

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Historische Entwicklung der Ingenieurwissenschaften	2
1.1.1 Entwicklung der Physik	3
1.1.2 Lösungswege zur Vereinheitlichung	5
1.2 Systeme und Modelle	7
1.2.1 Mechatronische Systeme	8
1.2.2 Modelle	10
1.2.3 Theoretische Modellbildung	15
1.2.4 Modellierungsbeispiele	17
1.2.4.1 Mechanisches Beispiel	17
1.2.4.2 Elektrotechnisches Beispiel	20
1.2.5 Simulation von Modellen	24
1.3 Bondgraphen	26
2 Modellbildung mit Bondgraphen	31
2.1 Subsysteme und Multiports	31
2.1.1 Ports und Multiports	31
2.1.2 Generalisierte Variablen	32
2.1.3 Multiports und Bondgraphen	36
2.2 Modelle grundlegender Komponenten	38
2.2.1 1-Port Bauelemente	40
2.2.1.1 1-Port Widerstand (Resistor)	40
2.2.1.2 1-Port Nachgiebigkeiten (Compliance)	42
2.2.1.3 1-Port Trägheit (Inertia, Inductance)	44
2.2.1.4 1-Port Quellen	46
2.2.2 2-Port Bauelemente	47
2.2.2.1 2-Port Transformer	47
2.2.2.2 2-Port Gyrator	49
2.2.3 Multi-Port Elemente	51
2.2.3.1 3-Port Verknüpfungen	51
2.2.3.2 Vereinfachung von Verknüpfungen in Bondgraphen	55
2.2.4 Zeichnen von Bondgraphen einfacher Systeme	58
2.2.4.1 Elektrische Systeme	58
2.2.4.2 Mechanische Systeme	61
2.2.5 Kausalitätszuweisung	65
2.2.5.1 Kausalität von Transformer und Gyrator	67
2.2.5.2 Kausalität von Verknüpfungen	67
2.2.5.3 Kausalität von Speicherelementen: I, C	68
2.2.5.4 Kausalität des R-Elementes	69
2.2.5.5 Kausalitätszuweisung in Bondgraphen	70
2.3 Bondgraphen hydraulischer und elektronischer Systeme	76
2.3.1 1-Port Elemente der Hydraulik	78
2.3.1.1 C-Elemente	78

2.3.1.2 I-Elemente	78
2.3.1.3 R-Elemente	79
2.3.2 2-Port Elemente der Hydraulik	80
2.3.3 Zeichnen von Bondgraphen hydraulischer Systeme	81
2.3.4 Elektronische Systeme	84
3 Herleitung des mathematischen Modells	93
3.1 Standardformen von Systemgleichungen	93
3.2 Ermittlung der Systemgleichungen von Bondgraphen	97
3.2.1 Systemvariablen	98
3.2.2 Beispiel aus der Elektrotechnik	98
3.2.3 Beispiel aus der Mechanik	100
3.2.4 Beispiel aus der Elektromechanik	103
3.2.5 Speicher mit differentieller Kausalität	105
3.3 Algebraische Schleifen	108
3.3.1 Elektrotechnisches Beispiel	109
3.3.2 Mechanisches Beispiel	110
4 Simulationssysteme	115
4.1 Numerische Integration	117
4.2 Blockschaltbild-Editoren	125
4.3 Objektorientierte Simulationssysteme	132
5 Analyse linearer Systeme	139
5.1 Linearisierung nichtlinearer Systeme	139
5.2 Klassifizierung von Systemen nach ihrer Ordnung	143
5.2.1 Systeme 0. Ordnung	145
5.2.2 Systeme 1. Ordnung	146
5.2.3 Systeme 2. Ordnung	149
5.2.3.1 Untersuchung im Zeitbereich	149
5.2.3.2 Untersuchung im Frequenzbereich	158
5.2.4 Systeme höherer Ordnung	166
6 Multiport-Felder und komplexe Strukturen	173
6.1 C-Felder	173
6.1.1 Mechanisches C-Feld	174
6.1.2 Implizites elektrisches C-Feld	177
6.1.3 Sensor mit C-Feld	180
6.2 I-Felder	182
6.3 R-Felder	188
6.4 Multiport -Transformer	191
7 Komponenten mechatronischer Systeme	195
7.1 Mechanische Strukturen	196
7.1.1 Ebene Bewegung starrer Körper	200
7.1.2 Räumliche Bewegung starrer Körper	206
7.1.3 Modellierung von Fahrzeugkomponenten	209

7.1.3.1	Antriebsstrang	209
7.1.3.2	Passives Fahrwerk	212
7.1.3.3	Aktive Federung	219
7.2	Sensoren	223
7.2.1	Ohm'scher Widerstandseffekt	224
7.2.2	Magnetische Effekte	228
7.2.2.1	Eigenschaften magnetischer Felder	228
7.2.2.2	Bondgraphen magnetischer Systeme	231
7.2.2.3	Sensor mit magnetischen Eigenschaften	232
7.2.2.4	Hall Effekt	236
7.2.3	Piezoelektrischer Effekt	240
7.2.3.1	Piezoelement	242
7.2.3.2	Sensoren mit Piezoelementen	244
7.2.3.3	Aktivität von Leistungsbonds	245
7.2.4	Signalanpassung und Filterung	250
7.3	Aktoren	255
7.3.1	Elektrische Aktoren	256
7.3.1.1	Elektromagnet	256
7.3.1.2	Elektromotoren	259
7.3.2	Hydraulische Aktoren	268
8	Mechatronische Systeme	275
8.1	Lageregelkreis einer NC-Maschine	275
8.1.1	Bondgraph elektromechanisches System	276
8.1.2	Unterschiedliches Reibverhalten	278
8.1.3	Gesamtmodell mit nichtlinearen Komponenten	282
8.2	Invertiertes Pendel	286
8.2.1	Ermittlung der Bewegungsgleichungen	287
8.2.2	Ermittlung des Bondgraphen	289
8.2.3	Regelung des invertierten Pendels	290
8.2.3.1	Einfache P-Regelung	292
8.2.3.2	PD- und PID-Regelung	294
8.3	Steer-by-Wire System	295
8.3.1	Variable Übersetzung des Lenkgetriebes	296
8.3.2	Bondgaph des SBW-Systems	297
8.4	Schlussbetrachtung	299
Literaturverzeichnis	303	
Sachwortverzeichnis	305	