

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
1.1	Herausforderungen	1
1.1.1	Technologische Entwicklungen	2
1.1.2	Konsequenzen für das Software Engineering	11
1.2	Begriffsdefinition	12
1.3	Aufbau und Gliederung	13
1.3.1	Ziele des Buches	13
1.3.2	Voraussetzungen	13
1.3.3	Gliederung	14
	Literatur	15
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	17
2.1	Asymptotische Analyse	18
2.2	Theoretisches Modell	20
2.2.1	Sequenzielle Registermaschine	20
2.2.2	Pseudocode	21
2.2.3	Beispielalgorithmus: Das Sieb des Eratosthenes	22
2.2.4	Parallele Registermaschine	24
2.2.5	Paralleler Speicherzugriff	24
2.2.6	Kommunikation paralleler Maschinenmodelle	26
2.3	Rechnernetze	29
2.4	Taxonomie nach Flynn	32
2.5	Leistungsmerkmale	33
2.5.1	Kennzahlen	34
2.5.2	Isoeffizienz	36
2.5.3	Beispiel: Analyse der parallelen Maximumsuche	39
2.6	Gesetze von Amdahl und Gustafson	41
2.7	Lemma von Brent	43

2.8	Parallelisierung .....	47
2.8.1	Abhängigkeiten .....	47
2.8.2	Testverfahren .....	50
	Literatur .....	53
<b>3</b>	<b>Parallele Systeme .....</b>	<b>55</b>
3.1	Einleitung .....	55
3.1.1	Parallelisierung auf Bitebene .....	56
3.1.2	Von Neumann-Rechnerarchitektur .....	59
3.2	Parallelisierung auf Befehlsebene .....	62
3.2.1	Befehlspipeline .....	62
3.2.2	Superskalarität .....	64
3.2.3	Multithreading .....	65
3.2.4	Vektorisierung .....	66
3.3	Speicherhierarchie .....	71
3.3.1	Cache-Speicher .....	71
3.3.2	Rechensysteme mit gemeinsamem Hauptspeicher .....	77
3.4	Kohärenz .....	78
3.4.1	Kohärenzprotokolle .....	78
3.4.2	False Sharing .....	84
3.5	NUMA-Architektur .....	86
3.6	Speichermodell .....	90
3.6.1	Motivation .....	90
3.6.2	Wettlaufbedingung .....	93
3.6.3	Sequenzielle Konsistenz .....	94
3.6.4	Konsistenzmodelle .....	97
3.6.5	Atomare Variablen .....	104
3.6.6	Weitere Beispiele .....	107
3.6.7	Atomare Operationen .....	110
3.7	Sperrenfreie Datenstrukturen .....	112
3.7.1	Warteschlange .....	112
3.7.2	Das ABA-Problem .....	116
3.7.3	Dynamische Speicherverwaltung mit Hazard-Verweisen .....	117
3.8	Eingebettete Systeme .....	120
3.8.1	Parallax P8X32A .....	121
3.8.2	Adapteva Epiphany .....	122
3.8.3	Espressif Systems ESP32 .....	122
3.8.4	XMOS xCore .....	124
3.8.5	Nvidia Tegra 2 .....	124
3.8.6	NXP i.MX7 .....	126
	Literatur .....	127

<b>4 Algorithmen</b> .....	129
4.1 Entwurf von Algorithmen .....	130
4.1.1 PCAM-Methode .....	130
4.1.2 Parallele Dekomposition .....	135
4.1.3 Skalierbarkeit durch kleine Einheiten .....	136
4.2 Horner-Schema .....	138
4.2.1 Sequenzielles Verfahren .....	139
4.2.2 Parallelisierung des Wellenfront-Musters .....	141
4.3 Polytop-Modell .....	142
4.3.1 Einleitung .....	142
4.3.2 Transformation .....	146
4.3.3 Fourier-Motzkin-Elimination .....	147
4.3.4 Sortieren durch Vertauschen (Bubblesort) .....	150
4.4 Pointer-Jumping .....	155
4.5 Präfixsummen und Reduktionsalgorithmen .....	157
4.5.1 Basisoperationen .....	159
4.5.2 Kostenoptimale Reduktion .....	160
4.5.3 Algorithmen zur Berechnung der Präfixsumme .....	163
4.5.4 Erweiterte Operationen .....	168
4.5.5 Rekursionsgleichungen .....	172
4.6 Sortierverfahren .....	181
4.6.1 Sortieren durch Mischen .....	181
4.6.2 Sortiernetzwerke .....	187
4.6.3 Odd-Even-Transposition-Sortiernetzwerk .....	190
4.6.4 Bitonisches Sortiernetzwerk .....	190
4.7 Rekursive Suchverfahren .....	196
4.7.1 Rekursion .....	197
4.7.2 Entscheidungsprobleme .....	200
4.8 Matrizenmultiplikation .....	207
4.8.1 Einleitung .....	207
4.8.2 Verfahren von Cannon .....	209
4.8.3 SUMMA-Algorithmus .....	212
4.9 Mustererkennung in Zeichenketten .....	217
4.9.1 Einleitung .....	217
4.9.2 Periodizität .....	217
4.9.3 Vishkin-Algorithmus für aperiodische Muster .....	219
4.10 Map-Reduce .....	222
4.10.1 Idee .....	222
4.10.2 Verteilter Algorithmus von Google .....	222
4.10.3 Beispiel Textanalyse .....	223
4.10.4 Beispiel PageRank .....	225
Literatur .....	230

---

<b>5</b>	<b>CPU-Programmierung</b> . . . . .	231
5.1	C++-Standardbibliothek . . . . .	231
5.1.1	Allgemeines . . . . .	231
5.1.2	Lambda-Ausdrücke . . . . .	233
5.1.3	Zeitmessung . . . . .	242
5.1.4	Thread-Funktionalität . . . . .	245
5.1.5	Asynchrone Task-Programmierung . . . . .	249
5.1.6	Parallele Algorithmen . . . . .	257
5.1.7	Speicherausrichtung . . . . .	261
5.2	POSIX Threads . . . . .	265
5.2.1	Einleitung . . . . .	266
5.2.2	Affinität . . . . .	267
5.3	Threading Building Blocks . . . . .	272
5.3.1	Einleitung . . . . .	272
5.3.2	Parallele Schleifen . . . . .	273
5.3.3	Reduktion und Präfixsumme . . . . .	278
5.3.4	Task-Parallelität . . . . .	283
5.3.5	Dynamische Lastverteilung . . . . .	291
5.3.6	Erweiterte Task-Konzepte . . . . .	294
5.4	OpenMP . . . . .	305
5.4.1	Funktionsweise . . . . .	305
5.4.2	Datenparallelität . . . . .	308
5.4.3	Task-Parallelität . . . . .	308
5.4.4	Das $n$ -Damenproblem . . . . .	309
	Literatur . . . . .	312
<b>6</b>	<b>GPU-Programmierung</b> . . . . .	313
6.1	Einleitung . . . . .	313
6.2	Entwicklung der Grafikkarte . . . . .	314
6.3	Aufbau modernen Grafikkarten . . . . .	314
6.4	Hardware-Architektur . . . . .	316
6.5	Speicherhierarchie . . . . .	318
6.5.1	Speichertypen . . . . .	319
6.6	Software-Architektur und Programmiermodell . . . . .	321
6.6.1	Synchronisierung von Threads . . . . .	322
6.7	Beispiele . . . . .	323
6.7.1	Sobel-Operator . . . . .	323
6.7.2	Bitonischer Sortierer . . . . .	328

6.8	C++-Bibliothek Thrust . . . . .	334
6.8.1	Motivation . . . . .	334
6.8.2	Container . . . . .	335
6.8.3	Algorithmen . . . . .	337
6.9	Andere Konzepte . . . . .	339
	Literatur . . . . .	339
<b>7</b>	<b>Moderne Programmiersprachen . . . . .</b>	<b>341</b>
7.1	Funktionale Programmierung mit Scala . . . . .	342
7.1.1	Grundsätzliches . . . . .	342
7.1.2	Ausdrücke und Werte . . . . .	342
7.1.3	Funktionen . . . . .	344
7.1.4	Funktionen höherer Ordnung . . . . .	348
7.1.5	Listen . . . . .	350
7.1.6	Standardfunktionen . . . . .	354
7.1.7	Klassen . . . . .	356
7.1.8	case-classes . . . . .	358
7.1.9	Weitere Konzepte in Scala . . . . .	359
7.1.10	Beispiel: Textanalyse . . . . .	364
7.2	Das Aktorenmodell . . . . .	367
7.2.1	Motivation . . . . .	367
7.2.2	Was ist das Problem mit Threads? . . . . .	367
7.2.3	Bausteine des Aktorenmodells . . . . .	370
7.2.4	Aktorenmodell mit Akka . . . . .	371
7.2.5	Beispiel: Bank . . . . .	372
	Literatur . . . . .	378
<b>8</b>	<b>Parallele Projekte . . . . .</b>	<b>379</b>
8.1	Langford-Sequenz . . . . .	380
8.2	Tatami-Parkettierung . . . . .	382
8.3	Die Steppdecke von Mrs. Perkins . . . . .	384
8.4	Zellulärer Automat . . . . .	386
8.5	SOGO-Spiel . . . . .	387
8.6	Quadratischer Baum . . . . .	389
8.7	Zeitreihenanalyse . . . . .	392
8.8	Rätsel Nr. 244 . . . . .	393
	Literatur . . . . .	394
	<b>Bildnachweis . . . . .</b>	<b>395</b>
	<b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>397</b>