

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	VIII
<b>1 Simulationsmethoden</b> .....	3
1.1 Was ist Simulation? .....	3
1.2 Betrachtungsweisen .....	3
1.2.1 Finite Elemente Methode (FEM) .....	4
1.2.2 Mehrkörpersysteme (MKS).....	5
1.2.3 Blockschaltbildorientierte Methoden .....	8
<b>2 Systemtechnik</b> .....	10
2.1 Systembegriff.....	10
2.1.1 Systemgrenze .....	11
2.1.2 Kausalität.....	13
2.1.3 Übertragungsverhalten .....	14
2.1.4 Wertebereich .....	15
2.1.5 Lineare und Nichtlineare Systeme .....	16
2.2 Systemverhalten.....	18
2.2.1 Systeme mit und ohne Gedächtnis .....	18
2.2.2 Änderungsverhalten .....	18
2.3 Fragestellungen aus der gegebenen Systemstruktur.....	21
2.3.1 Systemanalyse .....	21
2.3.2 Systemidentifikation.....	21
2.3.3 Systemsteuerung.....	22
<b>3 Modellbildung</b> .....	23
3.1 Am Anfang steht das Problem.....	23
3.2 Der Unterschied zwischen fehlerbehaftet und falsch .....	25
3.3 Methoden zur Modellbildung .....	26
3.3.1 Induktion .....	26
3.3.2 Deduktion.....	27

---

3.3.3	Methode der Wahl.....	27
3.4	Modellklassen.....	28
3.4.1	Physikalische Modelle.....	28
3.4.2	Verhaltensmodelle.....	28
3.5	Problemanalyse.....	30
3.5.1	Analyse der Fragestellung.....	30
3.5.2	Analyse des Systems.....	30
3.6	Modellentwurf.....	31
3.6.1	Simulationsmethode.....	31
3.6.2	Umsetzung der Problemanalyse.....	31
3.7	Verifikation.....	32
3.8	Validierung.....	32
3.8.1	Prinzipielle Vorgehensweise.....	32
3.8.2	Vergleich von Messung und Simulation.....	34
3.8.3	Vergleich von Simulation und Simulation.....	37
3.8.4	Validierung mit Gesamtfahrzeugmessungen.....	37
3.9	Einfache oder mehrfache Verwendung.....	38
3.9.1	Modularisiert oder monolithisch?.....	38
3.9.2	Trennung von Daten und Modell.....	40
<b>4</b>	<b>Numerik – das Problem mit dem Anfang.....</b>	<b>41</b>
4.1	Wer ist EULER?.....	41
4.2	Anfangswertprobleme oder Numerische Integration von Differenzialgleichungen..	41
4.2.1	Das Anfangswertproblem.....	41
4.2.2	Numerische Integration.....	42
4.3	Numerische Integration von Differenzialgleichungen erster Ordnung.....	43
4.3.1	Ein einfaches Beispiel.....	43
4.3.2	Streckenzugverfahren nach EULER.....	44
4.3.3	Fehlerarten.....	46
4.3.4	Konvergenz und Stabilität.....	48

---

4.4	Integrationsverfahren.....	51
4.4.1	Verfahrensübersicht .....	51
4.4.2	Implizites EULER-Verfahren.....	52
4.4.3	RUNGE-KUTTA-Verfahren .....	54
4.4.4	ADAMS-Verfahren .....	54
4.4.5	BDF-Verfahren.....	56
4.5	Interpolations- und Extrapolationsverfahren.....	56
4.5.1	Interpolation .....	56
4.5.2	Extrapolation .....	58
4.6	Ein- und Ausblenden von Funktionen.....	59
4.6.1	Linear .....	59
4.6.2	Exponentiell .....	60
4.6.3	Trigonometrisch .....	62
<b>5</b>	<b>Simulationswerkzeuge</b> .....	<b>64</b>
5.1	Werkzeugauswahl.....	64
5.1.1	Inhouse-Lösung.....	64
5.1.2	Kommerzielles Produkt.....	65
5.2	Grundstruktur einer Simulationsumgebung.....	66
5.2.1	Präprozessor .....	66
5.2.2	Solver .....	68
5.2.3	Postprozessor.....	69
5.3	Schnittstellen für die Cosimulation .....	74
5.3.1	Reglerimport.....	74
5.3.2	MKS-Modellimport.....	75
5.3.3	Online-Cosimulation .....	76
5.3.4	Potenzielle Kommunikationsprobleme .....	76
<b>6</b>	<b>Simulationsprozess</b> .....	<b>79</b>
6.1	Parameterbeschaffung .....	80
6.1.1	Parameterbedarf .....	80

---

6.1.2	Benennung von Parametern .....	81
6.1.3	Einheitenbehaftete Parameter.....	84
6.1.4	Eindimensionale Parameter.....	85
6.1.5	Mehrdimensionale Parameter.....	85
6.1.6	Fahrzeugbezugssystem.....	90
6.1.7	Masseeigenschaften.....	91
6.2	Im Vorfeld der Berechnung.....	93
6.2.1	Konsistenz von Daten und Modell.....	93
6.2.2	Modellvielfalt.....	94
6.2.3	Berechnungshistorie.....	94
6.3	Berechnungsvorgang.....	95
6.3.1	Lokal oder extern.....	95
6.3.2	Kopiervorgang.....	95
6.3.3	Lizenzen.....	96
6.4	Im Nachgang der Berechnung.....	96
6.4.1	Dokumentation der Berechnung.....	96
6.4.2	Archivierung.....	96
6.4.3	Motivation zur Dokumentation.....	97
6.5	Reproduzierbarkeit der Simulationsergebnisse.....	97
<b>Teil II – Simulation in der Fahrwerktechnik.....</b>		<b>99</b>
<b>7</b>	<b>Modellbildung von Fahrwerkkomponenten.....</b>	<b>100</b>
7.1	Einsatzgebiete und Grenzen der Simulation.....	100
7.1.1	Fahrdynamik und Fahrerassistenzsysteme.....	100
7.1.2	Fahrkomfort.....	101
7.1.3	Lastkollektivvermittlung.....	102
7.1.4	Einsatz von Simulatoren.....	103
7.1.5	Potenzial der Berechnung oder noch ungehobene Schätze.....	104
7.2	Komplexität von Modellen.....	105
7.2.1	Wartung und Änderungen.....	105

7.2.2	Rechenzeitbedarf.....	106
7.2.3	Parameterbedarf .....	106
7.3	Einfache Modellansätze.....	106
7.4	Wo steckt die richtige Information?.....	107
7.5	Planung und Auswertung von Fahrmanövern .....	108
7.5.1	Einschwingzeit .....	108
7.5.2	Länge des Manövers.....	109
<b>8</b>	<b>Fahrwerkkinematik und Fahrwerkklager</b> .....	<b>110</b>
8.1	Abbildung der Kinematik .....	110
8.1.1	Mechanismenorientierte Modelle.....	110
8.1.2	Kennfeldorientierte Modelle .....	116
8.1.3	Verhaltenorientierte Modelle.....	117
8.2	Abbildung der Elastokinematik.....	118
8.2.1	Elastische Fahrwerkteile .....	118
8.2.2	Nebenfederate .....	120
8.3	Einfache Elastomerlagermodelle.....	121
8.3.1	Lineare Parametrierung.....	122
8.3.2	Nichtlineare Parametrierung .....	126
8.3.3	Einfluss der Amplitude und der Frequenz der Anregung .....	128
8.4	Grundlagen typischer Elastomerlagermodelle.....	130
8.4.1	MAXWELL-Element .....	130
8.4.2	KELVIN-VOIGT-Element .....	131
8.4.3	Kombination mehrerer Elemente .....	132
8.5	Spezielle Fahrwerkklager .....	132
8.5.1	Hydrolager.....	132
8.5.2	Kopflager.....	134
8.6	Ableich der Kinematik und Elastokinematik mit Messungen .....	135
8.6.1	Erstellung von Raderhebungskurven .....	135
8.6.2	Abweichungen im Fahrzeugniveau.....	136

---

8.6.3	Abweichungen in der Kinematik oder der Elastokinematik .....	136
8.6.4	Zusatzfedern .....	136
8.6.5	Aufbaufedersteifigkeit.....	137
8.6.6	Stabilisatorsteifigkeit.....	138
<b>9</b>	<b>Federn</b> .....	<b>139</b>
9.1	Stahlfedern.....	140
9.1.1	Schraubenfeder.....	140
9.1.2	Blattfeder.....	143
9.1.3	Torsionsstabfeder .....	147
9.1.4	Stabilisator.....	147
9.2	Luftfeder .....	149
9.2.1	Bestimmung der quasistatischen Steifigkeit .....	149
9.2.2	Bestimmung der dynamischen Steifigkeit.....	150
9.2.3	Verwendung gemessener Kennlinien.....	151
9.2.4	Niveauregulierung.....	152
9.3	Druckpuffer und Zuganschlagfeder.....	153
9.3.1	Druckpuffer .....	153
9.3.2	Zuganschlagfeder .....	154
9.3.3	Kombination.....	154
9.4	Federübersetzung.....	154
<b>10</b>	<b>Dämpfung und Reibung</b> .....	<b>157</b>
10.1	Dämpfer .....	157
10.1.1	Kraftgesetz und Dämpferkennlinie .....	157
10.1.2	Kinematik und Masse.....	161
10.1.3	Dämpferübersetzung .....	161
10.1.4	Gasfederkräfte .....	161
10.1.5	Dichtungen und Reibung.....	162
10.1.6	Temperaturverhalten .....	162
10.1.7	Komplexe Dämpfermodelle .....	163

10.2	Reibung.....	163
10.2.1	COULOMBSche Reibung.....	163
10.2.2	Fiktive Gesamtreibung.....	166
<b>11</b>	<b>Lenkung.....</b>	<b>167</b>
11.1	Einfache Lenkungsmodelle.....	168
11.2	Lenkstrang.....	171
11.2.1	Lenkgetriebe.....	171
11.2.2	Lenksäule.....	172
11.2.3	Lenkrad.....	173
11.3	Servounterstützung.....	173
11.3.1	Hydraulische Servolenkung (HPS).....	174
11.3.2	Elektrohydraulische Servolenkung (EHPS).....	175
11.3.3	Elektrische Servolenkung (EPS).....	175
<b>12</b>	<b>Reifen und Straße.....</b>	<b>177</b>
12.1	Allgemeine Anforderungen für Reifenmodelle.....	179
12.1.1	Modellierung der Kontaktfläche.....	180
12.1.2	Reibkontakt und Schlupfdefinition.....	181
12.1.3	Grenzen der Schlupfdefinition.....	184
12.1.4	Standard Tyre Interface.....	186
12.2	Reifenmodelle für die Fahrdynamik.....	186
12.2.1	Magic Formula.....	187
12.2.2	MF-Tyre und MF-SWIFT.....	188
12.2.3	HSRI-Modell.....	188
12.3	Reifenmodelle für Fahrkomfort- und Lastkollektivsimulation.....	190
12.3.1	FTire.....	191
12.3.2	RMOD-K.....	191
12.3.3	CDTire.....	192
12.4	Parametrierung der Reifenmodelle.....	192
12.4.1	Prozess der Parametrierung.....	192

---

12.4.2	Messung von Reifenparametern.....	194
12.4.3	Modelle unterschiedlicher Komplexität.....	196
12.5	Modellierung der Straße.....	196
12.5.1	Messverfahren für Straßenprofile.....	196
12.5.2	Topologie der Straße.....	198
12.5.3	Einzelanregungen.....	200
12.5.4	Periodische Anregungen.....	201
12.5.5	Stochastische Anregungen.....	202
<b>13</b>	<b>Antriebsstrang</b> .....	<b>203</b>
13.1	Vorgabe des Antriebsmoments.....	203
13.2	Motor und Getriebe.....	204
13.2.1	Motorkennfeld und Zeitverhalten.....	204
13.2.2	Massedaten.....	205
13.2.3	Lagerung.....	205
13.3	Achs- und Mittendifferenziale.....	206
<b>14</b>	<b>Bremsanlage</b> .....	<b>208</b>
14.1	Vorgabe des Bremsmoments.....	209
14.2	Bremskreise.....	209
14.3	Bremskraftverteilung.....	210
14.4	Wirkkette vom Fahrer bis zur Radbremse.....	211
14.5	Bremsmoment an der Radbremse.....	214
14.5.1	Trommelbremse.....	214
14.5.2	Scheibenbremse.....	215
14.6	Bremsen in den Stillstand.....	215
14.7	Reibwert- und Temperaturverhalten.....	216
<b>15</b>	<b>Fahrzeugaufbau</b> .....	<b>217</b>
15.1	Karosserie.....	217
15.1.1	Vorbereitung des FEM-Modells.....	218
15.1.2	Modale Reduktion.....	218



---

15.2	Gesamtgewicht .....	219
15.2.1	Gewichtsverteilung.....	219
15.2.2	Einsatz einer Korrekturmasse.....	220
15.2.3	Einsatz mehrerer Korrekturmassen .....	221
15.2.4	Fazit .....	222
15.3	Aerodynamik .....	222
15.3.1	Luftwiderstand .....	222
15.3.2	Seitenwind .....	223
15.3.3	Auftrieb .....	224
<b>16</b>	<b>Der simulierte Fahrer .....</b>	<b>225</b>
16.1	Geschwindigkeitsregelung.....	226
16.1.1	Anfangswert .....	226
16.1.2	Open-Loop-Manöver.....	227
16.1.3	Closed-Loop-Manöver .....	227
16.2	Lenkregelung.....	229
16.2.1	Open-Loop-Manöver.....	230
16.2.2	Closed-Loop-Manöver .....	230
16.3	Komplexe Fahrermodelle .....	232
<b>17</b>	<b>Das Fahrzeugmodell als Strecke.....</b>	<b>233</b>
17.1	Entwicklung von Regelsystemen.....	233
17.1.1	Software-in-the-Loop .....	234
17.1.2	Hardware-in-the-Loop.....	235
17.2	Sensorik .....	237
17.3	Aktorik.....	238
	<b>Normenverzeichnis.....</b>	<b>239</b>
	<b>Formelzeichen.....</b>	<b>240</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>242</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>243</b>
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>252</b>