	481
6.6	Serienentwicklung und Absicherung .....	482
6.6.1	Konstruktion .....	482
6.6.1.1	Bauteilkonstruktion .....	483
6.6.1.2	Bauraum „Package“ .....	484
6.6.1.3	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse .....	485
6.6.1.4	Toleranzuntersuchungen .....	485
6.6.2	Validierung .....	485
6.6.2.1	Prototypen .....	485
6.6.2.2	Validierung am Prüfstand .....	486
6.6.2.3	Straßen-Simulationsprüfstand (SSP) .....	488
6.6.3	Validierung am Gesamtfahrzeug .....	489
6.6.4	Optimierung und Abstimmung .....	490
6.7	Entwicklungsaktivitäten während der Serienproduktion .....	490
6.8	Ausblick und Zusammenfassung .....	491
<b>7</b>	<b>Systeme im Fahrwerk .....</b>	<b>493</b>
7.1	Elektronik im Fahrwerk .....	493
7.2	Elektronische Fahrwerkregelsysteme .....	493
7.2.1	Domänenaufteilung .....	493
7.2.2	Längsdynamik – Schlupfregelung .....	494
7.2.2.1	Bremse .....	494
7.2.2.2	Elektronisch geregeltes Längsdifferenzial .....	494
7.2.2.3	Torque-on-Demand-Verteilergetriebe .....	494
7.2.2.4	Elektronisch geregeltes Achsdifferenzial .....	495
7.2.2.5	Achsgtriebe zur Quermomentverteilung .....	496
7.2.3	Querdynamikregelsysteme .....	497
7.2.3.1	Elektrolenkung .....	497
7.2.3.2	Überlagerungslenkung .....	498
7.2.3.3	Aktive Hinterachslenkung .....	498
7.2.3.4	Aktive Hinterachskinematik .....	498
7.2.4	Vertikaldynamikregelsysteme .....	499
7.2.4.1	Variable Dämpfer .....	499
7.2.4.2	Aktiver Stabilisator .....	500
7.2.4.3	Niveauregulierung .....	501
7.2.5	Sicherheitsanforderungen .....	502
7.2.6	Bussysteme .....	503
7.2.6.1	CAN-Bus .....	503
7.2.6.2	FlexRay .....	503
7.3	Systemvernetzung .....	503
7.3.1	Fahrdynamikregelung .....	503
7.3.2	Torque Vectoring .....	505
7.3.3	Vertikaldynamikmanagement .....	506
7.4	Funktionsintegration .....	506
7.4.1	Architektur .....	506
7.4.2	Standardschnittstellen .....	507
7.4.3	Intelligente Steller .....	508

7.5	Simulation Fahrwerkregelsysteme .....	508
7.5.1	Simulationsmodelle .....	508
7.5.2	Hardware-in-the-loop-Simulation .....	510
7.6	Mechatronische Fahrwerksysteme .....	511
7.6.1	Längsdynamiksysteme .....	511
7.6.1.1	Antriebssysteme .....	511
7.6.1.2	Bremssysteme .....	514
7.6.2	Querdynamiksysteme .....	516
7.6.2.1	Vorderradlenkung .....	516
7.6.2.2	Hinterradlenkung .....	517
7.6.2.3	Wankstabilisierungssysteme .....	521
7.6.2.4	Aktive Kinematik .....	524
7.6.3	Vertikaldynamiksysteme .....	526
7.6.3.1	Anforderungen an die Vertikalsysteme .....	526
7.6.3.2	Einteilung der Vertikalsysteme .....	526
7.6.3.3	Dämpfungssysteme .....	528
7.6.3.4	Niveauregulierungssysteme .....	531
7.6.3.5	Aktuelle aktive Federungssysteme .....	532
7.6.3.6	Voll-aktive, integrierte Fahrwerksysteme .....	535
7.6.3.7	Lagersysteme .....	537
7.7	X-by-wire .....	539
7.7.1	Steer-by-wire .....	539
7.7.2	Brake-by-wire .....	540
7.7.2.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB) .....	540
7.7.2.2	Elektromechanische Bremse (EMB) .....	541
7.7.2.3	Elektromechanische Bremse von Teves .....	541
7.7.2.4	Radialbremse .....	542
7.7.2.5	Keilbremse .....	543
7.7.3	Leveling-by-wire .....	544
7.8	Fahrerassistenzsysteme .....	545
7.8.1	Bremsassistentz .....	546
7.8.1.1	Sicherheitsrelevante Bremsassistentz .....	546
7.8.1.2	Komfortorientierter Bremsassistentz .....	547
7.8.1.3	Anforderungen der Bremsassistentz .....	547
7.8.2	Distanzassistentz .....	547
7.8.3	Lenkassistentz .....	548
7.8.3.1	Lenkassistentz durch Anpassung der Unterstützungskraft .....	549
7.8.3.2	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerhandmoments .....	549
7.8.3.3	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerlenkwinkels .....	550
7.8.3.4	Zusammenfassung .....	551
7.8.4	Einparkassistentz .....	551
7.8.4.1	Einführung .....	551
7.8.4.2	Parklückenerkennung .....	551
7.8.4.3	Einparkvorgang .....	552
7.8.4.4	Lenkaktuator .....	553
<b>8</b>	<b>Zukunftsaspekte des Fahrwerks .....</b>	<b>557</b>
8.1	Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert .....	557
8.1.1	Auslegung des Fahrverhaltens .....	557
8.1.2	Diversifizierung der Fahrzeugkonzepte – Stabilisierung der Fahrwerkskonzepte .....	559
8.1.2.1	Vorderachsen, Stand 2004 .....	559
8.1.2.2	Hinterachsen, Stand 2004 .....	560
8.1.3	Fahrwerkbestandteile der Zukunft .....	560
8.1.3.1	Achsantrieb der Zukunft .....	560
8.1.3.2	Bremse der Zukunft .....	561
8.1.3.3	Lenkung der Zukunft .....	561
8.1.3.4	Federung der Zukunft .....	561

8.1.3.5	Dämpfung der Zukunft .....	561
8.1.3.6	Radführung der Zukunft .....	561
8.1.3.7	Radlager der Zukunft .....	561
8.1.3.8	Reifen und Räder der Zukunft .....	561
8.2	Elektronische Fahrwerksysteme .....	561
8.2.1	Elektronische Hilfssysteme und Vernetzung .....	561
8.2.2	Vernetzung von Fahrwerksregelungssystemen .....	562
8.2.2.1	Friedliche Koexistenz .....	562
8.2.2.2	Integrale Regelung .....	563
8.2.2.3	Vernetzte Regelung .....	563
8.2.2.4	Leistungsfähigkeit .....	563
8.2.2.5	Systemsicherheit .....	564
8.2.2.6	Entwicklungsprozess .....	564
8.2.2.7	Anforderungen an die Datenübertragung .....	565
8.2.2.8	Zusammenfassung .....	565
8.3	X-by-wire-Systeme der Zukunft .....	565
8.4	Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft .....	566
8.4.1	Fahrzeugsensorik .....	566
8.4.2	Aktuatorik .....	567
8.4.3	Vorausschauendes Fahren .....	568
8.5	Hybridfahrzeuge .....	570
8.6	Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis .....	571
8.7	Autonomes Fahren in der Zukunft? .....	572
8.8	Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk .....	573
8.9	Ausblick .....	576
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>		<b>579</b>