

# 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 Fahrwerkaufbau .....   | 11 |
| 1.2.1 Fahrzeugklassen .....  | 11 |
| 1.2.2 Antriebskonzepte .....   | 12 |
| 1.2.3 Fahrwerkkonzeption .....   | 14 |
| 1.2.4 Trends in der Fahrwerkkonzeption .....                           | 16 |
| 1.3 Fahrwerkauslegung .....  | 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   | Lenkkinematik   | 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 | Instationäre 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 Fahrsituationen   | 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 Allradsysteme           | 164        |
| 3.2.6    | Betriebsstrategien                   | 164        |
| 3.2.7    | Aktuelle Allradsysteme               | 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 Energieverzehrmeechanismen       | 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 Druckanschläge  | 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 Prüfmethode                                | 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  | Rollwiderstandslenkung (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 Längsblattfederführung                                 | 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  | Trapezlenkerachsaufhängung (Integrallenker)                            | 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        |
| 5.4.5    | 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    | Umweltanforderungen  | 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</b> | <b>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 DISTRONIC 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 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> |