

# 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	10
1.2 Fahrwerk Aufbau	11
1.2.1 Fahrzeugklassen	11
1.2.2 Antriebskonzepte	12
1.2.3 Fahrwerk Konzeption	14
1.2.4 Trends in der Fahrwerk Konzeption	16
1.3 Fahrwerksauslegung	18
1.3.1 Anforderungen an das Fahrwerk	19
1.3.2 Fahrwerk-Kinematikauslegung	20
1.3.3 Kinematik der Radaufhängung	20
1.3.3.1 Kenngrößen des Fahrwerks am Fahrzeug	21
1.3.3.2 Momentanpole der Radaufhängung	23
1.3.3.3 Radhubkinematik	23
1.3.3.4 Kenngrößen der Radhubkinematik	24
1.3.3.5 Kenngrößen der Lenkkinematik	27
1.3.3.6 Kinematische Kennwerte aktueller Fahrzeugmodelle	31
1.3.3.7 Raderhebungskurven	31
1.3.3.8 Software zur Radkinematikberechnung	34
1.3.4 Elastokinematik und Bauteilelastizitäten der Radaufhängung	34
1.3.5 Zielwerte für die Kenngrößen	35
1.3.6 Synthese der Radaufhängungen	36
<b>2 Fahrdynamik</b>	38
2.1 Fahrwiderstände und Energiebedarf	39
2.1.1 Fahrwiderstände	39
2.1.1.1 Radwiderstände	39
2.1.1.2 Anteil der Fahrbahn $F_{R,Tr}$	43
2.1.1.3 Luftwiderstand	47
2.1.1.4 Steigungswiderstand	47
2.1.1.5 Beschleunigungswiderstand	49
2.1.1.6 Gesamtfahrwiderstand	50
2.1.2 Seitenwindkräfte	50
2.1.3 Leistungs- und Energiebedarf	53
2.1.4 Kraftstoffverbrauch	54
2.2 Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	56
2.2.1 Physik der Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn	58
2.2.1.1 Bremsen und Antreiben	61
2.2.1.2 Kurvenfahrt	63
2.2.2 Reifenkräfte im Detail	67
2.2.3 Wirkung der Reifenkräfte auf die Fahrstabilität	69
2.3 Längsdynamik	70
2.3.1 Anfahren und Bremsen	71
2.3.1.1 Bremsnickausgleich	71
2.3.1.2 Anfahrnickausgleich	72
2.3.1.3 Lastwechsel bei Geradeausfahrt	72
2.4 Vertikaldynamik	73
2.4.1 Aufbaufedern	73
2.4.1.1 Federübersetzung	74
2.4.1.2 Eigenfrequenzen	74
2.4.2 Schwingungsdämpfer	75

2.4.3	Fahrbahn als Anregung	76
2.4.3.1	Harmonische Anregungen	76
2.4.3.2	Periodische Unebenheiten	77
2.4.3.3	Stochastische Unebenheiten	77
2.4.3.4	Spektrale Dichte der Fahrbahnunebenheiten	78
2.4.3.5	Gemessene, reale Fahrbahnunebenheiten	78
2.4.4	Zweimassen Feder-Dämpfersystem mit dem Reifen als Federelement	79
2.4.5	Federungsmodelle	81
2.4.5.1	Einmassen-Ersatzsystem	81
2.4.5.2	Zweimassen-Ersatzsystem	81
2.4.5.3	Erweiterung um Sitzfederung	82
2.4.5.4	Einspur-Federungsmodell	83
2.4.5.5	Zweispur-Federungsmodell	84
2.4.6	Parametervariation	86
2.4.7	Verknüpfung Fahrbahn–Fahrzeug	88
2.4.7.1	Spektrale Dichte der Aufbaubeschleunigung	89
2.4.7.2	Spektrale Dichte der Radlastschwankungen	90
2.4.8	Menschliche Schwingungsbewertung	91
2.4.9	Erkenntnisse aus den vertikaldynamischen Grundlagen	92
2.5	Querdynamik	93
2.5.1	Anforderungen an das Fahrverhalten	93
2.5.2	Lenkinematik	94
2.5.2.1	Statische Lenkungsauslegung	95
2.5.2.2	Dynamische Lenkungsauslegung	95
2.5.3	Fahrzeugmodellierung	96
2.5.3.1	Einfaches Einspurmodell	96
2.5.3.2	Einfache Betrachtungen der Fahrdynamik	98
2.5.3.3	Bewegungsvorgänge beim Über- und Untersteuern	101
2.5.3.4	Erweitertes Einspurmodell mit Hinterradlenkung	101
2.5.3.5	Nichtlineares Einspurmodell	103
2.5.3.6	Instantanäre Betrachtungen des einfachen Einspurmodells	103
2.5.4	Die Regelstrecke „Fahrzeug“ im Regelkreis	107
2.5.4.1	Dynamisches Verhalten der Regelstrecke Fahrzeug	107
2.5.4.2	Schwimmwinkelkompensation mittels Hinterradlenkung	110
2.5.5	Frequenzgangbetrachtung bei variierten Fahrzeugparametern	111
2.5.5.1	Variation der Fahrgeschwindigkeit	112
2.5.5.2	Variation des Gierträgheitsmoments	112
2.5.5.3	Variation der hinteren Schräglaufsteifigkeit	112
2.5.6	Zweispur-Fahrzeugmodellierung	113
2.5.7	Parametervariation	116
2.5.7.1	Variation der Schwerpunkthöhe (Variante 1)	116
2.5.7.2	Variation der Schwerpunktlage in Längsrichtung (Variante 2)	117
2.5.7.3	Variation der Wankachse (Variante 3)	117
2.5.7.4	Variation der Wankfederverteilung (Variante 4)	118
2.5.7.5	Variation des Antriebskonzepts (Variante 5)	119
2.6	Allgemeine Fahrdynamik	120
2.6.1	Wechselwirkungen zwischen Vertikal-, Längs- und Querdynamik	120
2.6.1.1	Vertikalkraftschwankungen	120
2.6.2	Kritische Fahr Situationen	121
2.6.2.1	Bremsen in der Kurve	121
2.6.2.2	Beschleunigte Kurvenfahrt	122
2.6.2.3	Lastwechsel in der Kurve	123
2.6.2.4	Vertikalanregung durch Fahrbahnunebenheiten bei Kurvenfahrt	124
2.6.2.5	Bremsen und Anfahren auf einer inhomogenen Fahrbahnoberfläche ( $\mu$ -Split)	124
2.7	Fahrverhalten	125
2.7.1	Beurteilung des Fahrverhaltens	126
2.7.2	Fahrmanöver	127
2.7.3	Fahrmanöver Parameterraum	130
2.7.4	Abstimmungsmaßnahmen	132
2.7.4.1	Abstimmungsmaßnahmen zum stationären Lenkverhalten	132

2.7.5	Subjektive Fahrverhaltensbeurteilung .....	132
2.7.5.1	Bewertungsmethoden und Darstellung .....	132
2.7.5.2	Anfahrverhalten .....	135
2.7.5.3	Bremsverhalten .....	135
2.7.5.4	Lenkverhalten .....	135
2.7.5.5	Kurvenverhalten .....	139
2.7.5.6	Geradeausfahrt .....	139
2.7.5.7	Fahrkomfort (subjektiv) .....	139
2.7.6	Objektive Fahrverhaltensbeurteilung .....	144
2.7.6.1	Messgrößen .....	144
2.7.6.2	Anfahrverhalten .....	144
2.7.6.3	Bremsverhalten .....	145
2.7.6.4	Lenkverhalten .....	147
2.7.6.5	Kurvenverhalten .....	148
2.7.6.6	Geradeausfahrt .....	150
2.7.6.7	Fahrkomfort (objektiv) .....	152
2.8	Aktive und passive Sicherheit .....	152
<b>3</b>	<b>Bestandteile des Fahrwerks .....</b>	<b>156</b>
3.1	Struktur des Fahrwerks .....	156
3.1.1	Funktionelle Struktur des Fahrwerks .....	156
3.1.2	Modulare Struktur des Fahrwerks .....	157
3.1.3	Bestandteile des Fahrwerks .....	157
3.2	Antriebsstrang .....	158
3.2.1	Anordnungen .....	158
3.2.2	Achsgetriebe .....	158
3.2.2.1	Offene Differenziale .....	158
3.2.2.2	Formschlüssige Sperrdifferenziale .....	159
3.2.2.3	Selbstregelnde Sperrdifferenziale .....	159
3.2.2.4	Aktive Sperrdifferenziale .....	159
3.2.2.5	Torque Vectoring .....	161
3.2.3	Allradantrieb (Längsverteiler) .....	162
3.2.4	Allradantrieb (Längs-/Querverteiler) .....	163
3.2.5	Abschaltbare Allradssysteme .....	164
3.2.6	Betriebsstrategien .....	164
3.2.7	Aktuelle Allradssysteme .....	165
3.2.8	Seitenwellen .....	166
3.3	Radbremzen und Bremssysteme .....	167
3.3.1	Aufgaben und Grundlagen .....	168
3.3.2	Arten von Bremsanlagen .....	168
3.3.2.1	Allgemeine Anforderungen .....	169
3.3.3	Gesetzliche Vorschriften .....	170
3.3.4	Auslegung der Bremsanlage .....	170
3.3.4.1	Bremskraftverteilung .....	171
3.3.4.2	Dimensionierung .....	172
3.3.4.3	Bremskennung .....	173
3.3.5	Bremsmomente und Dynamik .....	173
3.3.5.1	Bremsmomente .....	173
3.3.5.2	Bremsdynamik .....	174
3.3.6	Komponenten des Bremssystems .....	175
3.3.6.1	Bremssattel .....	175
3.3.6.2	Bremsscheiben .....	179
3.3.6.3	Bremsbeläge .....	180
3.3.6.4	Trommelbremsen .....	180
3.3.6.5	Bremsleitungen und -schläuche .....	182
3.3.6.6	Bremsflüssigkeit .....	183
3.3.6.7	Bremskraftverstärker .....	183
3.3.6.8	Tandem-Hauptzylinder .....	186
3.3.6.9	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) .....	186

3.3.7	Elektronische Bremsregelsysteme .....	191
3.3.7.1	Bremsassistent (MBA, EBA, HBA) .....	191
3.3.7.2	Hydraulisch/Elektronische Regeleinheit (HECU) .....	192
3.3.7.3	Raddrehzahlsensor .....	194
3.3.7.4	Funktionen der elektronischen Bremssysteme .....	195
3.3.8	Neuartige Bremssysteme .....	200
3.3.8.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB) .....	200
3.3.8.2	Elektromechanische Bremse (EMB) .....	201
3.3.8.3	Elektrohydraulische Kombibremse (EHC) .....	203
3.3.8.4	Regenerative Bremssysteme .....	204
3.3.8.5	Elektro-hydraulische Bremsbetätigung .....	204
3.3.9	Vernetztes Chassis .....	204
3.4	Lenksysteme .....	207
3.4.1	Anforderungen und Bauformen .....	207
3.4.2	Hydraulische Zahnstangenlenkung .....	210
3.4.2.1	Technik und Funktion .....	210
3.4.2.2	Aufbau und Bauteile .....	213
3.4.2.3	Spurstangen .....	216
3.4.3	Lenkstrang und Lenksäule .....	220
3.4.3.1	Komponenten und Funktionseinheiten .....	220
3.4.3.2	Auslegung und Erprobung .....	223
3.4.3.3	Crashanforderungen und Energieverzehrmehanismen .....	223
3.4.3.4	Ausblick und Modularisierung .....	227
3.4.4	Lenkrad .....	227
3.4.5	Elektromechanische Lenkung .....	229
3.4.5.1	Bauformen .....	230
3.4.5.2	Aufbau und Vorteile .....	233
3.4.5.3	Bedeutung der Lenkung für die Assistenzsysteme .....	236
3.4.6	Überlagerungs- oder Aktivlenkung .....	237
3.4.6.1	Überlagerung von Momenten .....	237
3.4.6.2	Überlagerung von Winkeln .....	237
3.4.6.3	Stellervarianten der Aktivlenkung .....	238
3.4.6.4	Überlagerungsaktor am Lenkgetriebe .....	238
3.4.6.5	Überlagerungsaktor in der Lenksäule .....	240
3.4.6.6	Überlagerungsaktor um die Zwischenwelle .....	240
3.4.6.7	Steuergerät und Sicherheitskonzept .....	241
3.4.6.8	Funktionen der Aktivlenkung .....	242
3.4.7	Zahnstangenservolenkung mit Momenten- und Winkelsteller .....	245
3.4.8	Hinterachs- und Allradlenkung .....	246
3.4.9	Steer-by-wire-Lenksystem und Einzelradlenkung .....	248
3.4.9.1	Systemkonzept und Bauteile .....	249
3.4.9.2	Technik, Vorteile und Chancen .....	251
3.5	Federn und Stabilisatoren .....	252
3.5.1	Aufgabe der Federung .....	252
3.5.2	Systematik der Federarten .....	252
3.5.3	Konstruktion und Berechnung von Stahlfedern .....	252
3.5.3.1	Blattfedern .....	253
3.5.3.2	Drehstabfedern .....	256
3.5.3.3	Stabilisatoren .....	257
3.5.3.4	Schraubenfedern .....	265
3.5.4	Werkstoffe für Stahlfedern .....	273
3.5.5	Herstellung von Stahlfedern .....	275
3.5.5.1	Warmumformung .....	276
3.5.5.2	Vergütung warmgeformter Federn .....	277
3.5.5.3	Kaltumformung .....	277
3.5.5.4	Kugelstrahlen .....	279
3.5.5.5	Plastifizieren .....	279
3.5.5.6	Korrosionsschutz .....	280
3.5.5.7	Endkontrolle und Markierung .....	281
3.5.6	Compositfedern .....	281

3.5.7	Federung für Niveauregelung	282
3.5.7.1	Aufgaben und Bauarten	282
3.5.7.2	Berechnung von Gasfedern und deren Eigenschaften	283
3.5.8	Federung durch Elastomerfeder	285
3.5.9	Federung durch Gaskompression	286
3.5.9.1	Vor- und Nachteile von Gasfedern	286
3.5.9.2	Luftfederung	287
3.5.9.3	Hydropneumatische Federung	287
3.6	Dämpfung	288
3.6.1	Aufgabe der Dämpfung	288
3.6.2	Teleskopdämpfer-Bauarten	291
3.6.2.1	Zweirohrdämpfer	292
3.6.2.2	Einrohrdämpfer	292
3.6.2.3	Vergleich beider Dämpferarten	293
3.6.2.4	Sonderbauarten	293
3.6.3	Stoßdämpferberechnung	294
3.6.4	Zusatzfunktionen im Dämpfer	295
3.6.4.1	Zug- und Druckanschlüge	295
3.6.4.2	Hubabhängige Dämpfung	297
3.6.4.3	Amplitudenselektive Dämpfung	298
3.6.5	Dämpferlager	300
3.6.6	Semiaktive Dämpfung	300
3.6.6.1	Lastabhängige Dämpfung	300
3.6.6.2	Elektrisch verstellbare Dämpfung	301
3.6.7	Alternative Dämpfungsprinzipien	305
3.6.7.1	Dämpfer mit rheologischen Flüssigkeiten	305
3.6.7.2	Verbunddämpfung	306
3.6.7.3	Elektrischer Dämpfer	306
3.6.8	Kombinierte Feder-/Dämpfereinheiten	306
3.6.8.1	Federträger und Federbein	307
3.6.8.2	Hydropneumatische Federung	308
3.6.8.3	Selbstpumpendes, hydropneumatisches Feder- und Dämpferelement	309
3.6.8.4	Luftfederung und hydraulischer Dämpfer	312
3.6.9	Gas-Feder-Dämpfereinheiten (GFD)	313
3.6.9.1	Physikalische Grundlagen	313
3.6.9.2	Auslegung der Gas-Feder-Dämpfereinheit	318
3.6.9.3	Ausführungsbeispiele von Gas-Feder-Dämpfereinheiten	325
3.6.9.4	Formelzeichen und Basisformeln der Gas-Feder-Dämpfer-Einheiten	326
3.7	Radführung	327
3.7.1	Aufgaben, Struktur und Systematik	327
3.7.2	Fahrwerklenker	328
3.7.2.1	Systematik der Fahrwerklenker	329
3.7.2.2	Führungslenker	330
3.7.2.3	Traglenker	330
3.7.2.4	Hilfslenker	330
3.7.2.5	Anforderungen an Fahrwerklenker	330
3.7.2.6	Werkstoffe für Fahrwerklenker	330
3.7.2.7	Herstellverfahren für Fahrwerklenker	332
3.7.2.8	Auslegung und Optimierung der Lenker	340
3.7.2.9	Integration der Gelenke an den Lenker	341
3.7.3	Kugelgelenk	342
3.7.3.1	Aufgabe und Anforderungen	343
3.7.3.2	Systematik für Kugelgelenke	343
3.7.3.3	Aufbau der Kugelgelenke	344
3.7.3.4	Lagersystem (Schale, Fett)	347
3.7.3.5	Dichtsystem (Balg, Spannring)	350
3.7.3.6	Führungsgelenke	352
3.7.3.7	Traggelenke	354
3.7.3.8	Hülsengelenke	355

3.7.4	Gummilager .....	356
3.7.4.1	Aufgabe, Anforderungen, Funktion .....	357
3.7.4.2	Ausführungen .....	359
3.7.5	Drehgelenk .....	361
3.7.6	Drehschubgelenk .....	361
3.7.7	Kugelschubgelenk .....	362
3.7.8	Achsträger .....	363
3.7.8.1	Aufgabe und Anforderungen .....	363
3.7.8.2	Systematik und Bauarten .....	363
3.8	Radträger und Radlager .....	366
3.8.1	Bauarten für Radträger .....	366
3.8.2	Werkstoffe und Herstellverfahren für Radträger .....	368
3.8.3	Bauarten für Radlager .....	369
3.8.3.1	Dichtung .....	371
3.8.3.2	Schmierung .....	372
3.8.3.3	ABS-Sensoren .....	372
3.8.4	Herstellung von Radlagern .....	374
3.8.4.1	Ringe und Flansche .....	374
3.8.4.2	Käfige und Wälzkörper .....	375
3.8.4.3	Montage .....	375
3.8.5	Anforderung, Auslegung und Erprobung .....	376
3.8.5.1	Ermüdungslebensdauer (Überrollfestigkeit) des Radlagers .....	378
3.8.5.2	Bauteilfestigkeit und Kippsteifigkeit .....	379
3.8.5.3	Verifizierung durch Prüfmethoden .....	381
3.8.6	Ausblick .....	382
3.9	Reifen und Räder .....	386
3.9.1	Anforderungen an den Reifen .....	386
3.9.1.1	Gebrauchseigenschaften .....	387
3.9.1.2	Gesetzliche Anforderungen .....	390
3.9.1.3	Umweltaspekte .....	392
3.9.2	Bauarten, Aufbau und Material .....	393
3.9.2.1	Reifenbauarten .....	393
3.9.2.2	Reifenaufbau .....	393
3.9.2.3	Sommer-, Winter-, All-Seasonreifen .....	394
3.9.2.4	Reifenmaterialien .....	394
3.9.2.5	Viskoelastische Eigenschaften von Gummi .....	395
3.9.3	Kraftübertragung Reifen–Fahrbahn .....	397
3.9.3.1	Tragverhalten .....	397
3.9.3.2	Kraftschlussverhalten, Aufbau von Horizontalkräften .....	397
3.9.3.3	Antreiben und Bremsen, Umfangskräfte .....	398
3.9.3.4	Schräglauf, Seitenkräfte und Rückstellmomente .....	399
3.9.3.5	Schräglaufsteifigkeit .....	400
3.9.3.6	Reifen unter Quer- und Längsschlupf .....	401
3.9.3.7	Reifengleichförmigkeit .....	401
3.9.4	Reifenmodelle für die Simulation .....	402
3.9.4.1	Reifenmodelle für die Horizontaldynamik .....	402
3.9.4.2	Reifenmodelle mit Finiten Elementen (FEM-Modelle) .....	404
3.9.4.3	Reifenmodelle für die Vertikaldynamik .....	404
3.9.4.4	Reifenmoden .....	405
3.9.4.5	Eigenschwingung der Kavität .....	405
3.9.4.6	Gesamtmodelle .....	405
3.9.5	Auswahl und Entwicklung von Reifen und Rädern .....	406
3.9.5.1	Reifen .....	406
3.9.5.2	Rad .....	406
3.9.6	Moderne Reifentechnologien .....	407
3.9.6.1	Reifensensorik .....	407
3.9.6.2	Reifennotlaufsysteme .....	410
3.9.6.3	Reifen und Regelsysteme .....	411
3.9.6.4	High-Performance-(HP-) und Ultra-High-Performance-(UHP-)Reifen .....	411

3.9.7	Test und Messmethoden im Fahrversuch	413
3.9.7.1	Subjektive Testverfahren	413
3.9.7.2	Objektive Testverfahren für die Längshaftung	414
3.9.7.3	Objektive Testverfahren für die Seitenhaftung	415
3.9.7.4	Akustik	415
3.9.8	Test und Messmethoden im Labor	415
3.9.8.1	Grundkonzepte für Reifenprüfstände	416
3.9.8.2	Festigkeitsprüfung	416
3.9.8.3	Charakteristikmessungen am Prüfstand	416
3.9.8.4	Charakteristikmessungen mit dem Laborfahrzeug	417
3.9.8.5	Rollwiderstandsmessung	417
3.9.8.6	Uniformity- und Geometrie-Messung	418
3.9.8.7	Streckenmessung und Modellierung	419
3.9.8.8	Verlustleistungsanalyse	420
3.9.8.9	Reifentemperaturverfahren	420
3.9.9	Zukünftige Reifentechnologien	421
3.9.9.1	Materialentwicklung	421
3.9.9.2	Rollwiderstandsenkung (Sparreifen)	422
3.9.9.3	Neuartige Reifenkonzepte	422
<b>4</b>	<b>Achsen und Radaufhängungen</b>	<b>426</b>
4.1	Starrachsen	428
4.1.1	Starrachsen mit Längsblatfederführung	430
4.1.2	Starrachsen mit Längs- und Querlenker	431
4.1.3	De-Dion-Achse: angetriebene Starrachse mit Zentralgelenk	433
4.1.4	Starrachsen mit Zentralgelenk- und Querlenkerführung (Deichselachse)	433
4.2	Halbstarrachsen	433
4.2.1	Verbundlenkerachsen	433
4.2.1.1	Torsionskurbelachse	436
4.2.1.2	Koppellenkerachse	436
4.2.1.3	Verbundlenkerachse	436
4.2.1.4	Verbundlenkerachse mit Wattgestänge	436
4.2.2	Dynamische Verbundachse (DVA)	436
4.3	Einzelradaufhängungen	437
4.3.1	Kinematik der Einzelradaufhängung	438
4.3.2	Eigenschaften der Einzelradaufhängungen	440
4.3.3	Einzelradaufhängungen mit einem Lenker	440
4.3.3.1	Längslenker-Einzelradaufhängungen	440
4.3.3.2	Schräglenker-Einzelradaufhängungen	441
4.3.3.3	Schraublenker-Einzelradaufhängungen	442
4.3.4	Einzelradaufhängungen mit zwei Lenkern	443
4.3.4.1	Quer-Längs-Pendelachsen	443
4.3.4.2	Trapezlenker mit einem Querlenker	444
4.3.4.3	Trapezlenker mit einem flexiblen Querlenker (Porsche Weissachachse)	444
4.3.5	Einzelradaufhängungen mit drei Lenkern	444
4.3.5.1	Längslenker mit zwei Querlenkern	444
4.3.5.2	Längslenker mit zwei Schräglenkern (Zentrallenker-Einzelradaufhängung)	445
4.3.5.3	Doppelquerlenker-Einzelradaufhängungen	445
4.3.6	Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Hinterachse (Mehrlenker)	448
4.3.6.1	Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung des unteren 3-Punkt-Lenkens	450
4.3.6.2	Mehrlenkerhinterachsen durch Auflösung der oberen 3-Punkt-Lenker	450
4.3.6.3	Trapezlenkerachse (Integralenker)	451
4.3.6.4	Mehrlenkerhinterachsen mit Längslenker	451
4.3.7	Vierlenker – Einzelradaufhängungen der Vorderachse (Mehrlenker)	453
4.3.8	Einzelradaufhängungen mit fünf Lenkern	455
4.3.8.1	Fünflenker Einzelradaufhängung – Vorderachse	456
4.3.8.2	Fünflenker Einzelradaufhängung – Hinterachse (Raumlenker)	456
4.3.9	Federbein-Einzelradaufhängungen	457
4.3.9.1	Dreieckslenker-Federbeinaufhängung	459
4.3.9.2	McPherson mit Querverbindungsstraverse	459

4.3.9.3	McPherson mit optimiertem Lenker	460
4.3.9.4	McPherson mit aufgelöstem unteren Lenker (Dreilenker-Federbein)	460
4.3.9.5	McPherson mit doppeltem Radträger	460
4.3.9.6	Federbeinaufhängung für die Hinterachse	461
4.4	Einzelradaufhängungen der Vorderachse	462
4.4.1	Anforderungen an die Vorderachsaufhängungen	462
4.4.2	Komponenten der Vorderachse	463
4.4.3	Einsatzgebiete der Vorderachstypen	464
4.4.4	Besonderheiten der Vorderachsaufhängungen	464
4.5	Einzelradaufhängungen der Hinterachse	465
4.5.1	Anforderungen an die Hinterachse	465
4.5.2	Komponenten der Hinterachse	467
4.5.3	Einsatzgebiete der Hinterachstypen	467
4.5.4	Besonderheiten der Hinterachsaufhängungen	468
4.5.4.1	Nicht angetriebene Hinterachse	468
4.5.4.2	Angetriebene Hinterachse	468
4.5.4.3	Verbundlenker Hinterachsen	469
4.5.4.4	Mehrlenker Hinterachsen	469
4.6	Gesamtfahrwerk	469
4.6.1	Zusammenspiel von Vorder- und Hinterachse	469
4.6.2	Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs	469
4.6.3	Achslastverlagerungen	469
4.6.4	Konstruktionskatalog als Auswahlhilfe für die Achstypen	469
4.7	Radaufhängungen der Zukunft	470
4.7.1	Achstypen der letzten 20 Jahre	470
4.7.2	Häufigkeit der aktuellen Achstypen	470
4.7.3	Die zukünftigen Vorderachstypen (Tendenzen)	472
4.7.4	Die zukünftigen Hinterachstypen (Tendenzen)	472
<b>5</b>	<b>Fahrkomfort</b>	<b>475</b>
5.1	Grundlagen, Mensch und NVH	475
5.1.1	Begriffe und Definitionen	475
5.1.2	Schwingungs- und Geräuschquellen	477
5.1.3	Wahrnehmungsgrenzen des Menschen	477
5.1.4	Das Wohlbefinden des Menschen	478
5.1.5	Maßnahmen gegen Schwingungen und Geräusche	479
5.1.6	Vorgehen bei der NVH-Optimierung	480
5.2	Gummiverbundteile	481
5.2.1	Funktion der Gummiverbundteile	481
5.2.1.1	Kräfte übertragen	481
5.2.1.2	Definierte Bewegungen ermöglichen	481
5.2.1.3	Geräusche isolieren	481
5.2.1.4	Schwingungen dämpfen	482
5.2.2	Elastomer spezifische Definitionen	483
5.2.2.1	Kennlinien	483
5.2.2.2	Dämpfung	484
5.2.2.3	Setzung	484
5.3	Aggregatelager	485
5.4	Fahrwerk – Gummilager	489
5.4.1	Hülsenlager	489
5.4.2	Gleitlager	491
5.4.3	Hydraulisch dämpfende Buchsen	492
5.4.4	Verbundlenkerlager	494
5.5	Achsträgerlager	494
5.6	Federbeinstützlager	496
5.7	Berechnungsmethoden	497
5.8	Akustische Bewertung von Gummiverbundteilen	499
5.9	Zukünftige Bauteilausführungen	499
5.9.1	Sensorik	500
5.9.2	Schaltbares Fahrwerkklager	501
5.9.3	Regelbares Fahrwerkklager	502



<b>6 Fahrwerkentwicklung</b>	504
6.1 Entstehung des Fahrwerks	504
6.1.1 Entwicklungsprozess	505
6.1.2 Projektmanagement (PM)	510
6.2 Planung und Definitionsphase	510
6.2.1 Zielwertkaskadierung	511
6.3 Konzeptphase	512
6.4 Virtuelle Simulation	512
6.4.1 Software für die Mehrkörpersimulation (MKS)	513
6.4.1.1 Aufbau von MKS-Fahrwerksmodellen mit ADAMS/Car	513
6.4.1.2 CAD-Fahrwerkmodell und Mehrkörpersystem	513
6.4.1.3 Mehrkörpersimulation mit starren und flexiblen MKS-Modellen	513
6.4.1.4 Mehrkörpersimulation mit Gesamtfahrzeug-, Fahrwerk- und Achsmodellen	515
6.4.1.5 Einfluss der Fertigungstoleranzen auf die kinematischen Kennwerte	515
6.4.2 Software für Finite Elemente Methode (FEM)	515
6.4.2.1 Klassifizierung der Analysen	517
6.4.2.2 Festigkeitsanalysen	517
6.4.2.3 Steifigkeitsanalysen	517
6.4.2.4 Eigenfrequenzanalysen	518
6.4.2.5 Lebensdauer-Betriebsfestigkeit	518
6.4.2.6 Crash-Simulationen	519
6.4.2.7 Topologie- und Formoptimierung	519
6.4.2.8 Simulation der Fertigungsverfahren	520
6.4.3 Vollfahrzeugsimulation	520
6.4.3.1 Fahrdynamiksimulation	520
6.4.3.2 Kinematik/Elastokinematik	520
6.4.3.3 Standard-Lastfälle	521
6.4.3.4 MKS-Modellverifikation	522
6.4.3.5 NVH	522
6.4.3.6 Loadmanagement (Lastenkaskadierung vom System zur Komponente)	522
6.4.3.7 Vollfahrzeug Betriebsfestigkeitssimulation	527
6.4.4 Software zur 3D-Modellierung CAD	527
6.5 Integrierte Simulationsumgebung	528
6.5.1 Kinematische Analyse: Basistool ABE	528
6.5.2 Vollautomatische Kinematik- und Elastokinematik-Optimierung OPT	530
6.5.3 Virtuelle Produktentwicklungsumgebung	531
6.6 Serienentwicklung und Absicherung	533
6.6.1 Konstruktion	533
6.6.1.1 Bauteilkonstruktion	534
6.6.1.2 Bauraum „Package“	534
6.6.1.3 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse	535
6.6.1.4 Toleranzuntersuchungen	535
6.6.2 Validierung	536
6.6.2.1 Prototypen	536
6.6.2.2 Validierung am Prüfstand	536
6.6.2.3 Straßen-Simulationsprüfstand (SSP)	538
6.6.3 Validierung am Gesamtfahrzeug	540
6.6.4 Optimierung und Abstimmung	540
6.7 Serienbegleitende Entwicklung	540
6.8 Ausblick und Zusammenfassung	541
<b>7 Fahrwerkelektronik</b>	543
7.1 Motivation und Nutzen	543
7.1.1 Grenzen passiver Fahrwerke	543
7.1.1.1 Zielkonflikt Dämpfungsauslegung	543
7.1.1.2 Zielkonflikt Federungsauslegung	544
7.1.1.3 Zielkonflikt Lenkübersetzung	544
7.1.1.4 Forderung nach aktiven Systemen	544
7.1.2 Fahrzeugführung	545
7.1.2.1 Regelkreis Fahrer–Fahrzeug	545
7.1.2.2 Vereinfachte Fahrzeugführung	545

7.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme	546
7.2.1 Begriffsbestimmungen	546
7.2.2 Unterteilung der Fahrwerkregelsysteme in Domänen	546
7.3 Längsdynamikfunktionen	547
7.3.1 Traktionsregelung mit dem Allradverteilergetriebe	547
7.3.2 Traktionsregelung Achsgetriebe	548
7.3.3 Torque Vectoring	549
7.4 Vertikaldynamikfunktionen	550
7.4.1 Variable Dämpfer	550
7.4.2 Aktiver Stabilisator	551
7.4.3 Niveauregulierung	552
7.5 Querdynamikfunktionen	552
7.5.1 Elektrolenkung	553
7.5.2 Überlagerungslenkung	554
7.5.3 Hinterachslenkung	554
7.6 Systemvernetzung und Funktionsintegration	555
7.6.1 Systemvernetzung	555
7.6.2 Fahrdynamikregelung	556
7.6.3 Funktionsintegration	559
7.6.4 Funktionsarchitektur	559
7.6.5 Standardschnittstellen / Autosar	560
7.7 Elektronik-Hardware, Sensorik und Aktuatorik	561
7.7.1 Technologiebeispiele	561
7.7.2 Umweltaforderungen	564
7.7.3 Bussysteme im Fahrwerk	565
7.7.3.1 CAN-Bus	565
7.7.3.2 FlexRay	565
7.7.4 Aktuatoren im Fahrwerk	566
7.7.5 Sensoren im Fahrwerk	567
7.8 Entwicklung der Fahrwerkregelsysteme	569
7.8.1 Entwicklung gemäß Automotive SPICE	569
7.8.2 Funktionale Sicherheit	571
7.8.3 Simulation der Fahrwerkelektronik	572
7.8.4 Hardware-in-the-Loop-Simulation	574
<b>8 Elektronische Systeme im Fahrwerk</b>	<b>576</b>
8.1 Elektronische Struktur des Fahrwerks	576
8.2 Mechatronische Längsdynamiksysteme	576
8.2.1 Antriebssysteme	576
8.2.1.1 xDrive	577
8.2.1.2 Active Yaw Control (AYC)	578
8.2.1.3 Quattro Sport Differenzial	579
8.2.1.4 Weitere aktive Allradantriebssysteme	581
8.2.1.5 Systeme mit Frontantrieb-Querverteiler Überlagerungsdifferenzial	581
8.2.1.6 4Motion von VW	582
8.2.2 Bremssysteme	582
8.2.2.1 Grundlagen des Bremsen-Fahrdynamikreglers	582
8.2.2.2 Zusatzfunktionen in aktiven Bremssystemen	583
8.3 Mechatronische Vertikaldynamiksysteme	584
8.3.1 Anforderungen an die Vertikalsysteme	584
8.3.2 Einteilung der Vertikalsysteme	584
8.3.3 Dämpfungssysteme	586
8.3.3.1 Adaptive Dämpfungssysteme	586
8.3.3.2 Semi-aktive Dämpfungssysteme	587
8.3.3.3 Regelstrategien für semi-aktive Dämpfer	589
8.3.4 Niveauregulierungssysteme	590
8.3.5 Adaptive Luftfederungssysteme	591
8.3.6 Aktuelle aktive Federungssysteme	593
8.3.6.1 Langsam-aktive Fahrwerksysteme	593
8.3.6.2 Voll-aktive, integrierte Fahrwerksysteme	596
8.3.7 Lagersysteme	598

8.4	Mechatronische Querdynamiksysteme	600
8.4.1	Vorderradlenkung	600
8.4.2	Hinterradlenkung	602
8.4.3	Wankstabilisierungssysteme	610
8.4.3.1	Passiver Stabilisator	611
8.4.3.2	Schaltbare Off-Road-Stabilisatoren	611
8.4.3.3	Schaltbare On-Road-Stabilisatoren	611
8.4.3.4	Semiaktive Stabilisatoren	612
8.4.3.5	Hydraulische aktive Stabilisatoren	613
8.4.3.6	Elektrische aktive Stabilisatoren	616
8.4.4	Aktive Kinematik	618
8.4.5	Gegenüberstellung der Fahrdynamiksysteme	621
8.4.6	Vernetzung der Fahrwerksysteme	623
8.5	X-by-wire	624
8.5.1	Steer-by-wire	624
8.5.2	Brake-by-wire	625
8.5.2.1	Elektrohydraulische Bremse (EHB)	626
8.5.2.2	Elektromechanische Bremse (EMB)	626
8.5.2.3	Elektromechanische Bremse von Conti-Teves	626
8.5.2.4	Elektrohydraulische Combi-Bremse (EHC)	627
8.5.2.5	Radialbremse	628
8.5.2.6	Keilbremse	628
8.5.2.7	Mechatronische Bremse	629
8.5.3	Leveling-by-wire	630
8.6	Fahrerinformationssysteme	630
8.7	Fahrerwarnsysteme	631
8.7.1	Fahrerwarnung bei der Längsführung	631
8.7.2	Fahrerwarnung bei der Querrführung	632
8.8	Fahrerassistenzsysteme	633
8.8.1	Bremsassistentz	633
8.8.1.1	Sicherheitsrelevante Bremsassistentz	634
8.8.1.2	Komfortorientierte Bremsassistentz	636
8.8.1.3	Anforderungen an die Bremsassistentz	636
8.8.2	Distanzhalteassistentz	637
8.8.2.1	Front Assist von VW	637
8.8.2.2	Distrionic Plus von Mercedes-Benz	638
8.8.2.3	ACC Systeme anderer Automobilhersteller	639
8.8.2.4	Car2Car-Kommunikation zur Verkehrssicherheit	640
8.8.3	Lenkassistentz	640
8.8.3.1	Lenkassistentz durch Anpassung der Unterstützungskraft	640
8.8.3.2	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerhandmoments	641
8.8.3.3	Lenkassistentz durch Überlagerung des Fahrerlenkwinkels	644
8.8.3.4	Lenkassistentz durch kombinierten Eingriff aus Lenkradwinkel und -moment	645
8.8.4	Einparkassistentz	645
8.8.4.1	Einführung	645
8.8.4.2	Parklückenerkennung	646
8.8.4.3	Einparkvorgang	647
8.8.4.4	Lenkaktuator	648
8.8.5	Zusammenfassung	648
<b>9</b>	<b>Zukunftsaspekte des Fahrwerks</b>	<b>652</b>
9.1	Fahrwerkkonzepte – Fokussierung auf den Kundenwert	653
9.1.1	Auslegung des Fahrverhaltens	653
9.1.2	Diversifizierung und Stabilisierung der Fahrwerkkonzepte	654
9.1.2.1	Vorderachsen	655
9.1.2.2	Hinterachsen	655
9.1.3	Fahrwerkbestandteile der Zukunft	655
9.1.3.1	Achsantrieb der Zukunft	655
9.1.3.2	Bremse der Zukunft	655
9.1.3.3	Lenkung der Zukunft	656

9.1.3.4	Federung der Zukunft .....	656
9.1.3.5	Dämpfung der Zukunft .....	656
9.1.3.6	Radführung der Zukunft .....	656
9.1.3.7	Radlager der Zukunft .....	656
9.1.3.8	Reifen und Räder der Zukunft .....	656
9.1.4	Elektronische Fahrwerksysteme der Zukunft .....	656
9.1.4.1	Systemvernetzung .....	657
9.1.4.2	Leistungsfähigkeit .....	657
9.1.4.3	Systemsicherheit .....	658
9.1.4.4	Elektronik Entwicklungsprozess .....	658
9.1.4.5	Anforderungen an die Datenübertragung .....	658
9.2	Umweltschutz und CO <sub>2</sub> .....	659
9.2.1	Bedeutung der CO <sub>2</sub> -Senkung .....	659
9.2.2	Beitrag des Fahrwerks zur CO <sub>2</sub> -Senkung .....	659
9.2.2.1	Reifen und Bremse .....	660
9.2.2.2	Nebenaggregate mit Elektroantrieb .....	660
9.2.2.3	Fahrwerkgewicht .....	660
9.2.2.4	Fahrwiderstand .....	660
9.2.2.5	Energierückgewinnung an Stoßdämpfern .....	661
9.2.2.6	Zusammenfassung .....	661
9.2.3	Beitrag des Hybridantriebs zur CO <sub>2</sub> -Senkung .....	662
9.2.3.1	Mild- und Parallel-Hybridantriebe .....	665
9.2.3.2	Seriell-Hybridantriebe .....	665
9.2.4	Bremsblending für Rekuperation .....	667
9.3	Elektrofahrzeuge .....	668
9.3.1	Antriebskonzepte für das Elektrofahrzeug .....	668
9.3.2	Fahrwerkkonzepte für Elektro-Autos .....	670
9.3.2.1	Fahrwerkkonzepte mit zentralem Elektromotor .....	671
9.3.2.2	Fahrwerkkonzepte für zwei Elektromotoren .....	671
9.3.2.3	Fahrwerkkonzepte für radnahen Antrieb .....	672
9.3.2.4	Fahrwerkkonzepte für Radnaben-Antriebe .....	673
9.3.2.5	Gegenüberstellung radnahe Antriebe und Radnaben-Antriebe .....	674
9.3.3	Elektro-Radnabenfahrwerk „eCorner“ .....	674
9.4	X-by-wire-Systeme der Zukunft .....	675
9.5	Fahrerassistenz-Systeme der Zukunft .....	676
9.6	Vorausschauende und intelligente Fahrwerke der Zukunft .....	677
9.6.1	Fahrzeugsensorik .....	677
9.6.2	Aktuatorik .....	679
9.6.3	Vorausschauendes Fahren .....	679
9.7	Autonomes Fahren in der Zukunft? .....	682
9.7.1	Selbstfahrendes Chassis, Rolling/Driving Chassis .....	682
9.7.2	Urban Challenge 2007: Die ersten Schritte zum autonomen Fahren .....	684
9.7.3	Autofahren ohne Fahrer .....	685
9.8	Zukunftsszenarien für das Auto und sein Fahrwerk .....	687
9.8.1	Trends aus der Vergangenheit .....	687
9.8.2	Trends aus der Gegenwart .....	687
9.8.3	Trends der Zukunft .....	688
9.8.4	Szenarioanalyse .....	688
9.8.5	Mögliche Zukunftsvisionen .....	689
9.9	Ausblick .....	690
<b>Glossar</b>	.....	<b>694</b>
<b>Sachwortverzeichnis</b>	.....	<b>717</b>



<http://www.springer.com/978-3-658-01991-4>

Fahrwerkhandbuch

Grundlagen · Fahrdynamik · Komponenten · Systeme ·  
Mechatronik · Perspektiven

Heißing, B.; Ersoy, M.; Gies, S. (Hrsg.)

2013, XXIII, 731 S. 1250 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-658-01991-4