

DISS. ETH NO. 21967

FPGA-Enhanced Data Processing Systems

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

LOUIS WOODS

MSc in Computer Science, ETH Zurich

born on 06.06.1978

citizen of Dättlikon, ZH, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gustavo Alonso, examiner
Prof. Dr. Donald Kossmann, co-examiner
Prof. Dr. Jens Teubner, co-examiner
Dr. Ken Eguro, co-examiner

2014

Abstract

It is roughly a decade ago that power consumption and heat dissipation problems forced the semiconductor industry to shift from a sequential to a parallel computing paradigm. However, exploiting parallelism in general-purpose parallel devices such as multi-core CPUs and GPGPUs is often difficult. Furthermore, in the prospect of *dark silicon*, it is questionable whether single programs can be executed on thousands of CPU cores (on the same die) in the near future. As a consequence, the performance increase of software due to newer general-purpose hardware is slowing down, which is also affecting databases and other data processing applications. This trend has led to the rise of so-called *data appliances*, which are specialized data processing engines, where software and hardware are shipped together in a closed box with tailor-made hardware components for specific application domains.

For such appliances, customized hardware is a promising approach to further increase performance in an energy-efficient manner. Given that it is becoming increasingly difficult to produce software that scales on general-purpose parallel hardware, the question is to what degree it is worthwhile to adapt hardware devices to particular problem domains, and what the implications thereof are. This dissertation explores enhancing data processing applications and systems with customized hardware. Our platform to build and test specialized hardware components is a *field-programmable gate array* (FPGA). An FPGA is a generic device that allows circuits to be loaded onto it after the FPGA has been manufactured and shipped. Using FPGAs, hardware approaches can be easily implemented and verified without actually fabricating a new silicon chip for every design change.

While FPGAs are a convenient tool to implement customized hardware, there are fundamental differences between *application-specific integrated circuits* (ASICs) and circuits designed for FPGAs. Hence, the first part of this dissertation covers key characteristics of FPGAs before discussing opportunities of using FPGAs to improve data-driven applications and systems. In the process, examples of applications that map well to FPGAs are presented, runtime-parameterization versus FPGA reprogramming is discussed, and effective on-chip communication patterns are illustrated. Moreover, tools and design patterns are presented to develop FPGA circuits that leverage the inherent parallelism of these massively parallel devices in a simple yet scalable way.

The second part of this dissertation focuses on full-fledged data processing systems that are enhanced with FPGAs. Many of the concepts of the first part of the dissertation will be revisited and applied to build complete systems such as a real-time complex event detection system, an FPGA-accelerated XQuery engine, or an intelligent storage engine for a relational database that increases performance and reduces energy consumption at the same time. Key topics of this second part are physical and logical system integration of FPGA-based accelerators and the interplay between customized hardware and software in co-designed hybrid systems. Furthermore, we present selected end-to-end results that we measured while running experiments on each of these systems.

Zusammenfassung

Vor ungefähr zehn Jahren hat die Halbleiterindustrie wegen exzessivem Stromverbrauch und der Hitzeentwicklung bei den damaligen Mikroprozessoren einen Paradigmawechsel von sequentieller hin zu paralleler Programmierung vollzogen. Bis heute ist es aber oftmals schwierig, Parallelität in Mehrzweck-Hardware wie Multikern-Prozessoren oder GPGPUs optimal zu nutzen. Des Weiteren scheint es in Anbetracht der aktuellen Debatte über “Dark Silicon” unwahrscheinlich, dass in naher Zukunft ein einzelnes Computerprogramm auf Tausenden von CPU-Kernen (auf demselben Chip) parallel ausgeführt wird. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Leistungssteigerung von Programmen durch neuere Generationen von Mehrzweck-Prozessoren abnimmt, was auch Datenbanken und andere Datenverarbeitungsanwendungen betrifft. Eine Konsequenz dieses Trends ist die zunehmende Popularität von sogenannten “Data Appliances”, spezialisierten Datenverarbeitungssystemen mit aufeinander abgestimmter Software und Hardware, die als geschlossene Einheit verkauft werden.

Für solche Systeme ist das Einsetzen von spezialisierter Hardware ein vielversprechender Ansatz, um die Leistung in einer energieeffizienten Art und Weise weiterhin steigern zu können. Da es immer schwieriger wird skalierbare Software für parallele Mehrzweck-Prozessoren zu programmieren, stellt sich folgende Frage: Inwiefern lohnt es sich, gezielt Hardwarekomponenten an bestimmte Aufgabenbereiche anzupassen und mit welchen Konsequenzen ist ein solches Vorgehen verbunden? In dieser Dissertation wird untersucht, wie man Datenverarbeitungsanwendungen durch spezialisierte Hardware verbessern kann. Massgeschneiderte Hardwarekomponenten können unter anderem mit Hilfe von “Field-programmable gate arrays” (FPGAs) angefertigt und getestet werden. FPGAs sind generische elektronische Bausteine, die nach der Fabrikation (re-)konfiguriert werden können, um eine beliebige Schaltung zu implementieren. Neue Hardware-basierte Ansätze können durch FPGAs einfach realisiert und verifiziert werden, ohne dass man dazu jedes Mal eine festverdrahtete elektronische Schaltung herstellen muss.

Mit FPGAs kann spezialisierte Hardware schnell und unkompliziert erstellt werden; es bestehen aber fundamentale Unterschiede zwischen festverdrahteten “application-specific integrated circuits” (ASICs) und Schaltungen, die für FPGAs entwickelt wurden. Deshalb behandelt der erste Teil dieser Dissertation Kernei-

genschaften der FPGA-Technologie und zeigt Möglichkeiten für den Einsatz von FPGAs zur Unterstützung von datenintensiven Anwendungen auf. Dabei werden wirksame Kommunikationsprotokolle für elektronische Bausteine innerhalb des FPGAs präsentiert, die Bedeutung der Konfigurierbarkeit von FPGAs im Vergleich zur Laufzeit-Parametrisierung diskutiert und verschiedene Beispiele von Anwendungen gezeigt, für die sich FPGAs eignen. Zudem werden Werkzeuge und Entwurfsmuster für das Erstellen von FPGA-Schaltungen vorgestellt, mit welchen die inhärente Parallelität von FPGAs auf einfache und skalierbare Weise ausgenützt werden kann.

Der zweite Teil dieser Dissertation konzentriert sich auf vollwertige Datenverarbeitungssysteme, die mit FPGAs ausgestattet sind. Viele Konzepte aus dem ersten Teil der Dissertation werden hier nochmals aufgegriffen und konkret angewendet, um komplette Systeme zu konstruieren, wie zum Beispiel ein System zur Echtzeiterkennung komplexer Ereignisse, ein FPGA-beschleunigtes XQuery-Anfragesystem oder eine intelligente Ablagespeicherung für relationale Datenbanken, welche die Leistung steigert und gleichzeitig Energie spart. Kernthemen dieses zweiten Teils der Dissertation sind die physikalische und logische Integration von FPGA-basierter Beschleunigungshardware in bestehende Systeme und das Wechselspiel zwischen spezialisierter Hardware und Software in hybriden Systemen. Zudem werden jeweils ausgewählte Experimente und Resultate für die oben erwähnten End-zu-End-Systeme präsentiert.