

Hartmut Bossel

Systeme, Dynamik, Simulation

Modellbildung, Analyse und
Simulation komplexer Systeme

dz/dt

Inhalt

1	SYSTEME UND MODELLE	<i>H</i>
1-0	Überblick	13
1-1	Aufgaben und Ansatz der Modellbildung und Simulation	75
1-1.1	Warum Modellbildung und Simulation?	75
1-1.2	Wie lässt sich Verhalten simulieren?	16
1-1.3	Anwendungen dynamischer Simulationsmodelle	16
1-1.4	Simulation zur Untersuchung von Entwicklungspfaden	18
1-1.5	Spektrum dynamischer Systeme und Modelle	20
1-1.6	Schritte im Modellbildungsprozess	25
1-1.7	Modellzweck und Modellkonzept	25
1-1.8	Entwicklung des Simulationsmodells	27
1-1.9	Simulation des Systemverhaltens	28
1-1.10	Eingriffsplanung und Systementwurf	30
1-1.11	Analyse des Modellsystems	32
1-1.12	Generische Strukturen; Systemzoo	33
1-2	Grundsatzliches zu Systemen	34
1-2.1	Was ist ein System? Systemidentität, Systemintegrität, Systemzweck	35
1-2.2	Dynamische Systeme, Systemverhalten, Betrachtungszeitraum	36
1-2.3	Systemgrenzen und Systemumwelt, Einwirkungen und Auswirkungen	37
1-2.4	Wie macht sich ein System bemerkbar? Verhalten und Zustand	38
1-2.5	Ein System hat 'Gedächtnis': Zustandsgrößen sind Speichergroßen	39
1-2.6	Die Wirkungsstruktur bestimmt Zustandsänderungen	40
1-2.7	Intern erzeugte Systemdynamik: Die Rolle von Rückkopplungen	41
1-2.8	Systemverhalten aus Eigendynamik und Reaktion auf Umwelt	42
1-2.9	Verhaltensbestimmende Größen: System- und Umweltparameter	43
1-2.10	Systeme als Komponenten von Systemen: Teilsysteme und Modularität	43
1-2.11	Übergeordnete Systeme: Hierarchien in komplexen Systemen	45
1-2.12	Systemerhaltung und -entfaltung: Regelung, Anpassung, Evolution	45
1-2.13	Akteure in ihrer Umwelt: Verhaltensorientierung	48
1-2.14	Unberechenbarkeit auch bei determinierten Systemen	49
1-3	Grundsatzliches zu Modellen	50
1-3.1	Modelle für Verhaltensaussagen: Vorteile und Nachteile	50
1-3.2	Das Modell als beschränkt gültige Abbildung	57
1-3.3	Problemstellung, Modellzweck, Modellauswahl	52
1-3.4	Die Alternative: Verhalten nachahmen oder System nachbilden	52
1-3.5	Verhaltensbeschreibung zur Verhaltensnachahmung	55
1-3.6	Systembeschreibung zur Verhaltensklärung	55
1-3.7	Verhaltensbeschreibung in verhaltenserklärenden Modellen	57
1-3.8	Anderer Modellansatz, anderer Datenbedarf	58
1-3.9	Zukunftsorientierung erfordert Systemverständnis	60
1-3.10	Modellgültigkeit: Wann kann das Modell das Original vertreten?	61
1-3.11	Wissenschaftliche Arbeitsweise und Modellbildung	62

2	SYSTEMSTRUKTUR 64				3-3.2
2-0	Überblick 64				3-3.3
2-1	Entwicklung und Analyse des Wirkungsgraphen 65				3-3.4
	2-1.1 Arbeitsbeispiel: 'WeltmodeU' 65				3-3.5
	2-1.2 Wirkungsbeziehungen 67		3-41	Zusai	
	2-1.3 Logische Deduktion 68				
	2-1.4 Der Wirkungsgraph 70		4	SYSI	
	2-1.5 Beispiel: Wirkungsgraph der Klimaänderung 75		4-0	Überl	
	2-1.6 Qualitative Untersuchungen mit der Wirkungsmatrix 76		4-1	Mode	
2-2	Differenzierung des Modellkonzepts und Simulation 83				4-1.1
	2-2.1 Differenzierung der SystemgroGen des Weltmodells 85				4-1.2
	2-2.2 Simulation mit einem Tabellenkalkulationsprogramm 86				4-1.3
	2-2.3 Teilmodell Bevölkerungsentwicklung 88				4-1.4
	2-2.4 Teilmodell Umweltbelastung 95		4-2	Grapl	
	2-2.5 Teilmodell Konsumententwicklung 97				4-2.1
	2-2.6 Verkopplung der Teilmodelle 100				4-2.2
	2-2.7 Simulationen mit der Tabellenkalkulation 105				4-2.3
	2-2.8 Gultigkeit der Modellformulierung 707		4-3	Simul	
	2-2.9 Vergleich mit 'groGen' Weltmodellen 709				4-3.1
2-3	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse 777				4-3.2
					4-3.3
					4-3.4
3	SYSTEMZUSTAND 114				4-3.5
3-0	Überblick 114				4-3.6
3-1	Systemelemente und elementare Systemstruktur 775				4-3.7
	3-1.1 VorgabegroBen 775				4-4
	3-1.2 ZustandsgroBen 776		4-4	Model	
	3-1.3 ZwischengroGen 779				4-4.1
	3-1.4 Grundstruktur dynamischer Systeme 720				4-4.2
	3-1.5 Systemzustand und Zustandsraum 725				4-4.3
	3-1.6 Zustandsgleichung und elementares Blockdiagramm 727				4-4.4
	3-1.7 Berechnung des Systemzustands 750				4-4.5
	3-1.8 Berechnung kontinuierlicher und diskreter Systeme 755				4-4.6
3-2	Struktur und Verhalten einiger elementarer Systeme 756				4-4.7
	3-2.1 Speicherloses System 756				4-4.8
	3-2.2 Exponentielles Wachstum 757				4-4.9
	3-2.3 Logistisches Wachstum 759				4-4.10
	3-2.4 Exponentielle Verzögerung (exponentielles Leek) 740		4-5	Zusan	
	3-2.5 Linearer Schwinger 742				
	3-2.6 Bistabiler Schwinger 144		5	SYST	
	3-2.7 Chaotischer bistabiler Schwinger 146		5-0	Überb	
	3-2.8 Rauber-Beute-System 747		5-1	Kriter	
3-3	Modellentwicklung und dimensionale Analyse 148				5-1.1
	3-3.1 Überprüfung dimensionaler Stimmigkeit 749				5-1.2

3-3.2	Ermittlung korrekter Umrechnungsfaktoren	757
3-3.3	Dimensionsanalyse als Hilfe bei der Modellformulierung	752
3-3.4	Zustandsgleichungen mit normierten Zustandsgrößen	754
3-3.5	Dimensionslose Zustandsgleichungen und Zeitnormierung	755
3-4	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse	756
4	SYSTEMVERHALTEN	767
4-0	Überblick	767
4-1	Modellbildung der Rotationspendel-Dynamik	762
4-1.1	Pendeldynamik: Modellzweck und Wortmodell	762
4-1.2	Entwicklung des Wirkungsgraphen für das Kreispendel	765
4-1.3	Größen, Dimensionen, Wirkungsbeziehungen	767
4-1.4	Modellgleichungen und Simulationsdiagramm für das Kreispendel	170
4-2	Graphisch-interaktive Modellbildung und Simulation	772
4-2.1	Simulationsverfahren	772
4-2.2	Graphisch-interaktive Modellbildung und Simulation	775
4-2.3	Einige für Simulationen wichtige Funktionen	776
4-3	Simulation der Rotationspendel-Dynamik	785
4-3.1	Vom Strukturdiagramm zum Simulationsmodell	785
4-3.2	Standardlauf und interaktive Benutzung	786
4-3.3	Parameteränderung und Parameterempfindlichkeit	789
4-3.4	Globale Verhaltensuntersuchung	797
4-3.5	Kondensation des mathematischen Modells des Kreispendels	195
4-3.6	Linearisierung und Verhalten an den Gleichgewichtspunkten	199
4-3.7	Zusammenfassung der Beobachtungen am Modell des Pendels	201
4-4	Modellbildung und Simulation der Fischfangdynamik	202
4-4.1	Fischfangdynamik: Wortmodell und Wirkungsgraph	202
4-4.2	Größen, Dimensionen, Zusammenhänge bei der Fischfangdynamik	204
4-4.3	Simulationsdiagramm und Simulationsmodell der Fischfangdynamik	207
4-4.4	Standardlauf des Fischfang-Modells	207
4-4.5	Verhalten bei Parameteränderungen	209
4-4.6	Modifizierung für dichte-unabhängige Fangmenge	272
4-4.7	Simulationsergebnisse für dichte-unabhängigen Fischfang	275
4-4.8	Kondensation des Fischfangmodells zur Rauber-Beute-Struktur	277
4-4.9	Gleichgewichtspunkte des Fischfangmodells	227
4-4.10	Zusammenfassung der Beobachtungen am Fischfangmodell	224
4-5	Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse	225
5	SYSTEMENTWURF	229
5-0	Überblick	229
5-1	Kriterien und Bewertung des Systemverhaltens	231
5-1.1	Orientoren, Indikatoren, Kriterien	257
5-1.2	Systemverhalten und Orientierungstheorie	235

- 5-1.3 Existenz in der normalen Umwelt 239
- 5-1.4 Wirksamkeit bei der Beschaffung knapper Ressourcen 240
- 5-1.5 Handlungsfreiheit im Umgang mit Umweltvielfalt 247
- 5-1.6 Sicherheit vor Umweltschwankungen 242
- 5-1.7 Wandlungsfähigkeit zur Anpassung an veränderte Umwelt 242
- 5-1.8 Berücksichtigung anderer Systeme in der Systemumwelt 244
- 5-1.9 Leitwerte, Orientierung und Beurteilung von Systemverhalten 246
- 5-2 Entwicklungsanalyse 250**
 - 5-2.1 Überblick 250
 - 5-2.2 Systemgrößen und Simulationsmodell der Miniwelt 257
 - 5-2.3 Kriterien und Indikatoren der Systementwicklung 254
 - 5-2.4 Szenariorentwürfe und Simulationsläufe 267
 - 5-2.5 Vergleichende Bewertung der Simulationsläufe 264
- 5-3 Eingriffsplanung 267**
 - 5-3.1 Überblick 267
 - 5-3.2 Beschränkungen und Gütekriterien für die Fischfang-Optimierung 269
 - 5-3.3 Ergänzungen des Modells für Optimierungsuntersuchungen 272
 - 5-3.4 Optimaler Investitionsanteil bei Fischfang ohne Ortungstechnik 275
 - 5-3.5 Optimaler Investitionsanteil bei Fischfang mit Ortungstechnik 276
 - 5-3.6 Optimierung über einen Zeitpfad 278
- 5-4 Systementwurf für Stabilisierung und Optimierung 279**
 - 5-4.1 Überblick 279
 - 5-4.2 Stabilisierung durch geänderte Systemstruktur: Systemgleichungen 280
 - 5-4.3 Simulationsmodell für das stabilisierte Pendelsystem 286
 - 5-4.4 Simulationsläufe und Suche nach 'guten' Regelparametern 289
- 5-5 **Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse 295**
- 6 SYSTEMANALYSE 296**
- 6-0 Überblick 296
- 6-1 Zustandsgleichungen dynamischer Systeme 297
 - 6-1.1 Systembegriffe 297
 - 6-1.2 Systemgrößen als Vektoren 298
 - 6-1.3 Allgemeine Zustands- und Verhaltensgleichungen 299
 - 6-1.4 Allgemeines Systemdiagramm für dynamische Systeme 299
 - 6-1.5 Zustandsberechnung 300
 - 6-1.6 Numerische Integration der Zustandsgleichung 300
 - 6-1.7 Umformung in Zustandsgleichungen 1. Ordnung 307
 - 6-1.8 Umformung einer Differentialgleichung n-ter Ordnung 301
 - 6-1.9 Umformung einer Differenzgleichung n-ter Ordnung 302
 - 6-1.10 Zustandsgleichung und Systemdynamik 303
- 6-2 Gleichgewichtspunkte 304**
 - 6-2.1 Gleichgewichtspunkte als Ruhepunkte 304
 - 6-2.2 Gleichgewichtspunkte bei nichtlinearen Systemen 305
 - 6-2.3 Gleichgewichtspunkte kontinuierlicher linearer Systeme 305

- 6-2.4 Gleichgewichtspunkte diskreter linearer Systeme 306
- 6-3 Verhalten und Stabilität dynamischer Systeme 307**
 - 6-3.1 Einführung in das Verhalten linearer kontinuierlicher Systeme 307
 - 6-3.2 Verhaltensmöglichkeiten eines linearen Systems 308
 - 6-3.3 Stabilität nichtlinearer Systeme 309
 - 6-3.4 Attraktoren nichtlinearer Systeme 577
 - 6-3.5 Strukturveränderung von Systemen 575
 - 6-3.6 Vergleich linearer und nichtlinearer dynamischer Systeme 575
- 6-4 Linearisierung nichtlinearer Systeme 575**
 - 6-4.1 Linearisierung der Zustandsgleichung 575
 - 6-4.2 Störungsansatz 576
 - 6-4.3 Approximation durch Taylor-Reihe 577
 - 6-4.4 Linearisierung der Zustandsgleichung: Jacobi-Matrix 578
- 6-5 Matrizenoperationen für lineare Systeme 320**
 - 6-5.1 Operationen mit Matrizen und Vektoren 320
 - 6-5.2 Eigenwerte, Eigenvektoren und charakteristische Gleichung 323
 - 6-5.3 Basistransformation 324
- 6-6 Verhalten und Stabilität linearer Systeme bei freier Bewegung 326**
 - 6-6.1 Form der allgemeinen Lösung der Zustandsgleichung 326
 - 6-6.2 Lineare dynamische Systeme 326
 - 6-6.3 Lösung des homogenen zeitinvarianten diskreten Systems 327
 - 6-6.4 Lösung mit der diagonalen Eigenwertmatrix 327
 - 6-6.5 Lösung des homogenen zeitinvarianten kontinuierlichen Systems 328
 - 6-6.6 Lösung mit dem diagonalen Matrixexponential 329
 - 6-6.7 Stabilitätsbetrachtungen für lineare Systeme 329
 - 6-6.8 Allgemeine Form, Standardform und Normalform: Umrechnung 330
 - 6-6.9 Verhaltensaquivalente Systeme: Beispiel 333
 - 6-6.10 Verhaltensweisen linearer Systeme 335
 - 6-6.11 Kontinuierliche Systeme 335
 - 6-6.12 Diskrete Systeme 336
 - 6-6.13 Pulsdynamik der Wirkungsstruktur 337
 - 6-6.14 Stabilitätsprüfung für lineare Systeme 339
- 6-7 Verhalten linearer Systeme bei erzwungener Bewegung 547**
 - 6-7.1 Lineare Systeme und Überlagerungsprinzip 547
 - 6-7.2 Darstellung aperiodischer Eingangsfunktionen 342
 - 6-7.3 Darstellung periodischer Eingangsfunktionen 343
 - 6-7.4 Lösung der inhomogenen (linearen) Vektorzustandsgleichung 344
 - 6-7.5 Diagonalisierung des Systems mit Entkopplung der Eigenvorgänge 345
 - 6-7.6 Verhalten bei periodischen Eingangsfunktionen (Frequenzgang) 347
 - 6-7.7 Darstellungen des Frequenzgangs 557
- 6-8 Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse 557**