

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	Masseigenschaften.....	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
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	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
8	Fahrwerkkinematik und Fahrwerkklager.....	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	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
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