

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	VIII
1 Simulationsmethoden	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
2 Systemtechnik	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
3 Modellbildung	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
4	Numerik – das Problem mit dem Anfang	41
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
5	Simulationswerkzeuge	64
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
6	Simulationsprozess.....	79
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	Kopievorgang.....	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
Teil II – Simulation in der Fahrwerktechnik.....		99
7	Modellbildung von Fahrwerkkomponenten.....	100
7.1	Einsatzgebiete und Grenzen der Simulation.....	100
7.1.1	Fahrdynamik und Fahrerassistenzsysteme	100
7.1.2	Fahrkomfort.....	101
7.1.3	Lastkollektivermittlung	102
7.1.4	Einsatz von Simulatoren.....	103
7.1.5	Potenzial der Berechnung oder noch ungehobene Schätz.....	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
8	Fahrwerkkinematik und Fahrwerklager	110
8.1	Abbildung der Kinematik	110
8.1.1	Mechanismenorientierte Modelle	110
8.1.2	Kennfeldorientierte Modelle	116
8.1.3	Verhaltensorientierte Modelle	117
8.2	Abbildung der Elastokinematik	118
8.2.1	Elastische Fahrwerkteile	118
8.2.2	Nebenfederrate	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 Fahrwerklager	132
8.5.1	Hydrolager	132
8.5.2	Kopflager	134
8.6	Abgleich 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
9	Federn	139
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
10	Dämpfung und Reibung	157
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
11 Lenkung.....	167
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
12 Reifen und Straße	177
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
13	Antriebsstrang.....	203
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
14	Bremsanlage	208
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
15	Fahrzeugaufbau	217
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
16 Der simulierte Fahrer	225
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
17 Das Fahrzeugmodell als Strecke	233
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
Normenverzeichnis	239
Formelzeichen	240
Abkürzungsverzeichnis	242
Literaturverzeichnis	243
Sachwortverzeichnis	252