

Inhaltsverzeichnis

1	Systeme, Modelle, Modellbildung, Modellverwendung: Ein Überblick.....	11
1-1	Aufgaben der Modellbildung und Simulation.....	11
1-1.1	Warum Modellbildung und Simulation?.....	11
1-1.2	Warum interessiert das Verhalten dynamischer Systeme?.....	12
1-1.3	Anwendungen dynamischer Simulationsmodelle.....	13
1-1.4	Modellbildung und Simulation zur Untersuchung von Entwicklungspfaden.....	14
1-2	Grundsätzliches zu Systemen.....	16
1-2.1	Was ist ein System? Systemidentität, Systemintegrität, Systemzweck.....	16
1-2.2	Dynamische Systeme, Systemverhalten, Betrachtungszeitraum.....	17
1-2.3	Systemgrenzen und Systemumwelt, Einwirkungen und Auswirkungen.....	17
1-2.4	Wie macht sich ein System bemerkbar? Verhalten und Zustand.....	18
1-2.5	Ein System hat 'Gedächtnis': Zustandsgrößen sind Speichergrößen.....	19
1-2.6	Die Wirkungsstruktur bestimmt Zustandsänderungen.....	20
1-2.7	Intern erzeugte Systemdynamik: Die Rolle von Rückkopplungen.....	20
1-2.8	Systemverhalten als Mischung aus Eigendynamik und Reaktion auf Umwelt.....	21
1-2.9	Unabhängige Größen, die Verhalten bestimmen: System- und Umweltparameter.....	21
1-2.10	Systeme als Komponenten von Systemen: Teilsysteme und Modularität.....	22
1-2.11	Übergeordnete Systeme: Hierarchien in komplexen Systemen.....	23
1-2.12	Systemerhaltung und -entfaltung: Regelung, Anpassung, Evolution.....	23
1-2.13	Akteure in ihrer Umwelt: Verhaltensorientierung.....	25
1-2.14	Systeme in der Systemumwelt anderer Systeme, Interaktion zwischen Systemen.....	26
1-2.15	Unberechenbarkeit auch bei determinierten Systemen.....	26
1-3	Grundsätzliches zu Modellen.....	27
1-3.1	Modelle für Verhaltensaussagen: Vorteile und Nachteile.....	27
1-3.2	Das Modell als beschränkt gültige Abbildung.....	27
1-3.3	Welches Modell für welche Fragestellung? Problemstellung und Modellzweck.....	28
1-3.4	Der Abbildungszweck (Modellzweck) bestimmt die Abbildung.....	28
1-3.5	Die Alternative: Verhalten nachahmen oder System nachbilden.....	29
1-3.6	Verhaltensbeschreibung zur Verhaltensnachahmung.....	29
1-3.7	Systembeschreibung zur Verhaltensklärung.....	30
1-3.8	Verhaltensbeschreibende Komponenten in verhaltenserklärenden Modellen.....	31
1-3.9	Anderer Modellansatz, anderer Datenbedarf.....	32
1-3.10	Strukturinformation reduziert den Datenbedarf.....	33
1-3.11	Zukunftsorientierung erfordert Systemverständnis.....	34
1-3.12	Zuverlässige Verhaltensaussagen durch strukturtreue Kompaktmodelle.....	35
1-3.13	Leitwertorientierung zur zuverlässigen Verhaltensabschätzung.....	35
1-3.14	Wo ist generell strukturtreue Systemmodellierung angebracht?.....	36
1-3.15	Modellgültigkeit: Wann kann das Modell das Original vertreten?.....	36
1-3.16	Wissenschaftliche Arbeitsweise und Modellbildung.....	36
1-3.17	Spektrum dynamischer Systeme und Modelle.....	37

1-4	Modellentwicklung, Simulation, Verhaltensanalyse und Systemänderung	40
1-4.1	Entwicklung des Modellkonzepts.....	40
1-4.2	Entwicklung des Simulationsmodells	41
1-4.3	Simulation des Systemverhaltens	42
1-4.4	Analyse des Modellsystems.....	44
1-4.5	Verhaltensänderung durch Systemänderung	45
1-4.6	Generische Strukturen; Systemzoo.....	46
2	Vom Wortmodell zum Wirkungsgraph: Zusammenhänge, Struktur, Rückkopplungen	47
2-0	Überblick.....	47
2-1	Erstellung des Wirkungsgraphen	48
2-1.1	Arbeitsbeispiel: 'Weltmodell'.....	49
2-1.2	Zweck des 'Weltmodells'.....	49
2-1.3	Das Wortmodell.....	49
2-1.4	Die Modellgrößen.....	50
2-1.5	Wirkungsbeziehungen	50
2-1.6	Logische Deduktion	51
2-1.7	Der Wirkungsgraph	54
2-2	Qualitative Analyse des Wirkungsgraphen.....	58
2-2.1	Aussagen mit Hilfe des Wirkungsgraphen	58
2-2.2	Rückkopplungen	59
2-2.3	Wirkungsmatrix und Quantifizierung.....	60
2-2.4	Papiercomputer von Vester	63
2-3	Fortpflanzung von Störungen im Wirkungsgraphen.....	64
2-3.1	Rückkopplungsprozesse und Stabilität	64
2-3.2	Pulsprozeß im Weltmodell	69
2-3.3	Kontinuierliche Zustandsveränderung im Weltmodell.....	72
2-3.4	Bedeutung der Verhaltensdynamik des Wirkungsgraphen.....	75
2-4	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse.....	76
3	Vom Wirkungsgraph zum mathematischen Modell: Systemgrößen, Funktionen, Prozesse, Quantifizierung.....	77
3-0	Überblick.....	77
3-1	Differenzierung eines Modellkonzepts: Beispiel Weltmodell	78
3-1.1	Differenzierung der Systemgrößen des Weltmodells	78
3-1.2	Teilmodell Bevölkerungsentwicklung.....	80
3-1.3	Teilmodell Umweltbelastung	84
3-1.4	Teilmodell Entwicklung des spezifischen Konsums.....	86
3-1.5	Verkopplung der Teilmodelle.....	87
3-1.6	Simulationen mit einem einfachen Simulationsprogramm	90
3-1.7	Gültigkeit der Modellformulierung	92

3-2	Systemelemente und Elementarsysteme	93
3-2.1	Differenzierung der Systemelemente.....	93
3-2.2	Elementares Blockdiagramm eines dynamischen Systems	97
3-2.3	Systemzustand und Zustandsgrößen	100
3-2.4	Einige elementare Systeme und ihr Verhalten.....	105
3-2.5	Eigenschaften und Verhalten von Zustandsgrößen.....	110
3-3	Modellentwicklung und dimensionale Analyse	113
3-3.1	Die Bedingung dimensionaler Stimmigkeit als Hilfe bei der Modellentwicklung	113
3-3.2	Modellentwicklung für das Kreispendel: Modellzweck und Wortmodell.....	116
3-3.3	Entwicklung des Wirkungsgraphen für das Kreispendel	118
3-3.4	Größen, Dimensionen, Zusammenhänge beim Kreispendel.....	119
3-3.5	Modellgleichungen und Simulationsdiagramm für das Kreispendel.....	123
3-3.6	Kondensation des mathematischen Modells des Kreispendels.....	125
3-3.7	Modellentwicklung und dimensionale Analyse im allgemeinen Fall.....	126
3-3.8	Modellentwicklung zur Dynamik des Fischfangs: Wortmodell und Wirkungsgraph... 127	
3-3.9	Größen, Dimensionen, Zusammenhänge bei der Fischfangdynamik	130
3-3.10	Modellgleichungen und Simulationsdiagramm zur Fischfangdynamik.....	131
3-3.11	Kondensation des Fischfangmodells zur generischen Räuber-Beute-Struktur	133
3-3.12	Zustandsgleichungen mit normierten Zustandsgrößen	134
3-3.13	Dimensionslose Zustandsgrößen, normierte Zustände und normierte Zeit	135
3-4	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse.....	136
4	Vom mathematischen Modell zur Simulation: Programmierung, Parameter, Zustandspfade und Sensitivität.....	139
4-0	Einführung und Überblick.....	139
4-1	Simulationsumgebung für eine Standard-Programmiersprache: SIMPAS	142
4-1.1	Überblick.....	142
4-1.2	Verwendung kompilierter SIMPAS-Simulationsprogramme	142
4-1.3	Erstellung eines SIMPAS-Simulationsprogramms bei vorhandenem Modell	143
4-1.4	Interaktives Arbeiten mit SIMPAS	143
4-1.5	Erstellung einer SIMPAS-Modelleinheit.....	144
4-1.6	Tabellenfunktion TableFunction.....	144
4-1.7	Verzögerungsfunktionen Delay1 und Delay3.....	146
4-1.8	Testfunktionen Pulse, Step, Ramp, Sin.....	146
4-1.9	Ereignisse Event.....	148
4-1.10	Numerische Integration	148
4-1.11	Verwendung von SIMPAS-Funktionen	148
4-2	Simulation der Kreispendeldynamik mit SIMPAS	152
4-2.1	Aufbau des SIMPAS-Modells aus dem Simulationsdiagramm	152
4-2.2	Aufbau des lauffähigen Simulationsprogramms.....	154
4-2.3	Standardlauf und interaktive Benutzung.....	156
4-2.4	Parameteränderung.....	161
4-2.5	Parameterempfindlichkeit.....	163
4-2.6	Globale Verhaltensuntersuchung.....	165
4-2.7	Zusammenfassung der Beobachtungen am Kreispendelmodell.....	168

4-3	Simulation der Fischfangdynamik mit SIMPAS	169
4-3.1	Aufbau des SIMPAS-Modells aus dem Simulationsdiagramm	169
4-3.2	Aufbau des lauffähigen Simulationsprogramms.....	171
4-3.3	Standardlauf des Fischfang-Modells	171
4-3.4	Verhalten bei Parameteränderungen.....	174
4-3.5	Modifizierung des Fischfang-Modells für dichte-unabhängige Fangmenge	177
4-3.6	Simulationsergebnisse für dichte-unabhängigen Fischfang.....	178
4-3.7	Gleichgewichtspunkte des Fischfangmodells.....	180
4-3.8	Zusammenfassung der Beobachtungen am Fischfangmodell	182
4-4	Simulationsumgebung für graphisch-interaktive Bearbeitung: STELLA.....	184
4-4.1	Übersicht über den STELLA-Ansatz.....	184
4-4.2	Simulation der Kreispendedynamik mit STELLA	188
4-4.3	Simulation der Fischfangdynamik mit STELLA.....	193
4-5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	194
5	Von der Systemsimulation zur Systemveränderung: Verhaltensbewertung, Szenarien, Optimierung, Regelung	197
5-0	Einführung und Überblick.....	197
5-1	Kriterien und Bewertung des Systemverhaltens	198
5-1.1	Orientoren, Indikatoren, Kriterien.....	198
5-1.2	Systemverhalten und Orientierungstheorie	201
5-1.3	Existenz in der normalen Umwelt	203
5-1.4	Wirksamkeit bei der Beschaffung knapper Ressourcen	204
5-1.5	Handlungsfreiheit im Umgang mit Umweltvielfalt.....	205
5-1.6	Sicherheit vor Umweltschwankungen	205
5-1.7	Wandlungsfähigkeit zur Anpassung an veränderte Umwelt	206
5-1.8	Berücksichtigung anderer Systeme in der Systemumwelt	207
5-1.9	Leitwerte, Orientierung und Beurteilung von Systemverhalten.....	208
5-2	Szenarien und Pfadanalyse.....	210
5-2.1	Überblick	210
5-2.2	Systemgrößen und Simulationsmodell der Miniwelt	211
5-2.3	Kriterien und Indikatoren der Systementwicklung.....	215
5-2.4	Szenariientwürfe und Simulationsläufe	220
5-2.5	Vergleichende Bewertung der Simulationsläufe	222
5-3	Optimierung.....	225
5-3.1	Überblick	225
5-3.2	Beschränkungen und Gütekriterien für die Fischfang-Optimierung.....	226
5-3.3	Ergänzungen des Simulationsmodells für Optimierungsuntersuchungen	228
5-3.4	Suche nach optimalem Investitionsanteil bei Fischfang ohne Ortungstechnik.....	229
5-3.5	Suche nach optimalem Investitionsanteil bei Fischfang mit Ortungstechnik	232
5-3.6	Optimierung über einen Zeitpfad.....	233

5-4	Stabilisierung und Regelung	234
5-4.1	Überblick	234
5-4.2	Stabilisierung durch geänderte Systemstruktur: Systemgleichungen	235
5-4.3	Simulationsmodell für das stabilisierte Pendelsystem	238
5-4.4	Simulationsläufe und Suche nach 'guten' Regelparametern	243
5-5	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse.....	246
6	Systemzoo: Simulationsmodelle elementarer dynamischer Systeme.....	249
6-0	Überblick und Bearbeitungshinweise	249
6-1	Dynamische Systeme mit einer Zustandsgröße.....	253
M 101	Einfache Integration	254
M 102	Exponentielles Wachstum und Zerfall	256
M 103	Exponentielle Verzögerung	258
M 104	Zeitabhängiges exponentielles Wachstum	260
M 105	Geburt und Tod: Einfache Bevölkerungsdynamik	262
M 106	Überlastung eines Speichers	264
M 107	Logistisches Wachstum bei konstanter Ernte	266
M 108	Logistisches Wachstum mit bestandsabhängiger Ernte	268
M 109	Dichte-abhängiges Wachstum (Michaelis-Menten).....	270
M 110	Tägliche Photoproduktion eines Pflanzenbestands.....	272
6-2	Dynamische Systeme mit zwei Zustandsgrößen.....	275
M 201	Zweifache Integration und exponentielle Verzögerung	276
M 202	Übergang zwischen zwei Zuständen	278
M 203	Linearer Schwinger zweiter Ordnung.....	280
M 204	Eskalation ("Teufelskreis", "Spirale").....	282
M 205	Abhängigkeit	284
M 206	Räuber-Beute-System ohne Kapazitätsbegrenzung	286
M 207	Räuber-Beute-System mit Kapazitätsgrenze.....	288
M 208	Konkurrenz.....	290
M 209	Tourismus und Umwelt	292
M 210	Übernutzung und Zusammenbruch	294
M 211	Waldwachstum	296
M 212	Entdeckung und Ausbeutung von Rohstoffen.....	298
M 213	Tragödie der Allmende	300
M 214	Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen.....	302
M 215	Gestörtes Fließgleichgewicht: CO ₂ -Dynamik	304
M 216	Lagerbestand, Verkauf, Bestellung	306
M 217	Produktionszyklus	308
M 218	Rotationspendel.....	310
M 219	Schwinger mit Grenzyklus (van der Pol).....	312
M 220	Bistabiler Schwinger.....	314
M 221	Chaotischer bistabiler Schwinger (Duffing)	316

6-3	Dynamische Systeme mit drei bis vier Zustandsgrößen	319
M 301	Dreifache Integration und exponentielle Verzögerung dritter Ordnung.....	320
M 302	Bevölkerungsdynamik mit drei Generationen.....	322
M 303	Linearer Schwinger dritter Ordnung.....	324
M 304	Miniwelt: Bevölkerung, Konsum, Umweltbelastung.....	326
M 305	Räuberpopulation mit zwei Beutepopulationen.....	328
M 306	Beutepopulation mit zwei Räuberpopulationen.....	330
M 307	Vögel, Insekten, Wald und Grasland.....	332
M 308	Nährstoffkreislauf und Pflanzenkonkurrenz.....	334
M 309	Chaotischer Attraktor (Rössler).....	336
M 310	Wärme, Wetter und Chaos (Lorenz-System).....	338
M 311	Verkoppelte Dynamos und Chaos.....	340
M 312	Balanzieren eines stehenden Pendels.....	342
7	Von der Systemdarstellung zum Systemverständnis: Grundlagen mathematischer Systemanalyse	345
7-0	Überblick	345
7-1	Zustandsgleichungen dynamischer Systeme	346
7-1.1	Systembegriffe.....	346
7-1.2	Systemgrößen als Vektoren.....	346
7-1.3	Allgemeine Zustands- und Verhaltensgleichungen.....	347
7-1.4	Allgemeines Systemdiagramm für dynamische Systeme.....	347
7-1.5	Zustandsberechnung.....	348
7-1.6	Numerische Integration der Zustandsgleichung.....	348
7-1.7	Umformung in Zustandsgleichungen 1. Ordnung.....	349
7-1.8	Umformung einer Differentialgleichung n-ter Ordnung.....	349
7-1.9	Umformung einer Differenzgleichung n-ter Ordnung.....	350
7-1.10	Zustandsgleichung und Systemdynamik.....	351
7-1.11	Linearisierung der Zustandsgleichung; lineare Approximation.....	351
7-1.12	Störungsansatz.....	352
7-1.13	Approximation durch Taylor-Reihe.....	353
7-1.14	Linearisierung der Zustandsgleichung; Jacobi-Matrix.....	354
7-1.15	Gleichgewichtspunkte.....	356
7-1.16	Gleichgewichtspunkte bei nichtlinearen Systemen.....	356
7-1.17	Gleichgewichtspunkte kontinuierlicher linearer Systeme.....	357
7-1.18	Gleichgewichtspunkte diskreter linearer Systeme.....	357
7-2	Matrizenoperationen für lineare dynamische Systeme	358
7-2.1	Operationen mit Matrizen und Vektoren.....	358
7-2.2	Eigenwerte, Eigenvektoren und charakteristische Gleichung.....	360
7-2.3	Basistransformation.....	361
7-3	Verhalten und Stabilität linearer Systeme bei freier Bewegung	362
7-3.1	Form der allgemeinen Lösung der Zustandsgleichung.....	362
7-3.2	Lineare dynamische Systeme.....	362
7-3.3	Lösung des homogenen zeitinvarianten diskreten Systems.....	363
7-3.4	Lösung mit der diagonalen Eigenwertmatrix.....	363
7-3.5	Lösung des homogenen zeitinvarianten kontinuierlichen Systems.....	363
7-3.6	Lösung mit dem diagonalem Matrixexponential.....	364

7-3.7	Stabilitätsbetrachtungen für lineare Systeme	365
7-3.8	Allgemeine Form, Standardform und Normalform: Umrechnung.....	365
7-3.9	Verhaltensäquivalente Systeme: Beispiel.....	367
7-3.10	Verhaltensweisen linearer Systeme.....	369
7-3.11	Kontinuierliche Systeme.....	369
7-3.12	Diskrete Systeme	370
7-3.13	Verhalten und Stabilität eines zweidimensionalen linearen Systems.....	371
7-3.14	Stabilitätsprüfung für lineare Systeme.....	372
7-3.15	Anmerkungen zum Verhalten linearer kontinuierlicher Systeme	373
7-4	Verhalten linearer dynamischer Systeme bei erzwungener Bewegung	375
7-4.1	Lineare Systeme und Überlagerungsprinzip.....	375
7-4.2	Darstellung aperiodischer Eingangsfunktionen	375
7-4.3	Darstellung periodischer Eingangsfunktionen	376
7-4.4	Lösung der inhomogenen (linearen) Vektorzustandsgleichung.....	377
7-4.5	Diagonalisierung des Systems und Entkopplung der Eigenvorgänge.....	378
7-4.6	Verhalten bei periodischen Eingangsfunktionen (Frequenzgang)	380
7-4.7	Darstellungen des Frequenzgangs	382
7-5	Verhalten und Stabilität nichtlinearer dynamischer Systeme.....	383
7-5.1	Stabilität nichtlinearer Systeme.....	383
7-5.2	Attraktoren nichtlinearer Systeme	383
7-5.3	Strukturveränderung von Systemen.....	385
7-5.4	Vergleich linearer und nichtlinearer dynamischer Systeme.....	386
7-6	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse.....	387
	Literaturverzeichnis.....	391
	Index	395