

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Historische Entwicklung der Ingenieurwissenschaften	1
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
<b>2</b>	<b>Modellbildung mit Bondgraphen</b>	<b>30</b>
2.1	Subsysteme und Multiports	30
2.1.1	Ports und Multiports	30
2.1.2	Generalisierte Variablen	31
2.1.3	Multiports und Bondgraphen	35
2.2	Modelle grundlegender Komponenten	38
2.2.1	1-Port Bauelemente	39
2.2.1.1	1-Port Widerstand (Resistor)	39
2.2.1.2	1-Port Nachgiebigkeiten (Compliance)	41
2.2.1.3	1-Port Trägheit (Inertia, Inductance)	43
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	52
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	59
2.2.4.2	Mechanische Systeme	62
2.2.5	Kausalitätszuweisung	66
2.2.5.1	Kausalität von Transformer und Gyrator	67
2.2.5.2	Kausalität von Verknüpfungen	68
2.2.5.3	Kausalität von Speicherelementen: I, C	69
2.2.5.4	Kausalität des R-Elementes	70
2.2.5.5	Kausalitätszuweisung in Bondgraphen	70
2.3	Bondgraphen hydraulischer und elektronischer Systeme	77
2.3.1	1-Port Elemente der Hydraulik	79
2.3.1.1	C-Elemente	79

---

2.3.1.2	I-Elemente	80
2.3.1.3	R-Elemente	80
2.3.2	2-Port Elemente der Hydraulik	82
2.3.3	Zeichnen von Bondgraphen hydraulischer Systeme	83
2.3.4	Elektronische Systeme	85
<b>3</b>	<b>Herleitung des mathematischen Modells</b>	<b>95</b>
3.1	Standardformen von Systemgleichungen	95
3.2	Ermittlung der Systemgleichungen von Bondgraphen	100
3.2.1	Systemvariablen	100
3.2.2	Beispiel aus der Elektrotechnik	101
3.2.3	Beispiel aus der Mechanik	103
3.2.4	Beispiel aus der Elektromechanik	106
3.2.5	Speicher mit differentieller Kausalität	108
3.3	Algebraische Schleifen	111
3.3.1	Elektrotechnisches Beispiel	112
3.3.2	Mechanisches Beispiel	114
<b>4</b>	<b>Simulationssysteme</b>	<b>117</b>
4.1	Numerische Integration	119
4.2	Blockschaltbild-Editoren	128
4.3	Objektorientierte Simulationssysteme	134
<b>5</b>	<b>Analyse linearer Systeme</b>	<b>142</b>
5.1	Linearisierung nichtlinearer Systeme	142
5.2	Klassifizierung von Systemen nach ihrer Ordnung	147
5.2.1	Systeme 0. Ordnung	148
5.2.2	Systeme 1. Ordnung	149
5.2.3	Systeme 2. Ordnung	152
5.2.3.1	Untersuchung im Zeitbereich	152
5.2.3.2	Untersuchung im Frequenzbereich	162
5.2.4	Systeme höherer Ordnung	171
<b>6</b>	<b>Multiport-Felder und komplexe Strukturen</b>	<b>176</b>
6.1	C-Felder	176
6.1.1	Mechanisches C-Feld	177
6.1.2	Implizites elektrisches C-Feld	180
6.1.3	Sensor mit C-Feld	183
6.2	I-Felder	186
6.3	R-Felder	192
6.4	Multiport Transformer	194
<b>7</b>	<b>Komponenten mechatronischer Systeme</b>	<b>199</b>
7.1	Mechanische Strukturen	200
7.1.1	Ebene Bewegung starrer Körper	203

---

7.1.2	Räumliche Bewegung starrer Körper	210
7.1.3	Modellierung von Fahrzeugkomponenten	213
7.1.3.1	Antriebsstrang	213
7.1.3.2	Passives Fahrwerk	217
7.1.3.3	Aktive Federung	223
7.2	Sensoren	227
7.2.1	Ohm'scher Widerstandseffekt	228
7.2.2	Magnetische Effekte	232
7.2.2.1	Eigenschaften magnetischer Felder	232
7.2.2.2	Bondgraphen magnetischer Systeme	235
7.2.2.3	Sensor mit magnetischen Eigenschaften	237
7.2.2.4	Hall Effekt	241
7.2.3	Piezoelektrischer Effekt	245
7.2.3.1	Piezoelement	247
7.2.3.2	Sensoren mit Piezoelementen	249
7.2.3.3	Aktivität von Leistungsbonds	250
7.2.4	Signalanpassung und Filterung	255
7.3	Aktoren	260
7.3.1	Elektrische Aktoren	262
7.3.1.1	Elektromagnet	262
7.3.1.2	Elektromotoren	264
7.3.2	Hydraulische Aktoren	274
<b>8</b>	<b>Mechatronische Systeme</b>	<b>281</b>
8.1	Lageregelkreis einer NC-Maschine	281
8.1.1	Bondgraph elektromechanisches System	282
8.1.2	Unterschiedliches Reibverhalten	283
8.1.3	Gesamtmodell mit nichtlinearen Komponenten	288
8.2	Invertiertes Pendel	292
8.2.1	Ermittlung der Bewegungsgleichungen	293
8.2.2	Ermittlung des Bondgraphen	295
8.2.3	Regelung des invertierten Pendels	297
8.2.3.1	Einfache P-Regelung	299
8.2.3.2	PD- und PID-Regelung	300
8.3	Steer-by-Wire System	302
8.3.1	Variable Übersetzung des Lenkgetriebes	303
8.3.2	Bondgraph des SBW-Systems	304
<b>9</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>306</b>
<b>10</b>	<b>Lösungen zu den Aufgaben</b>	<b>309</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>338</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>340</b>