

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlegendes	1
1.1. Was ist ein System?	1
1.2. Was ist ein Experiment?	3
1.3. Modellbildung: Warum?	4
1.4. Wege der Modellbildung	5
1.4.1. Physikalische Modellbildung: White-Box Modell	5
1.4.2. Systemidentifikation: Black-Box Modell	7
1.4.3. Semi-empirische Modelle	7
1.4.4. Überblick	7
1.5. Modelleigenschaften	8
1.5.1. Statische und dynamische Modelle	8
1.5.2. Kontinuierliche und diskrete Modelle	9
1.5.3. Modelle mit Unstetigkeiten	10
1.5.4. Modelle mit konzentrierten und verteilten Parametern	11
1.5.5. Linearisierung nichtlinearer Modelle	11
1.5.6. Zeitvariante und zeitinvariante Modelle	18
1.5.7. Deterministische und stochastische Modelle	18
1.5.8. Stabile, instabile und grenzstabile Modelle	19
1.5.9. Steife Modelle	20
1.5.10. Modelleigenschaften die im Buch behandelt werden	20
1.6. Detaillierungsgrad von Modellen	21
1.7. Modellparametrierung	22
1.7.1. Parameterextraktion aus dem Herstellerdatenblatt	23
1.7.2. Berechnen von Parametern	24
1.7.3. Messtechnische Ermittlung von Parametern	24
1.7.4. Parameterschätzung	25
1.7.5. Parametervariation	26
1.7.6. Finite Elemente Methode zur Parametergewinnung	27
1.8. Simulation dynamischer Systeme	28
2. Einführung in die Zustandsraumdarstellung	33
2.1. Zustandsvariablen	34
2.2. Ein einführendes Beispiel	35
2.3. Zustandsraumdarstellung	39
2.3.1. Eingrößensysteme (SISO-Systeme)	40

2.3.2.	Mehrgrößensysteme (MIMO-Systeme)	41
2.3.3.	Interpretation der Zustandsgleichung	43
2.3.4.	Interpretation der Ausgangsgleichung	45
2.3.5.	Grafische Interpretation der Zustandsraumdarstellung	45
2.4.	Schnittstelle zur Simulation	46
2.5.	Analytische Lösung der Zustandsgleichung	47
2.5.1.	Autonome skalare Systeme (Homogene Lösung)	47
2.5.2.	Inhomogene skalare Lösung	51
2.5.3.	Inhomogene Lösung	52
3.	Modellbildung: Ein iterativer Prozess	55
3.1.	Vorgehensweise bei der Modellerstellung	55
3.1.1.	Abstraktion des realen Systems	56
3.1.2.	Gleichungssystem erstellen	57
3.1.3.	Gleichungssystem sortieren	59
3.1.4.	Implementierung des Gleichungssystems	61
3.1.5.	Numerische Integration: Simulation	67
3.1.6.	Verifikation	70
3.1.7.	Modifikation	71
3.2.	Methoden zur Modellbildung mechatronischer Systeme	71
3.2.1.	Signalflussorientierte (kausale) Modellbildung: Blockschaltbilder	72
3.2.2.	Bondgraphen	73
3.2.3.	Objektorientierte Modellbildung	73
4.	Signalflussorientierte Modellbildung: Blockschaltbilder	75
4.1.	Die Entwicklung der kausalen Modellierung	76
4.1.1.	Analoge Simulation	76
4.1.2.	Digitale Simulation	82
4.2.	Modellbasierter Systementwurf eines Feder-Masse-Dämpfer Systems	85
4.2.1.	Initialer Modellentwurf	86
4.2.2.	Erste Modifikation des bestehenden Blockschaltbilds	93
4.2.3.	Erste Modifikation durch Erstellen eines neuen Blockschaltbilds	97
4.2.4.	Zweite Modifikation des bestehenden Blockschaltbilds	101
4.2.5.	Zweite Modifikation durch Erstellen eines neuen Blockschaltbilds	103
4.2.6.	Dritte Modifikation des bestehenden Blockschaltbilds	108
4.2.7.	Dritte Modifikation durch Erstellen eines neuen Blockschaltbilds	109
4.2.8.	Diskussion	110
4.2.9.	Ausblick	111

5. Die Theorie der Bondgraphen	113
5.1. Grundlegende Zusammenhänge physikalischer Systeme	114
5.1.1. Elektrische Systeme	115
5.1.2. Mechanisch-translatorische Systeme	117
5.1.3. Mechanisch-rotatorische Systeme	118
5.1.4. Fluss-Systeme (Hydraulische Systeme)	119
5.1.5. Thermodynamische Systeme	123
5.1.6. Entwickeln allgemeingültiger Gleichungen	124
5.2. Akausale Bondgraphen	129
5.2.1. Verlustbehaftete Elemente (R-Element)	131
5.2.2. Energiespeichernde Elemente	132
5.2.3. Aktive Elemente (Quellen)	135
5.2.4. Verzweigungen	135
5.2.5. Vereinfachungen	138
5.2.6. Beispiele	138
5.3. Komponentenbasierter Modellierungsansatz	146
5.3.1. Elektrische Systeme	147
5.3.2. Intensive und extensive Variablen	154
5.3.3. Mechanische Systeme	155
5.4. Kausale Bondgraphen – Kausale Analyse	160
5.4.1. Kausalisierung der Quellen	164
5.4.2. Kausalisierung der passiven Elemente	164
5.4.3. Kausalisierung der Verzweigungen	167
5.4.4. Anleitung zur Kausalisierung von Bondgraphen	169
5.4.5. Beispiel: Kausalisierung des Bondgraphen einer elektri- schen Schaltung	170
5.4.6. Aufstellen der Gleichungen anhand des Bondgraphen	172
5.4.7. Blockschaltbild	175
5.5. Weitere Bondgraph-Elemente: Energieumwandlung	175
5.5.1. Widerstandsquellen	176
5.5.2. Transformatoren	177
5.5.3. Gyratoren	179
5.5.4. Beispiel: Permanenterregter Gleichstrommotor	180
5.5.5. Beispiel: Mechanisches System	184
5.5.6. Beispiele zu hydraulisch-mechanischen Systemen	188
5.6. Kausale Pfade	196
5.6.1. Beispiel: Permanenterregter Gleichstrommotor	196
5.7. Das Dualitätsprinzip – Duale Bondgraphen	200
5.8. Kausalitätskonflikte in Bondgraphen	201
5.8.1. Einblicke in das Modell mittels kausaler Analyse	201
5.8.2. Algebraische Schleifen in Bondgraphen	202
5.8.3. Strukturelle Singularitäten	209

5.9. Die vier Grundvariablen der Bondgraphen-Modellierung	223
5.10. Sensoren und modulierte Elemente	225
5.10.1. Sensoren	226
5.10.2. Modulierte Elemente zur Energieumwandlung	227
5.10.3. Modulierte Quellen	229
5.10.4. Beispiele	229
5.11. Modellbasierter Systementwurf	234
5.11.1. Initialer Systementwurf	235
5.11.2. Erste Modifikation	237
5.11.3. Zweite Modifikation	240
5.11.4. Dritte Modifikation	242
5.12. Nichtlineare Bondgraphen am Beispiel der Gleichstrom-Neben- schlussmaschine	246
5.12.1. Erstellung des Bondgraphen	247
5.12.2. Aufstellen der Zustandsgleichungen	249
5.12.3. Linearisierung	250
5.13. Irreversible Thermodynamik	252
5.13.1. Wärmeleitung (Konduktion)	253
5.13.2. Wärmespeicherung	255
5.13.3. Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Widerstands	257
5.13.4. Beispiel: Thermisches Modell einer permanenterregten Gleichstrommaschine	258
5.14. Zweidimensionale mechanische Systeme	261
5.14.1. Das mathematische Pendel	263
5.14.2. Das physikalische Pendel	264
5.14.3. Bondgraph des Pendels	265
5.14.4. Beispiel: Verladebrücke	269
5.14.5. Beispiel: Doppelpendel	276
5.14.6. Resümee	278
6. Einführung in die objektorientierte Modellierung	281
6.1. Verfügbare Sprachen	281
6.1.1. Modelica	282
6.1.2. Simscape	284
6.1.3. VHDL-AMS	284
6.1.4. Simscape, VHDL-AMS und Modelica	287
6.1.5. Modelica und Dymola	288
6.2. Akausale Modellierung	289
6.2.1. Einführung	289
6.2.2. Initialer Entwurf des Feder-Masse-Dämpfer Systems in Modelica	291
6.2.3. Erste Modifikation des Systems	294
6.2.4. Zweite Modifikation des Systems	295

6.2.5.	Dritte Modifikation des Systems	296
6.2.6.	Diskussion	297
6.3.	Komponentenbasierte Modellierung	298
6.3.1.	Voraussetzungen	299
6.3.2.	Erstellung von komponentenbasierten Modellen	307
6.3.3.	Gruppieren von komponentenbasierten Modellen in Packa- ges	314
6.3.4.	Initialer Entwurf des Feder-Masse-Dämpfer Systems mit- tels Komponenten	316
6.3.5.	Erste Modifikation des Systems	318
6.3.6.	Zweite Modifikation des Systems	319
6.3.7.	Dritte Modifikation des Systems	319
6.3.8.	Diskussion	320
6.4.	Objektorientierung in der Modellbildung	321
6.4.1.	Klassen, Objekte und Schnittstellen	322
6.4.2.	Annotations	326
6.4.3.	Attribute von Variablen	330
6.4.4.	Abstraktion - Abstraction	335
6.4.5.	Komposition - Composition	337
6.4.6.	Hierarchische Modellierung	338
6.4.7.	Vererbung - Inheritance	343
6.4.8.	Austauschbarkeit - Replaceable/Redeclare	348
6.4.9.	Bedienbarkeit über Austauschbarkeit	353
6.4.10.	Entwurf und Modifikation des Feder-Masse-Dämpfer Sys- tems über Objekte	370
6.4.11.	Objektorientierte Modellierung und Bondgraphen	370
6.4.12.	Von objektorientierten Modellen zu einem Simulationser- gebnis	374
6.5.	Die symbolische Vorverarbeitung	379
6.5.1.	Symbolische Vorverarbeitung: „Index 0“ Systeme	381
6.5.2.	Algebraische Schleifen: „Index 1“ Systeme	388
6.5.3.	Strukturelle Singularitäten: „höhere Index“ Systeme	394
6.5.4.	Eine Alternative: Direkte Lösung von impliziten Glei- chungssystemen	399
6.5.5.	Resümee	400
7.	Modelica	403
7.1.	Modelica Funktionalität	403
7.1.1.	Vektoren, Matrizen und Schleifen	404
7.1.2.	Warnungen und Fehler	410
7.1.3.	Beschreibung von Diskontinuitäten	413
7.1.4.	Initialisierung	423
7.1.5.	Prozeduraler Code	428

7.1.6.	Dokumentation von Klassen	434
7.1.7.	Dymola Funktionalitäten	435
7.2.	Fehlersuche und Performance	440
7.2.1.	Häufige Fehler	440
7.2.2.	Fehlersuche in Modellen	454
7.2.3.	Modelleigenschaften	456
7.2.4.	Profiling	459
7.2.5.	Performancesteigerung	464
7.3.	Die Modelica Standard Library	469
7.3.1.	Kausale Blocks	470
7.3.2.	Zustandsgraphen	473
7.3.3.	Interfaces mit einzelnen Variablenpaaren	475
7.3.4.	Interfaces mit mehreren Variablenpaaren	480
7.3.5.	Fortgeschrittene Schnittstellen	482
7.3.6.	Komponenten die Domänen überbrücken	488
7.3.7.	Erweitern der MSL	488
7.3.8.	Andere Libraries	491
7.4.	Das Functional Mockup Interface	491
8.	Simulation und numerische Integrationsverfahren	493
8.1.	Einleitung und Allgemeines	493
8.2.	Grundlegende Integrationsverfahren	502
8.2.1.	Vorwärts-Euler oder explizites Euler-Verfahren	502
8.2.2.	Erste Stabilitätsbetrachtungen	508
8.2.3.	Rückwärts-Euler oder implizites Euler-Verfahren	511
8.3.	Runge-Kutta-Verfahren	527
8.3.1.	Heun Algorithmus oder Runge-Kutta 2. Ordnung	530
8.3.2.	Allgemeine Herleitung von Runge-Kutta-Verfahren	530
8.3.3.	Explizite Mittelpunkregel	532
8.3.4.	Runge-Kutta 4. Ordnung - RK4	532
8.3.5.	Runge-Kutta-Verfahren höherer Ordnung	536
8.4.	Implizite Runge-Kutta-Verfahren	537
8.4.1.	Das Butcher Tableau	537
8.4.2.	Radau Algorithmen	539
8.4.3.	Lobatto Algorithmen	540
8.4.4.	Sonderfälle von impliziten Runge-Kutta-Verfahren	540
8.5.	Stabilität numerischer Lösungsverfahren	541
8.5.1.	Der Weg zur Stabilitätsdomäne	541
8.5.2.	Algorithmus zur Bestimmung der Stabilitätsdomäne	546
8.5.3.	Genauigkeit	549
8.5.4.	Steife Systeme	552
8.5.5.	Ungedämpfte Systeme	554

8.6. Mehrschrittverfahren	555
8.6.1. Newton-Gregory Polynome	556
8.6.2. Adams-Bashforth (AB)	565
8.6.3. Backward-Difference Formulae (BDF)	569
8.7. Die Annäherung an die Realität	572
8.7.1. Fehlerquellen	572
8.7.2. Numerikbasierte Fehler	573
8.7.3. Allgemeine Fehlerbegriffe	575
8.7.4. Resümee	576
8.8. Erweiterungen numerischer Integrationsverfahren	577
8.8.1. Schrittweitensteuerung	578
8.8.2. Anpassung der Ordnung	582
8.8.3. Das Startup Problem	583
8.8.4. Dense Output	584
8.8.5. Unstetigkeiten	585
8.9. Faustregeln bei der Wahl von Solver und Schrittweite	593
8.10. Interpretation von Solverausgaben	595
8.11. Echtzeitsimulation	600
8.11.1. Solvertypen	601
8.11.2. Events	602
8.11.3. Fortgeschrittene Techniken	603
8.12. Alternative Lösungsverfahren	605
8.12.1. Inline Integration	605
8.12.2. Quantized State Simulation	606
Anhang	607
A. Systeme linearer Differentialgleichungen 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten	607
B. Generierter Code des Feder-Masse-Dämpfer Modells	611
C. Lineare Analyse des Feder-Masse-Dämpfer Modells	615
Literaturverzeichnis	619
Sachwortverzeichnis	625