

eXamen.press

eXamen.press ist eine Reihe, die Theorie und Praxis aus allen Bereichen der Informatik für die Hochschulausbildung vermittelt.

Axel Böttcher

Rechneraufbau und Rechnerarchitektur

Mit 70 Abbildungen und 19 Tabellen

 Springer

Axel Böttcher

Fakultät für Informatik und Mathematik
Fachhochschule München
Lothstr. 34
80335 München
ab@cs.fhm.edu
<http://www.cs.fhm.edu/~boettcha/>

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISSN 1614-5216

ISBN-10 3-540-20979-4 Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN-13 978-3-540-20979-9 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Satz: Druckfertige Daten des Autors
Herstellung: LE-TEX, Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Umschlaggestaltung: KünkelLopka Werbeagentur, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem Papier 33/3100 YL - 5 4 3 2 1 0

Für Benedikt, Isabella, Lea und Sabine
A.B.

Vorwort

Zu Beginn dieses Buchprojekts fragte ich mich, ob es denn notwendig sei, noch ein Buch über Rechnerarchitektur zu schreiben. Ein Blick in das Literaturverzeichnis dieses Buches zeigt, dass es bereits eine Vielzahl an Büchern über Rechnerarchitektur gibt. Die Menge der vorhandenen Bücher deckt die gesamte Bandbreite ab. Sie erstreckt sich vom Lehrbuch, das eine einsemestrige Vorlesung begleitet [9, 10, 25], über umfangreichere Darstellungen des gesamten Stoffgebiets [17, 24, 28] bis hin zu eher forschungsorientierten Büchern [11, 12].

Das Buch von Hennessy und Patterson [17] ist das Standardwerk zum Thema, das alle relevanten Fragestellungen behandelt. Mit diesem Buch lässt sich weit mehr als nur eine Vorlesung bestreiten. Für Studierende, die sich nicht einem Schwerpunkt der Rechnerarchitektur widmen, kann es als weiterführende Literatur empfohlen werden.

Im Grundstudium des Bachelorstudiengangs Informatik setzen wir am Fachbereich Informatik/Mathematik der Fachhochschule München seit mehreren Jahren MMIX erfolgreich ein. Die von Donald E. Knuth bereitgestellte Software umfasst neben einem einfachen Simulator einen zweiten Simulator, der den Prozessor unter Berücksichtigung aller Gegebenheiten einer modernen Prozessorarchitektur simuliert. Mehr noch, er ist so konfigurierbar, dass er viele verschiedene Alternativen simulieren kann. Er wird deshalb auch als Meta-MMIX-Simulator bezeichnet.

Die Hemmschwelle, in diesen Simulator einzusteigen, ist allerdings recht hoch. Allein zu verstehen, was die etwa 40 Basisparameter bedeuten, erfordert Kenntnisse, die im Grundstudium in der Regel nicht vermittelt werden. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, die Unmenge an Ausgaben zu verstehen, die dieser Simulator produziert und mit denen er seinen momentanen Zustand beschreibt. Ein Doktorand der Universität Stanford hat eine Umgebung zur Visualisierung dieser Ausgaben programmiert [6], die aber leider nicht verfügbar ist.

Nach einem Gespräch mit Donald E. Knuth auf der *Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education* im Jahre 2003 entstand die Idee, selbst eine Visualisierung zu schreiben und frei verfügbar zu machen. Als Grundlage dient das mittlerweile weit verbreitete Werkzeug Eclipse. Diese Visualisierung wird seither erfolgreich im Unterricht eingesetzt.

Es ist deutlich erkennbar, dass Knuth das Buch von Hennessy und Patterson genau studiert und die dort beschriebenen Ideen und Konzepte in seinem Meta-Simulator umgesetzt hat. Das vorliegende Buch orientiert sich nach den beiden Grundlagenkapiteln an dem Meta-Simulator und damit indirekt

auch an der Darstellung von Hennessy und Patterson, geht dabei jedoch nicht so sehr in die Tiefe. Vielmehr wird versucht, den Zugang zu dem Meta-Simulator zu ebnen und zu eigenen Experimenten anzuregen. So lässt sich der Stoff wesentlich besser verstehen und verinnerlichen.

Aus den Erfahrungen mit dem experimentellen Zugang zur Rechnerarchitektur ist dieses Buch entstanden. Es stellt insofern etwas Neues zu diesem Thema dar.

Zwar gibt es Konzepte, die sich mit dem Meta-Simulator nicht oder nicht vollständig erfassen lassen, wie EPIC-Architekturen und moderne Prozessoren mit mehreren Kernen, jedoch lässt sich mit unserem Ansatz zumindest zeigen, warum diese Wege gegangen werden und was man sich davon versprechen kann.

Die Kenntnis vom MMIX und seiner Assemblersprache ist als Voraussetzung zum Lesen dieses Buches sicher hilfreich. Allerdings muss man die Programme in diesem Buch lediglich verstehen, was einfacher ist als eigene Programme zu schreiben. Der Anhang enthält eine knappe Einführung in MMIX für alle, die mit diesem Prozessor noch nicht oder nicht mehr vertraut sind.

Ich bedanke mich bei allen, die geholfen haben, dieses Buch in die endgültige Form zu bringen. Insbesondere den vielen Hörerinnen und Hörern meiner Vorlesungen zu den Themen Rechnerarchitektur und Rechnertechnik, die viele fehlerhafte Beta-Versionen ertragen mussten. Ferner bei meinem Kollegen Christian Vogt, der das Manuskript gründlich gelesen und viele wichtige Anmerkungen gemacht hat. Für Unterstützung danke ich auch meinen Kollegen Manfred Gruber und Martin Ruckert.

Auf der Webseite www.mmix.de steht Begleitmaterial zum Herunterladen bereit. Insbesondere die Beispielprogramme und Hinweise zur Visualisierungs-umgebung, die als Plugin für die freie Plattform Eclipse realisiert wurde.

Triftern und München,
Juni 2006

Axel Böttcher

Inhaltsverzeichnis

1	Landschaft der Prozessoren	
1.1	Prozessortypen	3
1.1.1	Personal Computer und ihre Prozessoren	3
1.1.2	Embedded Prozessoren	5
1.1.3	Signalprozessoren	5
1.1.4	Mehrprozessorsysteme und Supercomputer	6
1.1.5	Einsatzgebiete für Prozessoren	6
1.2	Technologische Randbedingungen	8
1.3	Befehlsätze	11
1.3.1	Grundlegende Eigenschaften von Befehlsätzen	11
1.3.2	Registersätze und Programmiermodell	11
1.3.3	Unterscheidung von Befehlsätzen nach Registerbreite ...	12
1.3.4	Angabe von Operanden und Ergebnis	13
1.3.5	Adressierungsarten	15
1.3.6	Befehlsformate	16
1.3.7	Befehlstypen	19
1.3.8	Parallelverarbeitung auf Ebene des Befehlsatzes	23
1.3.9	Exkurs: Stackmaschinen	24
2	Leistungsmessung und Bewertung	
2.1	Kenngrößen von Prozessoren	29
2.1.1	Taktfrequenz	29
2.1.2	Million Instructions per Second	30
2.1.3	Floating Point Operations per Second	30
2.1.4	Cycles per Instruction und Instructions per Cycle	30
2.1.5	Leistungsaufnahme	30
2.2	Benchmarks	31
2.3	Amdahls Gesetz	35
3	Pipelining	
3.1	Die klassische Fünf-Stufen-Pipeline	39
3.2	Pipeline-Hemmnisse	43
3.2.1	Strukturelle Hemmnisse	44
3.2.2	Hemmnisse durch Datenabhängigkeiten	46
3.2.3	Ablaufbedingte Hemmnisse	47
3.2.4	Behandlung von Interrupts	50
3.3	Weiterentwicklungen	51
3.3.1	Längere Pipelines	51
3.3.2	Parallele Pipelines	51

4	Superskalarität	
4.1	Parallele Ausführungseinheiten	55
4.2	Superskalare Pipelines	58
4.3	Konflikte durch Datenabhängigkeiten	60
4.4	Ablaufsteuerung	61
4.5	Spekulative Befehlsausführung	69
4.6	Umbenennung von Registern	71
4.7	Behandlung von Speicherzugriffen	75
4.8	Interrupts bei superskalaren Pipelines	76
4.9	Zusammenfassung	77
4.10	Superskalare Pipelines in der Praxis	77
4.10.1	Pentium Pipelines für X86-Befehle	77
4.10.2	Die Pipeline des PowerPC 970	79
5	Experimente mit dem MMIX-Meta-Simulator	
5.1	Konfiguration des Simulators	85
5.1.1	Der Fetch Buffer	85
5.1.2	Ausführungseinheiten	86
5.1.3	Der Umsortierpuffer	89
5.1.4	Der Schreibpuffer	92
5.1.5	Register	92
5.2	Interna des Pipeline-Simulators	93
5.3	Fallstudien	94
6	Sprungvorhersage	
6.1	Statische Vorhersage	98
6.2	Auswirkungen der Sprungvorhersage	100
6.3	Dynamische Vorhersage mit Zählern	105
6.4	Vorhersage unter Berücksichtigung der Vorgeschichte....	112
6.5	Implementierungsaspekte	115
6.6	Sprungvermeidung	116
6.7	Sprungvorhersage bei MMIX	117
7	Speichersysteme	
7.1	Die verschiedenen Speichertypen	121
7.1.1	Nicht-volatiler Speicher (ROM)	121
7.1.2	Dynamisches und statisches RAM	122
7.1.3	Neuere Entwicklungen (MRAM und FRAM)	123
7.1.4	Von der Speicherzelle zum Modul	123
7.1.5	Datentransfer	126
7.1.6	Die Modellierung von Speicher bei MMIX	130

7.2	Cache-Speicher	133
7.2.1	Speicher-Hierarchien	133
7.2.2	Cache-Organisation	135
7.2.3	Verdrängungsstrategien	138
7.2.4	Schreibende Cachezugriffe	141
7.2.5	Caches in der Praxis	142
7.2.6	Caches bei MMIX	143
8	Virtueller Speicher	
8.1	Organisation des virtuellen Speichers bei MMIX	153
8.2	Page Table Entries	155
8.3	Standardkonfiguration des Meta-Simulators	157
8.4	Page Table Pointer	158
8.5	Schnelle Adressumsetzung - Translation Lookaside Buffer	158
8.5.1	Translation Lookaside Buffer bei MMIX	160
8.5.2	Virtuelle Adressierung in der Praxis	160
9	Moderne Techniken zur Parallelverarbeitung	
9.1	Prozessorkopplung (Mehrprozessorsysteme)	165
9.2	Das MESI-Protokoll	165
9.3	Simultaneous Multithreading	168
9.4	Mehrkern-Prozessoren	170
9.5	Abschließende Wertung	170
A	Anhang	
A.1	Lösung der Übungsaufgaben	175
A.2	MMIX-Essentials	185
A.3	Beispielprogramme	187
A.3.1	Darstellung der Mandelbrotmenge	188
A.3.2	Quicksort	190
A.4	Die Visualisierungsumgebung für MMIX	195
A.5	Beispielkonfigurationsdatei für <code>mmix</code>	195
	Literaturverzeichnis	201
	Index	205