

Dipl.-Ing. Andreas Rückgauer, Künzelsau

**Modulare Simulation  
mechatronischer Systeme  
mit Anwendung in der  
Fahrzeugdynamik**

Reihe **20**: Rechnerunterstützte  
Verfahren

Nr. **248**

# Inhalt

<b>Notation und Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Stand der Technik und Literaturübersicht . . . . .	2
1.2.1 Integrationsverfahren . . . . .	3
1.2.2 Simulationsprogramme . . . . .	5
1.2.3 Fahrzeugdynamik . . . . .	6
1.3 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Modulare Beschreibung dynamischer Systeme</b>	<b>10</b>
2.1 Systembegriff und Blockdarstellung . . . . .	10
2.1.1 Rückwirkungsfreiheit und Blockdarstellung . . . . .	10
2.1.2 Globale Systemstruktur . . . . .	12
2.1.3 Zustandsdarstellung . . . . .	13
2.2 Mehrkörpersysteme . . . . .	14
2.2.1 Bewegungsgleichungen . . . . .	15
2.2.2 Mechanische Deskriptorsysteme . . . . .	21
2.2.3 Kraftkopplung . . . . .	24
2.3 Modulare Subsysteme . . . . .	25
2.3.1 Modulare Mehrkörpersysteme mit Gelenken . . . . .	25
2.3.2 Aufwandsbetrachtungen . . . . .	33
2.3.3 Hydraulik . . . . .	37
2.3.4 Elektrische Energiewandler . . . . .	39

<b>3</b>	<b>Bewertung von Methoden zur numerischen Zeitintegration</b>	<b>42</b>
3.1	Grundbegriffe . . . . .	43
3.1.1	Numerische Methoden . . . . .	43
3.1.2	Integration mechatronischer Systeme . . . . .	46
3.2	Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen . . . . .	48
3.2.1	Diskretisierungsansätze . . . . .	48
3.2.2	Bewertung der Verfahren . . . . .	49
3.3	Lösung mechanischer Deskriptorsysteme . . . . .	56
3.3.1	Numerische Eigenschaften . . . . .	56
3.3.2	Zustandsmethoden und implizite Lösungsverfahren . . . . .	58
3.3.3	Projektionsverfahren . . . . .	59
3.3.4	Bewertung der Verfahren . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Simulation modularer Systeme</b>	<b>68</b>
4.1	Datenabhängigkeiten in modularen Systemen . . . . .	68
4.1.1	Darstellung der Systemtopologie . . . . .	69
4.1.2	Detektion und Kennzeichnung algebraischer Schleifen . . . . .	70
4.2	Lösung algebraischer Schleifen . . . . .	72
4.2.1	Problemformulierung . . . . .	73
4.2.2	Ermittlung von Durchgriffen . . . . .	74
4.2.3	Studie skalarer Lösungsansätze für algebraische Schleifen . . . . .	75
4.2.4	Vektorielles Sekantenverfahren . . . . .	77
4.3	Partitionierte Integration . . . . .	78
4.3.1	Multi-Rate-Integration . . . . .	79
4.3.2	Numerische Eigenschaften . . . . .	81
4.3.3	Gewählter Ansatz . . . . .	82
4.3.4	Überwachung des zusätzlichen Fehlers . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Simulationsumgebung für modulare Systeme</b>	<b>93</b>
5.1	Ansatz und Terminologie . . . . .	94
5.1.1	Konzept der modularen Simulation . . . . .	94

5.1.2	Terminologie . . . . .	96
5.1.3	Einbettung in vorhandene Software . . . . .	97
5.2	Modellschnittstelle . . . . .	97
5.2.1	Diskussion verschiedener Ansätze . . . . .	97
5.2.2	Abbildung auf Datenstrukturen . . . . .	100
5.2.3	Interpretative Verarbeitung . . . . .	100
5.3	Schnittstellen zu anderen Modulen . . . . .	102
5.3.1	Integratoren . . . . .	102
5.3.2	Gelenke, Puffer und Filter . . . . .	103
5.4	Modul-Import . . . . .	103
5.5	Benutzerschnittstelle . . . . .	104
5.5.1	Eingabesprache . . . . .	104
5.5.2	Einbettung in die Rechnerumgebung . . . . .	105
5.6	Interne Darstellung . . . . .	106
5.6.1	Kopplungen . . . . .	107
5.6.2	Subsysteme und Gesamtbewegungsgleichung . . . . .	107
5.6.3	Partitionierte Integration . . . . .	108
5.6.4	Simulationsablauf . . . . .	109
5.7	Anwendung am Beispiel der Pendelkette . . . . .	111
5.7.1	Darstellung der Subsysteme . . . . .	111
5.7.2	Konfiguration der Simulation . . . . .	116
<b>6</b>	<b>Dynamik von Fahrzeuggespannen</b>	<b>120</b>
6.1	Mechatronisches Folgefahren . . . . .	120
6.2	Beschreibung des dynamischen Systems . . . . .	121
6.2.1	Querdynamik eines Fahrzeugs . . . . .	121
6.2.2	Lenkung . . . . .	125
6.2.3	Andere Komponenten . . . . .	127
6.2.4	Gesamtsystem . . . . .	128
6.3	Simulationsergebnisse . . . . .	131
6.3.1	Verfahrensvergleich . . . . .	131

---

6.3.2 Vergleich mit Versuchsdaten . . . . .	136
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>140</b>
<b>Anhang</b>	<b>144</b>
A.1 Abstrakten Datentypen zur Darstellung von <i>NEWMOS</i> -Modulen . . . . .	144
A.2 <i>NEWMOS</i> -Syntax . . . . .	155
<b>Literatur</b>	<b>159</b>