
Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Die Simulationspipeline	1
1.2	Einführung in die Modellierung	4
1.2.1	Allgemeines	5
1.2.2	Herleitung von Modellen	7
1.2.3	Analyse von Modellen	9
1.2.4	Klassifikation von Modellen	11
1.2.5	Skalen	12
1.3	Einführendes zur Simulation	14
1.3.1	Allgemeine Bemerkungen	14
1.3.2	Bewertung	15
2	Benötigtes Instrumentarium in Kurzform	17
2.1	Elementares und Diskretes	18
2.2	Kontinuierliches	19
2.2.1	Lineare Algebra	19
2.2.2	Analysis	21
2.2.3	Bedeutung für Modellbildung und Simulation	27
2.3	Stochastisches und Statistisches	28
2.3.1	Warum Zufall?	28
2.3.2	Diskrete Wahrscheinlichkeitsräume	29
2.3.3	Kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsräume	34
2.3.4	Asymptotik	38
2.3.5	Induktive Statistik	40
2.4	Numerisches	43
2.4.1	Grundlagen	44
2.4.2	Interpolation und Quadratur	47
2.4.3	Direkte Lösung linearer Gleichungssysteme	54
2.4.4	Iterationsverfahren	56
2.4.5	Gewöhnliche Differentialgleichungen	63

2.4.6	Partielle Differentialgleichungen	73
2.5	Bezüge Instrumentarium – Anwendungen	77

Teil I Spielen – entscheiden – planen: Ein Warm-up zur Modellierung

3	Spieltheorie	81
3.1	Spiele in strategischer Normalform	82
3.2	Spiele ohne Annahmen über den Gegner	84
3.3	Reaktionsabbildungen	85
3.4	Dominante Strategien	86
3.5	Nash-Gleichgewichte	88
3.6	Gemischte Strategien	89
3.7	Ausblick	90
4	Gruppenentscheidungen	93
4.1	Individualpräferenzen und Gruppenentscheidungen	94
4.2	Beispiele für Entscheidungsverfahren	97
4.3	Bedingungen an Auswahlfunktionen, Satz von Arrow	100
5	Zeitpläne	105
5.1	Prozess-Scheduling (deterministisch)	107
5.2	Prozess-Scheduling (stochastisch)	112
5.3	Job-Shop-Probleme	117
5.4	Weitere Zeitplanprobleme	122
6	Wiener-Prozesse	125
6.1	Vom Bernoulli-Experiment zur Normalverteilung	126
6.2	Normalverteilte Einflussgrößen	128
6.3	Wiener-Prozesse	129
6.4	Anwendung: Entwicklung von Geldanlagen	133

Teil II Verkehr auf Highways und Datenhighways: Einmal durch die Simulationspipeline

7	Makroskopische Simulation von Straßenverkehr	141
7.1	Modellansatz	142
7.2	Homogene Verkehrsströmung	144
7.2.1	Ein erstes Ergebnis	144
7.2.2	Geschwindigkeit, Fluss und Dichte	145
7.2.3	Fundamentaldiagramm	146
7.2.4	Modellverfeinerungen	147
7.3	Inhomogene Verkehrsströmung	150

7.4	Simulation einer einfachen Ringstraße	152
7.4.1	Ein erster Versuch	152
7.4.2	Eine verbesserte Simulation	155
7.5	Signal- und Verkehrsgeschwindigkeit	156
7.6	Zusammenfassung und Ausblick	161
8	Mikroskopische Simulation von Straßenverkehr	163
8.1	Modellansatz	164
8.1.1	Zelluläre Automaten	164
8.1.2	Straßenverkehr	166
8.2	Eine erste Simulation	169
8.3	Stochastische Erweiterung: Trödelfaktor	170
8.3.1	Freier Verkehrsfluss	171
8.3.2	Höhere Dichten, Staus aus dem Nichts	172
8.3.3	Validierung und Kalibrierung: Fundamentaldiagramm	175
8.4	Modellierung von Verkehrsnetzen	178
8.4.1	Verkehrsgraph	178
8.4.2	Kreuzungen	180
8.4.3	Pläne und Vorhaben	184
8.5	Modellverfeinerungen	190
8.6	Zusammenfassung und Ausblick	192
9	Stochastische Verkehrssimulation	193
9.1	Modellansatz	195
9.2	Wartesysteme	196
9.2.1	Stochastische Prozesse	197
9.2.2	Klassifizierung elementarer Wartesysteme	203
9.2.3	Beispiele zur Kendall-Notation	204
9.2.4	Leistungskenngrößen und erste Ergebnisse	205
9.3	Warteschlangennetze	208
9.3.1	Parameter in Warteschlangennetzen	209
9.3.2	Asymptotische Analyse	210
9.4	Analyse und Simulation	212
9.4.1	Markov-Prozesse und Markov-Ketten	213
9.4.2	Wartesysteme	219
9.4.3	Warteschlangennetze	223
9.4.4	Simulation	224
9.5	Zusammenfassung und Ausblick	226

Teil III Dynamische Systeme: Ursache, Wirkung und Wechselwirkung

10	Populationsdynamik	231
10.1	Modell von Malthus	232
10.2	Verfeinerte Ein-Spezies-Modelle	233
10.2.1	Lineares Modell mit Sättigung	233
10.2.2	Logistisches Wachstum	234
10.3	Zwei-Spezies-Modelle	236
10.4	Ein diskretes Ein-Spezies-Modell	240
11	Regelung	245
11.1	Regelungstechnische Grundlagen	246
11.1.1	Regelkreis	247
11.1.2	Beschreibung linearer dynamischer Systeme	248
11.1.3	Anforderungen an den Regler	248
11.1.4	PID-Regler	249
11.2	Exemplarische Modellierung eines Mehrkörpersystems	251
11.2.1	Linearisiertes Modell mit Impuls- und Drallsatz	252
11.2.2	Vollständiges Modell mit Lagrange-Gleichungen	255
11.2.3	Simulation des Pendels	259
11.3	Fuzzy-Mengenlehre	259
11.3.1	Zugehörigkeit zu Fuzzy-Mengen	260
11.3.2	Operationen mit Fuzzy-Mengen	262
11.3.3	Linguistische Variablen	264
11.3.4	Fuzzy-Logik	265
11.4	Regelbasiertes Fuzzy-System	268
11.4.1	Fuzzifizierung	269
11.4.2	Inferenz	270
11.4.3	Defuzzifizierung	271
11.4.4	Beispiel	271
11.5	Fuzzy-Regelung des invertierten Pendels	271
11.5.1	Parameter und Randbedingungen	272
11.5.2	Aufschwingen des Pendels	273
11.5.3	Stabilisieren des Pendels	275
11.6	Ausblick	276
12	Chaostheorie	279
12.1	Einleitung	280
12.2	Von der Ordnung zum Chaos	281
12.2.1	Logistische Abbildung und deren Fixpunkte	281
12.2.2	Numerische Untersuchung und Bifurkationen	283
12.2.3	Übergang ins Chaos	286

12.3	Seltsame Attraktoren	288
12.3.1	Selbstähnlichkeit und fraktale Dimension	289
12.3.2	Hénon-Abbildung	291
12.3.3	Allgemeine zweidimensionale quadratische Abbildung	292
12.4	Chaotisches Verhalten eines angetriebenen Pendels	295
12.4.1	Modell des Pendels	296
12.4.2	Diskretisierung	297
12.4.3	Zyklen und Attraktoren	298

Teil IV Physik im Rechner: Aufbruch zum Zahlenfressen

13	Molekulardynamik	305
13.1	Modellierung von Molekülen und Wechselwirkungen	306
13.1.1	Fundamentale physikalische Kräfte	307
13.1.2	Potenziale für ungeladene Atome	307
13.1.3	Berechnung der auf ein Atom einwirkenden Kraft	311
13.2	Bewegungsgleichung und deren Lösung	312
13.2.1	Bewegungsgleichung	312
13.2.2	Euler-Verfahren	313
13.2.3	Velocity-Störmer-Verlet	313
13.2.4	Bemerkungen	315
13.3	Simulationsgebiet	316
13.3.1	NVT-Ensemble	316
13.3.2	Randbedingungen	317
13.4	Implementierung	318
13.4.1	Linked-Cells-Datenstruktur	319
13.5	Parallelisierung	321
13.6	Ausblick	323
14	Wärmeleitung	325
14.1	Herleitung der Wärmeleitungsgleichung	326
14.1.1	Anzahl an Dimensionen	328
14.2	Diskretisierung	329
14.2.1	3-Punkte-Stern	330
14.2.2	5-Punkte-Stern	332
14.2.3	Randbehandlung	334
14.3	Numerische Lösung der PDE	334
14.3.1	Einfache Relaxationsverfahren	335
14.3.2	Mehrgitterverfahren	336

15	Strömungsmechanik	343
15.1	Fluide und Strömungen	344
15.2	Mathematisches Modell	346
15.2.1	Navier-Stokes-Gleichungen	346
15.2.2	Anmerkungen zur Herleitung	348
15.3	Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen	349
15.3.1	Finite Differenzen	349
15.3.2	Behandlung der Ortsableitungen	350
15.3.3	Behandlung der Zeitableitungen	351
15.3.4	Behandlung der Randbedingungen	351
15.4	Numerische Lösung der diskretisierten Gleichungen	353
15.4.1	Zeitschritt	353
15.4.2	Ortsdiskrete Impulsgleichungen	354
15.4.3	Ortsdiskrete Poisson-Gleichung für den Druck	355
15.4.4	Zur Stabilität	355
15.5	Anwendungsbeispiel: Umströmung eines Hindernisses	356
15.6	Ausblick	357
15.6.1	Aufgabenstellungen und Modelle	357
15.6.2	Diskretisierungen	359
15.7	Anhang: Kleiner Exkurs zur Gittergenerierung	359
15.7.1	Strukturierte Gitter	360
15.7.2	Unstrukturierte Gitter	364
15.7.3	Ansätze zur Behandlung veränderlicher Geometrien	366
16	Globale Beleuchtung in der Computergraphik	369
16.1	Größen aus der Radiometrie	370
16.2	Die Rendering-Gleichung	372
16.3	Techniken zur Lösung der Rendering-Gleichung	375
16.3.1	Ray-Tracing	375
16.3.2	Path-Tracing	377
16.3.3	Weitere Ray-Tracing-Derivate	378
16.4	Das Radiosity-Verfahren	380
16.4.1	Grundprinzip	380
16.4.2	Berechnung der Formfaktoren	381
16.4.3	Lösung der Radiosity-Gleichung	384
16.4.4	Anmerkungen und Verbesserungen	385
	Abschließende Bemerkungen	389
	Literatur	391
	Sachverzeichnis	395