

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Grundlagen	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 Fahrwerk Aufbau	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 Fahrwerksauslegung	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 Lenkinematik	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
2 Fahrdynamik	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 vertikal-dynamischen 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
3	Bestandteile des Fahrwerks	149
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	Radbremzen 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 Energieverzehrmeechanismen	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	Stoßdämpferberechnung	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(n)	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
4	Achsen im Fahrwerk	383
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	Zentralenker-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	Trapezlenkerachse (Integralenker)	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	Fünflenker-Vorderachsaufhängung	405
	(mit zwei aufgelösten 3-Punkt-Lenkern der DQL)	405
4.3.7.2	Fünflenker-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

5 Fahrkomfort	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 Gummiverbundeile	426
5.2.1 Funktion der Gummiverbundeile	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 Aggregatlager	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 Verbundlenkerlager	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 Gummiverbundeilen	446
6 Fahrwerkentwicklung	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
7	Systeme im Fahrwerk	493
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	Achsgetriebe 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
8	Zukunftsaspekte des Fahrwerks	557
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
Anhang: Alle Pkw-Plattformen und Plattformbezeichnungen 2008 bis 2016		579
Sachwortverzeichnis		591