TEUBNER-TEXTE zur Informatik

Band 35

Dietmar Fey

Optik in der Rechentechnik

TEUBNER-TEXTE zur Informatik

Herausgegeben von

Prof. Dr. Johannes Buchmann, Darmstadt

Prof. Dr. Udo Lipeck, Hannover

Prof. Dr. Franz J. Ramming, Paderborn

Prof. Dr. Gerd Wechsung, Jena

Als relativ junge Wissenschaft lebt die Informatik ganz wesentlich von aktuellen Beiträgen. Viele Ideen und Konzepte werden in Originalarbeiten, Vorlesungsskripten und Konferenzberichten behandelt und sind damit nur einem eingeschränkten Leserkreis zugänglich. Lehrbücher stehen zwar zur Verfügung, können aber wegen der schnellen Entwicklung der Wissenschaft oft nicht den neuesten Stand der Entwicklung wiedergeben.

Die Reihe *TEUBNER-TEXTE zur Informatik* soll ein Forum für Einzel- und Sammelbeiträge zu aktuellen Themen aus dem gesamten Bereich der Informatik sein. Gedacht ist dabei insbesondere an herausragende Dissertationen und Habilitationsschriften, spezielle Vorlesungsskripten sowie wissenschaftlich aufbereitete Abschlussberichte bedeutender Forschungsprojekte. Auf eine verständliche Darstellung der theoretischen Fundierung und der Perspektiven für Anwendungen wird besonderer Wert gelegt. Das Programm der Reihe reicht von klassischen Themen aus neuen Blickwinkeln bis hin zur Beschreibung neuartiger, noch nicht etablierter Verfahrensansätze. Dabei werden bewusst eine gewisse Vorläufigkeit und Unvollständigkeit der Stoffauswahl und Darstellung in Kauf genommen, weil so die Lebendigkeit und Originalität von Vorlesungen und Forschungsseminaren beibehalten und weitergehende Studien angeregt und erleichtert werden können.

TEUBNER-TEXTE erscheinen in deutscher oder englischer Sprache.

Dietmar Fey

Optik in der Rechentechnik

Photonisches VLSI und optische Netzwerke

B. G. Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Fey

Geboren 1961 in Nürnberg. Von 1981 bis 1987 Studium der Informatik an der Universität Erlangen-Nürnberg mit Abschluss als Diplom-Informatiker. Von 1987 bis 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Angewandte Optik des Physikalischen Instituts der Universität Erlangen-Nürnberg. In dieser Zeit arbeitete im Sonderforschungsbereich Multiprozessorsysteme und Netzwerkkonfigurationen. 1992 Promovierter im Bereich CAD, Netzwerke und Datenbanken. Von 1994 bis 1999 wissenschaftlicher Assistent am Institut für Informatik der Universität Jena. Dort Leiter der Arbeitsgruppe „Paralleles Optisches Rechnen“. 1999 Habilitation, von 1999 bis 2000 Privatdozent und Vertretung eines akademischen Rates am Institut für Rechnerstrukturen der Universität-GH Siegen. Von 2000 bis 2001 Vertretung der C3-Professur an der Universität Jena. Seit 2002 Professor für Technische Informatik an der Universität

Arbeitsgebiete: Optik in der Rechentechnik, VLSI-Entwurf, Hardware/Software-Codesign, Optische Netzwerke für Cluster-Rechner.

1. Auflage August 2002

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2002

Der Verlag Teubner ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.

www.teubner.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Waren- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jeder benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

ISBN-13: 978-3-519-00338-0

e-ISBN-13: 978-3-322-86769-8

DOI: 10.1007/978-3-322-86769-8

Vorwort

Laut der im Auftrag der amerikanischen Regierung durchgeführten Studie "*Harnessing Light – Optical Sciences and Engineering for the 21st Century*" wird – etwas überspitzt formuliert – das 21. Jahrhundert zum Jahrhundert der Photonik werden, wie das 20. Jahrhundert das Jahrhundert der Elektronik war. Die Photonik, die Lehre von der Physik des Lichtes sowie seiner technischen Anwendungen, prägt dabei längst unser tägliches Leben. Man denke nur an den Einsatz optischer Technologien im Informations- und Kommunikationsbereich. Nach einem Bericht der *Deutschen Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert* werden schon heute 90% der in Deutschland bewegten Datenmengen über das Glasfasernetz der Bundesrepublik transportiert. Der Einsatz optischer Massenspeichermedien wie CD-ROM oder DVD ist nicht mehr wegzudenken. Kürzlich angekündigte Förderprogramme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung werden dazu beitragen, dass sich optische Technologien z.B. im Gesundheitswesen, in den Biowissenschaften, in der industriellen Fertigung und selbstverständlich auch in der Informations- und Kommunikationstechnik weiter verbreiten.

So ist es keine Vision, sondern nur eine Frage der Zeit, wann nahezu jeder Haushalt über einen Glasfaseranschluss verfügen wird. Der Siegeszug der optischen Übertragung von Daten in der Netzwerk- und Netzzugangstechnik wird auch vor der Rechentechnik nicht Halt machen, auch wenn derzeit die Optik mit Ausnahme der peripheren Speicher innerhalb der Rechner noch keine tragende Rolle innehat. Diese Einschätzung beruht auf der Tatsache, dass sich elektronische Verbindungen in der modernen Rechen- und Prozesstechnik zunehmend als der Schwachpunkt beim Streben nach höheren Leistungen erweisen. Dieses Buch zeigt auf, wie der Einsatz optischer Verbindungen in der VLSI- und Netzwerktechnik einen Ausweg aus den im Englischen mit "*interconnect crisis*" umschriebenen Schwierigkeiten bei den Verbindungen bietet. Dabei sei an dieser Stelle ausdrücklich betont, dass ein effizienter Einsatz optischer Verbindungen nicht ohne Einfluss auf die Architektur der Rechner und Prozessoren und der darin zum Einsatz kommenden Algorithmen bleiben kann.

Diese Themen - Technologie, Architektur und Algorithmen - sind Gegenstand des interdisziplinären Forschungsthemas "*Optik in der Rechentechnik*" und dieses Teubner-Textes. Das Buch verfolgt das Ziel, neben den Grundlagen auch den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet der Optik in der Rechentechnik zu vermitteln. Der Erfolg des Einsatzes optischer Verbindungen in der Rechentechnik hängt entscheidend ab von der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Physikern, Elektrotechnikern und Informatikern. Auch dazu soll dieses

Buch beitragen. Es versteht sich als interdisziplinäre Brücke zwischen Informatik, Optik und Elektronik. Es wendet sich an den Informatiker, der mehr über die Möglichkeiten der Optik in der Schaltkreis- und Netzwerktechnik wissen möchte, und auch an den Physiker und Ingenieur, der Genauerer über die Anwendung optischer und optoelektronischer Technologien in Architekturen erfahren will.

Forschungsinitiativen, die in der Vergangenheit auch für die "Optik in der Rechentechne" Bedeutung hatten, waren u.a. vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und von der Volkswagen-Stiftung geförderte Photonik-Programme. So basieren auch viele der in diesem Buch vorgestellten Themen auf Ergebnissen, die innerhalb eines von der Volkswagen-Stiftung unterstützten Forschungsprojektes "Binärer optoelektronischer Assoziativspeicher mittels Smart-Pixel-Technologien" in Zusammenarbeit einer Arbeitsgruppe des Autors mit Physikern und optischen Nachrichtentechnikern erzielt wurden. Ferner waren insbesondere für den in diesem Buch behandelten Themenkomplex Architektur und Algorithmen für optoelektronische Schaltkreise Ergebnisse entscheidend, die im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten und vom Autor geleiteten Projekts "3-D Smart-Pixels-Rechner" gewonnen wurden. Viele der im Buch getroffenen Aussagen zur Thematik "Optische Netzwerke für Cluster-Rechner" beruhen auf Untersuchungen, die von der Arbeitsgruppe des Autors im Rahmen von Drittmittelprojekten durchgeführt wurden, die Förderung durch das Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur und das Bundesministerium für Bildung und Forschung erhielten.

Dank sei an dieser Stelle an Prof. Dr. Werner Erhard, Universität Jena, Prof. Dr. Hartmut Bartelt, Institut für Physikalische Hochtechnologie, Jena, und Prof. Dr. Karl-Heinz Brenner, Universität Mannheim, für die Übernahme der Gutachten zu meiner Habilitationsschrift gerichtet, die eine der Grundlagen für dieses Buch bildet. Nicht vergessen bei der Danksagung möchte ich auch die Doktoranden Guido Grimm, Lutz Hoppe, Karl D. Maier, Thomas Meier von der Universität Jena und den Studenten André Flöpper von der Universität-GH Siegen, ohne deren Zusammenarbeit dieses Buch nicht zustande gekommen wäre. Dies gilt auch für Dr. Matthias Gruber und Prof. Dr. Jürgen Jahns von der FernUniversität Hagen, Dr. Ernst-Bernhard Kley von der Universität Jena und Dipl.-Phys. Margit Ferstl vom Heinrich-Hertz-Institut in Berlin für das Überlassen von Bildmaterial. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch Herrn Jürgen Weiß, Leipzig, und den Herausgebern der TEUBNER-TEXTE zur Informatik, insbesondere Prof. Dr. Gerd Wechsung, ohne deren Unterstützung dieses Buch nicht entstanden wäre. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch Sun Microsystems und dem Computerdienst Jena, die durch eine Anzeigenschaltung ebenfalls zum Zustandekommen dieses Buches beitrugen.

Inhalt

1	Motivation und Stand der Technik.....	9
1.1	Motivation	10
1.2	Entwicklung mikroelektronischer Schaltkreise	11
1.2.1	Von SSI zu VLSI	11
1.2.2	Die Verbindungskrise in der VLSI-Technik	13
1.3	Optische Verbindungen für die Rechentechnik	16
1.3.1	Optische Verbindungen zwischen Baugruppen	17
1.3.2	Optische Verbindungen auf Leiterplatten	20
1.3.3	Optische Verbindungen zwischen integrierten Schaltkreisen	23
1.4	Optische Digital-/Analogrechner	26
1.5	Stand der Technik	27
1.5.1	Optoelektronische Schaltkreise	28
1.5.2	Optische Verbindungstechnik	33
1.5.3	Optoelektronische Architekturen	34
1.5.4	Entwurfswerkzeuge für 3-D OE-VLSI	40
1.6	Optische Netzwerke	40
1.7	Kapitelübersicht	42
2	Einführung in die Technologie der Optik für die	44
	Rechentechnik	44
2.1	Grundlagen der VLSI-Technik	44
2.2	Grundlagen des CMOS-Schaltungsentwurfs	52
2.2.1	N- und P-Kanal-Transistoren	52
2.3	Passive optische Bauelemente zur Lichtwegeführung und -ablenkung	54
2.3.1	Diffraktive optische Elemente	55
2.3.2	Computergenerierte Elemente	57
2.3.3	Holographisch optische Elemente	63
2.3.4	Refraktive Strukturen	66
2.4	Basiselemente von OE-VLSI-Schaltkreisen	69
2.4.1	Physikalische Grundlagen: Absorption, spontane und stimulierte Emission	70
2.4.2	Optische Detektoren	70
2.4.3	Optische Sender	85
2.5	Integrationstechniken	94
2.5.1	Gesteckte Optik	95
2.5.2	Planare Optik	96
2.5.3	Faserfelder	99
3	Allgemeine Leistungsanalyse von 3-D OE-VLSI-Architekturen	102
3.1	Abstraktes Architekturmodell für 3-D OE-VLSI-Systeme	103
3.2	Mathematische Formeln für die parametrisierte Leistungsanalyse	106

4	Architekturbeispiele für effiziente 3-D OE-VLSI-Schaltkreise	113
4.1	Ein optoelektronischer superskalarer 3-D Prozessor für Ganzzahlarithmetik	114
4.1.1	Vorzeichenbehaftete Zahlendarstellung	115
4.1.2	Addition und Subtraktion	116
4.1.3	Realisierung der Multiplikation	117
4.1.4	Realisierung der Division	118
4.1.5	Rückkonvertierung einer SD-Zahl ins 2er-Komplement	120
4.1.6	Abbildung auf eine optoelektronische 3-D Architektur	121
4.1.7	Abschätzung der Rechenleistung	128
4.1.8	Erste Realisierung und Simulationsergebnisse	132
4.2	Optoelektronische 3-D Prozessoren für Festpunktarithmetik	134
4.2.1	CORDIC und Bitalgorithmen	136
4.2.2	Der verallgemeinerte CORDIC	140
4.2.3	Bitalgorithmen	142
4.2.4	Abbildung auf eine 3-D OE-VLSI-Architektur	146
4.3	Optisch rekonfigurierbare Hardware	154
4.3.1	Prinzipielle Vorteile optischer Verbindungen für dynamisch rekonfigurierbare Hardware	156
4.3.2	Beispiele für optoelektronisch rekonfigurierbare Hardware	159
4.3.3	OptoRAP – ein Konzept für eine dynamische rekonfigurierbare optoelektronische Parallelarchitektur	161
4.3.4	Mit OptoRAP emulierbare Architekturen	163
4.4	Ein optoelektronischer paralleler Bildverarbeitungsprozessor für Binärbilder	165
4.4.1	Die Operationen des Bildverarbeitungsprozessors	167
4.4.2	Architektur des Prozessorelements	176
4.4.3	Simulation und Logiksynthese des optischen Bildverarbeitungsprozessors	182
5	Optische Netzwerke	191
5.1	Physikalische Grundlagen optischer Netzwerke	192
5.2	Optischer Wellenlängenmultiplex	198
5.3	Komponenten eines optischen WDM-Netzwerkes	200
5.4	Architekturen optischer Netze	207
5.5	Routing-Verfahren in WDM-Ring-Netzen	211
	Literaturverzeichnis	215
	Index	226