

FPGAs in der Cloud: Integration und Bereitstellung von rekonfigurierbaren Hardware-Ressourcen in einer Cloud-Infrastruktur

Oliver Knodel, Rainer G. Spallek

Institut für Technische Informatik, Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

oliver.knodel@tu-dresden.de

Kurzfassung

Cloud-Computing findet eine immer weitere Verbreitung und hat mittlerweile eine große wirtschaftliche Bedeutung. Durch die flexible Bereitstellung von Ressourcen und Diensten kann eine deutliche Kostenersparnis auf Nutzerseite erreicht werden. Die Einsatzgebiete reichen hierbei von einfachen Web-Technologien und Datenspeichern über komplexe Geschäftsprozesse bis hin zu datenintensiven wissenschaftlichen Anwendungen.

Auch im Bereich von Systementwurf und -analyse gewinnt die Auslagerung komplexer Synthese- und Simulationsprozesse in eine Cloud zunehmend an Bedeutung. Insbesondere beim Entwurf von Anwendungen für die immer größer werdenden programmierbaren Schaltkreise werden leistungsfähige Synthese- und Simulationssysteme benötigt. Neben der einfachen Auslagerung von Synthese und Simulation ist in vielen Fällen auch der Test auf einer realen Hardware, wie einem FPGA, von großer Bedeutung.

Die Investitionskosten für FPGAs als Plattform für Prototypen, welche zum Teil nur über einen kurzen Zeitraum genutzt werden, werden durch eine Integration dieser Komponenten in eine Cloud vermieden. Dieser Beitrag erläutert, wie rekonfigurierbare Schaltkreise in eine Cloud-Infrastruktur eingebettet werden können, um die Ressource FPGA als Service bereitstellen zu können und somit den gesamten Prozessablauf von der Synthese über die Simulation bis hin zum Test auf der realen Hardware als on-demand Dienst anzubieten. Darauf aufbauend soll es ebenfalls möglich sein, den FPGA als Hardwarebeschleuniger einzusetzen. Eine flexible Einbettung des FPGAs in die Architektur ist daher wesentlicher Bestandteil dieses Beitrages.

1 Einleitung

Auf vielen Gebieten wird zunehmend auf Cloud-Dienste zurückgegriffen. Da eine Cloud-Infrastruktur auf einfachem Wege und jederzeit einen Zugang zu den aktuell benötigten Ressourcen bereitstellt, können die Investitionskosten in eigene IT-Systeme signifikant reduziert werden. Durch die Umsetzung des Utility Computing [1], bei dem die jeweils aktuell benötigte Menge an Ressourcen bereitgestellt und abgerechnet wird, ist das Cloud-Computing von großer wirtschaftlicher Bedeutung für viele kleine und mittelständische Unternehmen, aber ebenso für Forschungseinrichtungen [2].

Im Bereich von Systementwurf und -analyse ist die Auslagerung komplexer Synthese- und Simulationsprozesse in eine Cloud von zunehmender Bedeutung. Die Arbeit mit erheblichen Datenmengen und einer Vielzahl von Parametern oder die Untersuchung unterschiedlicher Varianten erfordert, dass Prozessor- und Speicherressourcen praktisch unbegrenzt zur Verfügung stehen, ohne dass die Investitionskosten in die dafür erforderliche Hardware beim eigentlichen Nutzer liegen.

Neben einer einfachen Auslagerung von Synthese und Simulation ist auch der Test auf der realen Hardware von großer Bedeutung. Daher ist es naheliegend diesen Test auf rekonfigurierbaren Schaltkreisen wie Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs), ebenfalls in die Cloud auszulagern. Beim Testen von Prototypen auf realer Hardware entstehen erhebliche Investitionskosten, obwohl

die Hardware nur für einen begrenzten Zeitraum benötigt wird. Durch eine Integration von FPGAs in eine Cloud können dem Nutzer die benötigten Ressourcen in beliebiger Größe und Menge bereitgestellt werden, ohne dass dieser in neue Hardware investieren muss.

Der Entwurf eines System-on-Chip (SoC) oder eines vollständigen Prozessors und dessen anschließender Test auf realer Hardware mit unterschiedlichen Parametern erfordert viel Zeit, wenn nur eine einzelne Testplattform zur Verfügung steht. Da mittels einer Cloud Ressourcen in deutlich größerem Umfang angeboten werden können, ist eine Parallelisierung dieser Vorgänge und damit eine erhebliche Zeitersparnis möglich. Die Anschaffung dieser Menge an Hardware für einen einmaligen Test hingegen ist wirtschaftlich oft nicht vertretbar. Darauf aufbauend ist es möglich, den FPGA auch als Hardwarebeschleuniger für eine Vielzahl von Anwendungen einzusetzen. Die Einbettung des FPGAs in eine sinnvolle Infrastruktur ist ein weiterer wesentlicher Bestandteil dieses Beitrages.

In Abschnitt 2 dieses Beitrages wird der aktuelle Einsatz von Hardwarebeschleunigern und FPGAs in Computing-Clouds beschrieben. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3 die angestrebte Architektur vorgestellt, bevor in Abschnitt 4 verschiedene Einsatzgebiete für diese Cloud-Architektur erläutert werden. Abschnitt 5 gibt einen Ausblick.

2 Überblick – Clouds und FPGAs

Das Auslagern von Synthese- und Simulationsprozessen in eine Cloud, welche einen flexiblen und hoch skalierbaren Zugang zu verschiedenen Entwurfs- und Analysewerkzeugen ermöglicht, bieten bereits seit längerem unterschiedliche kommerzielle Anbieter auf Basis der Amazon Webservices an [3]. Hierbei reicht eine einfache Infrastruktur mit hoher Rechen- und Speicherkapazität aus, um insbesondere bei umfangreichen Entwürfen und zahlreichen Parametervariationen die erforderliche Leistung bereitzustellen. Neben der Infrastruktur, ist auch das Bereitstellen einer Plattform mit den erforderlichen Werkzeugen und der Software zum Systementwurf notwendig (SaaS – Software as a Service).

In Abschnitt 2.1 wird auf die Integration spezieller Hardware in Cloud-Systeme eingegangen. Bevor in Abschnitt 3 die angestrebte Integration von FPGAs vorgestellt wird, erläutert Abschnitt 2.2 zunächst übliche FPGA-Plattformen und ihre unterschiedlichen Anforderungen.

2.1 Hardwarebeschleuniger in der Cloud

In Anwendungen, die eine hohe Rechenleistung erfordern und einfach zu parallelisieren sind, werden häufig Grafikkarten (GPUs) eingesetzt, um die Verarbeitungsgeschwindigkeit und den Datendurchsatz zu erhöhen. Viele Computing-Clouds bieten dem Nutzer mittlerweile solche Infrastrukturen (IaaS – Infrastructure as a Service) mit Grafikkarten als Hardwarebeschleuniger an [4], [5]. Im Bereich des Hochleistungsrechnens (HPC) gewinnt die Bereitstellung der reinen HPC-Infrastruktur für die Entwicklung eigener Anwendungen ebenfalls immer mehr an Bedeutung (HPCaaS – HPC as a Service [6]).

FPGAs werden in Rechenzentren ebenfalls als Hardwarebeschleuniger für spezielle Anwendungen mit einfachen Datenstrukturen und Programmflüssen eingesetzt, wie beispielsweise für einfache Datenbank-Anfragen [7]. Der Grund für den Einsatz von FPGAs liegt hierbei, neben der Verarbeitungsgeschwindigkeit, im Wesentlichen beim vergleichsweise geringen Energieverbrauch gegenüber Grafikkarten und Prozessoren. Für Cloud-Dienste ist es des Weiteren möglich, FPGAs zur Anonymisierung der Nutzeranfragen einzusetzen [8]. Die direkte Bereitstellung der eigentlichen Ressource FPGA wird derzeit jedoch nicht angeboten.

2.2 FPGA-Systeme und -Architekturen

Um eine Architektur zu entwickeln, welche FPGAs flexibel für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle in eine Cloud integriert, wird im Folgenden eine Auswahl an Anwendungen und der dazugehörigen Konfiguration der Plattform betrachtet.

Ein Haupteinsatzgebiet für FPGAs stellt das Prototyping von SoCs oder einfachen Prozessoren dar. Dabei wird deren grundlegendes Verhalten sowie Funktionsweise auf der rekonfigurierbaren Hardware getestet. Die Kommunikation zwischen dem FPGA und der Analysesoftware auf einem Host-System erfolgt über eine Schnitt-

stelle wie Gigabit-Ethernet oder PCIe. Abbildung 1a zeigt ein solches System, bestehend aus einem Prozessor, welcher direkt mit einem FPGA gekoppelt ist. Durch die Nähe zum Host-Prozessor kann der FPGA in einem solchen System ebenfalls als Hardwarebeschleuniger für Anwendungen eingesetzt werden, die eine hohe Datenrate zwischen Prozessor und Beschleuniger benötigen [9].

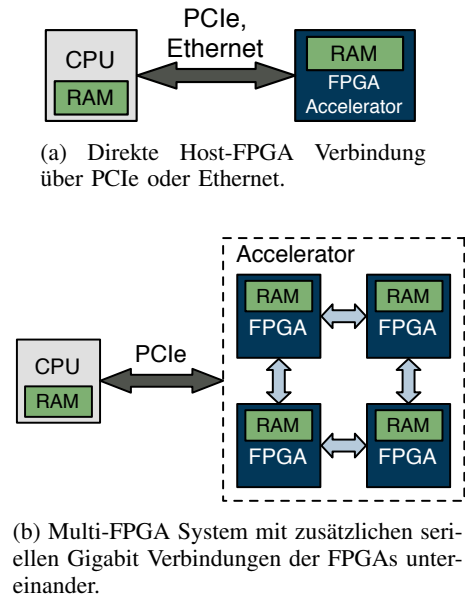


Bild 1: Häufig genutzte Systemkonfigurationen für FPGAs als Hardwarebeschleuniger oder als Prototyping Plattform.

Beim Entwurf von Prozessoren mit mehreren Kernen oder komplexeren Systemen ist ein einzelner FPGA oftmals nicht ausreichend. Statt dessen werden mehrere eng miteinander gekoppelte FPGAs zum Testen der Hardware benötigt, wie Abbildung 1b zeigt [10], [11]. Die Verbindung zum Host-Prozessor ist bei derartigen Systemen zu vernachlässigen. Entscheidend ist vielmehr die Kommunikation zwischen den FPGAs untereinander.

Für eine flexible Cloud-Architektur ist ein Ansatz erforderlich, der einerseits eine unabhängige Nutzung einzelner Prozessor/FPGA-Knoten zulässt und so mehrere Nutzerentwürfe oder Parametervarianten auf den FPGAs parallel abarbeiten kann, aber andererseits auch umfangreiche Entwürfe über mehrere FPGAs erlaubt.

3 Integration von FPGAs in eine Cloud-Infrastruktur

Die angestrebte Cloud-Architektur setzt sich aus unterschiedlichen Clustern zusammen, welche hybride Rechenknoten bestehend aus Prozessoren und FPGAs benötigt. Diese Cluster werden in Abschnitt 3.1 beschrieben. Das erforderliche Grunddesign auf dem FPGA wird in Abschnitt 3.2 vorgestellt. Anschließend wird die Gesamtarchitektur aus Top-Level Sicht in Abschnitt 3.3 beschrieben. Ein Überblick über die erforderlichen Softwareschichten gibt Abschnitt 3.4.

3.1 Architektur eines Clusters

Ein Cluster fasst die Charakteristiken der beiden in Abschnitt 2.2 vorgestellten Systeme, in einer Architektur zusammen [12]. Die kleinste Komponente ist ein Rechenknoten (Node), bestehend aus einem Prozessor welcher mittels PCIe mit einem FPGA gekoppelt ist.

Vier oder acht dieser Rechenknoten können zu einem Cluster zusammengefasst werden, wobei die Prozessoren über ein Verbindungsnetzwerk gekoppelt sind. Die Besonderheit der Architektur, welche sie von anderen Systemen unterscheidet, besteht in der separaten Verbindung der FPGAs untereinander über serielle Kanäle mit einer Datenrate von bis zu 40 GBit/s (siehe Abbildung 2). Dadurch können auch komplexe Entwürfe getestet werden, welche den Einsatz spezieller Multi-FPGA Karten erfordern würden. Die Verwaltung und der Zugang zu einem Cluster erfolgt über einen Serviceknoten.

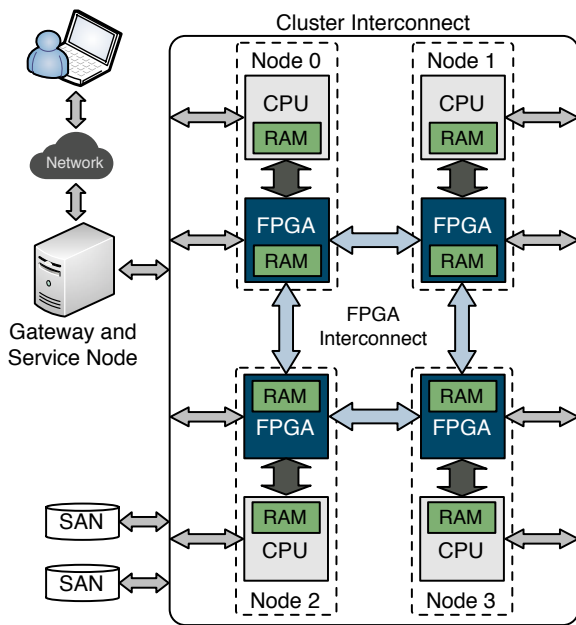


Bild 2: Systemarchitektur eines Clusters innerhalb der Cloud mit vier Knoten. Jeder Knoten besteht aus einem Host-Prozessor und einem FPGA. Die FPGAs sind über ein separates Netzwerk untereinander verbunden. Der Zugang und die Verwaltung eines Clusters erfolgt über einen Serviceknoten.

Für die Integration in eine Cloud stellt die Elastizität der Ressourcen ein wesentliches Kriterium dar. Innerhalb eines Clusters können einem Nutzer bis zu acht Rechenknoten zugeteilt werden. Bei kleineren Allokationen ist innerhalb eines Clusters ein Betrieb mit maximal acht unterschiedlichen Nutzern, die jeweils nur einen FPGA benötigen, möglich. Abbildung 6 zeigt ein Cluster mit vier Rechenknoten und unterschiedlichen Nutzern. Die von ihnen jeweils genutzten Ressourcen sind durch die unterschiedlichen Farben gekennzeichnet.

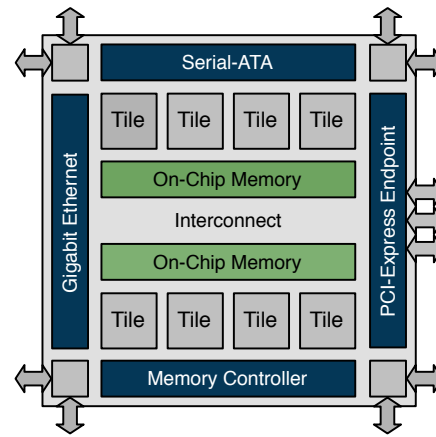


Bild 3: Architektur des FPGA-Designs mit Schnittstellen zu Host, Memory Controller und den anderen FPGAs.

3.2 FPGA-Grunddesign

In einer Architektur mit fest in das System eingebetteten FPGAs, ist es erforderlich, sowohl auf dem FPGA als auch auf dem Host-System die erforderlichen Schnittstellen in Hardware beziehungsweise in Software bereitzustellen. Abbildung 3 zeigt das vorgegebene Design auf dem FPGA.

Die Verbindung zum Host-System erfolgt über PCIe. Die Schnittstellen lassen dabei auf Seiten des FPGAs Statusabfragen von internen Registern sowie Blocktransfers in Speicherbereiche zu. Über einen Speichercontroller kann weiterhin mit dem bis zu 8 GByte großen Hauptspeicher auf dem FPGA-Board kommuniziert werden. Die Schnittstellen zu den paketbasierten Verbindungen zwischen den FPGAs sind ebenfalls vorkonfiguriert. Mittels einer partiellen Rekonfiguration kann der Nutzer seinen Entwurf direkt auf den FPGA übertragen und die vorgefertigten Schnittstellen nutzen.

3.3 Top-Level Schicht

Ein einzelner Cluster kann als Cloud mit bis zu acht Knoten eingesetzt werden. Zugang und Verwaltung erfolgen in diesem Fall über den Serviceknoten. Die Verbindung mehrerer Cluster über ein Netzwerk erfolgt ebenfalls über die Serviceknoten der einzelnen Cluster. Diese wiederum werden bei einer solchen Konfiguration von einem zentralen System zum Management der gesamten Cloud-Infrastruktur verwaltet. In diesem Fall können sich die einzelnen Cluster in verschiedenen Rechenzentren befinden. Abbildung 4 zeigt die Top-Level-Architektur mit zentralem Management-System und zwei Clustern.

3.4 Integration der Software

Um die Cloud zu verwalten und die notwendigen Schnittstellen für die Arbeit mit der Hardware anzubieten, sind mehrere Software-Schichten notwendig. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Schichten, welche in zwei funktionale Bereiche eingeteilt werden können.

Die Management-Ebene ist für die Verwaltung der verteilten Ressourcen (bei mehreren Clustern) zuständig

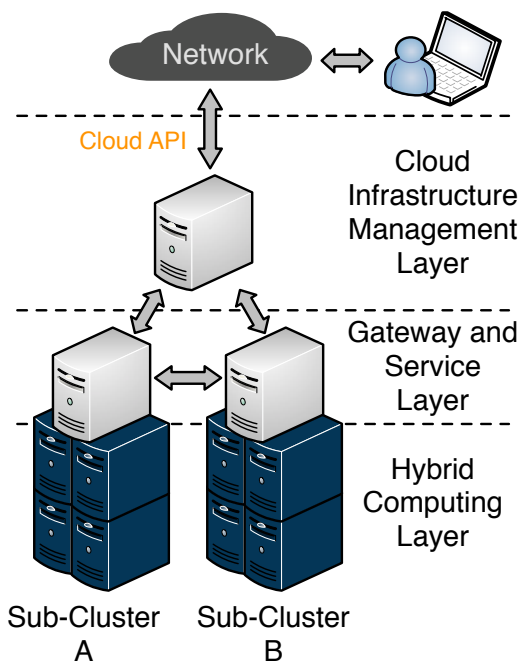


Bild 4: Cloud-Infrastruktur mit zwei Rechenzentren und den erforderlichen Ebenen, welche die Verwaltung der gesamten Infrastruktur sowie der Teilkomponenten beinhalten.

und stellt die Nutzerschnittstelle (Cloud-API) bereit. Die Management-Ebene beinhaltet ebenfalls die Authentifizierung der Nutzer und die Verschlüsselung der Datentransfers. Die Verteilung der Nutzer-Anfragen (Jobs) erfolgt über ein zweistufiges Batch-System. Die Management-Ebene stellt hierbei die erste Stufe dar und verteilt die Jobs auf die Cluster.

Die zweite Stufe des Batch-Systems befindet sich auf dem Serviceknoten der einzelnen Cluster und verteilt die Jobs auf die Rechenknoten. Ein Job beinhaltet hierbei entweder die erforderlichen Kommandozeilenbefehle in

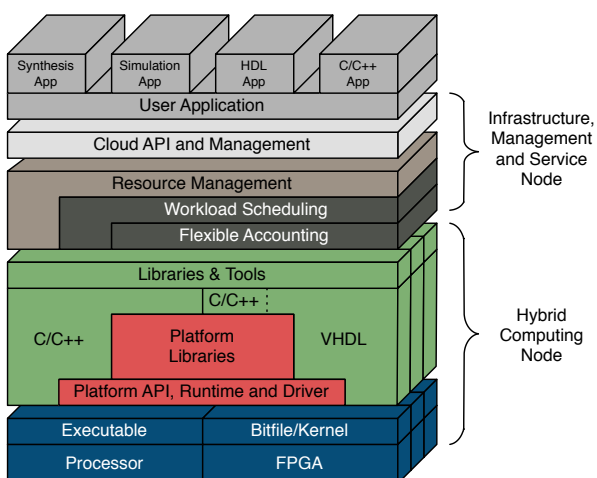


Bild 5: Software-Komponenten innerhalb der Cloud-Architektur, verteilt auf Service- und Rechenknoten.

einer Batch-Datei oder die Anforderung einer kompletten Virtuellen Maschine mit den erforderlichen Ressourcen. Bei kleinen Systemen, die nur aus einem Cluster bestehen, übernimmt der Serviceknoten des Clusters die vollständige Verwaltung und bietet die Nutzerschnittstelle an (oberer Bereich in Abbildung 5).

Die Rechenknoten bilden den unteren Bereich in Abbildung 5. Neben den eigentlichen Entwurfs- und Analysewerkzeugen befinden sich hier die erforderlichen Bibliotheken und Treiber, um eine Interaktion mit den FPGAs zu ermöglichen. Dazu gehören beispielsweise die Rekonfiguration und die Kommunikation mit dem Entwurf auf dem konfigurierten FPGA. Der Nutzer hat auf dieser Ebene nur Zugang zu höheren Schichten und muss sich nicht mit der konkreten Hardware im Detail auseinandersetzen.

Eine entscheidende Anforderung besteht in der Sicherheit der Daten und dem Schutz des Know-Hows über sämtliche Ebenen hinweg [13]. Um dieses zu gewährleisten werden sowohl die Kommunikation als auch die gesamten Nutzerdaten verschlüsselt.

4 Einordnung und Einsatzgebiete

Die Hauptanwendung, für welche die Cloud konzipiert ist, bildet der Systementwurf mit den Prozessen Synthese, Simulation und Test. Des Weiteren ist es möglich, die FPGAs als reine Hardwarebeschleuniger zu nutzen. Im Folgenden werden die Einsatzgebiete und potentiellen Anwendungen über das Servicemodell nach [14] erläutert.

4.1 SaaS – Software as a Service

Werden die für den Systementwurf notwendigen Anwendungen wie Synthesewerkzeuge und Simulatoren genutzt, ist die Cloud als Anbieter von reinen Services einzuordnen (SaaS). Des Weiteren ist es aber möglich, die FPGAs als Hardwarebeschleuniger für weitere Dienste einzusetzen, so dass sie für den eigentlichen Nutzer des Dienstes nicht sichtbar sind.

4.2 PaaS – Platform as a Service

Beim Test realer Hardware sowie bei der Entwicklung von Software auf den bereitgestellten Schnittstellen wird die Anwendung vom Nutzer in der Cloud entwickelt. Somit kann bei der Arbeit mit eigenen Entwürfen auf dem FPGA auch die Bereitstellung der Plattform als Service bezeichnet werden (PaaS).

4.3 IaaS – Infrastructure as a Service

Ausschließlich die Infrastruktur als Service anzubieten ist prinzipiell möglich, aufgrund der komplexen Einbettung des FPGAs in das Betriebssystem aber nur für spezielle Anwendungen erforderlich, die einen tieferen Eingriff in das System erfordern.

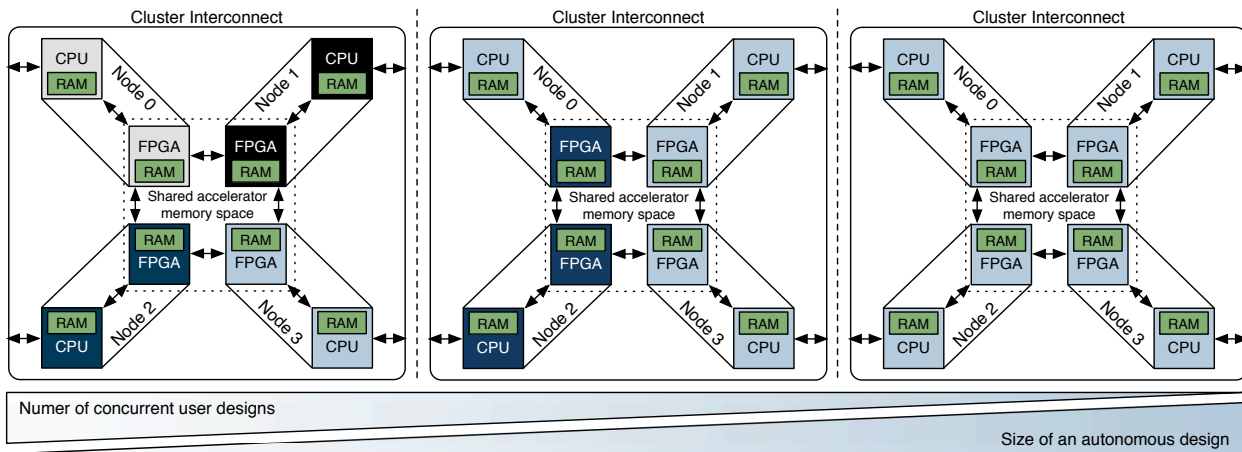


Bild 6: Hybride Multi-FPGA Plattform mit unterschiedlicher Belegung der Ressourcen. Konfiguration mit mehreren kleinen Designs (links) und mit einem großen Design verteilt über vier FPGAs (rechts). Die Farben repräsentieren die Nutzer und die ihnen zugeteilten Ressourcen.

5 Zusammenfassung

Die Integration rekonfigurierbarer Hardware in eine Cloud-Infrastruktur ist für viele komplexe Entwürfe und deren anschließenden Test auf realer Hardware von großer Bedeutung. Die vorgestellte Cloud-Architektur ist flexibel, skalierbar und kann in der Menge der Ressourcen an die unterschiedlichsten Anforderungen der Nutzer elastisch angepasst werden. Ebenso wird beim Betrieb mit mehreren Nutzern eine möglichst hohe Auslastung der Ressourcen ermöglicht. Die Anforderungen verbreiteter FPGA-Plattformen werden in einem einzigen System zusammengefasst, so dass zahlreiche Konfigurationen ermöglicht werden. Des Weiteren werden auf unterer Ebene die Schnittstellen auf Hardware- sowie Softwareseite bereitgestellt.

Das System kann durch seine modulare Architektur einfach erweitert und ebenso auf räumlich getrennte Rechenzentren verteilt werden. Aus Sicht des Nutzers werden ähnliche Schnittstellen angeboten wie bei anderen Computing-Clouds [15].

Durch den Zugriff auf FPGA-Ressourcen beliebiger Anzahl und Größe können Unternehmen und wissenschaftliche Einrichtungen Anschaffungskosten sparen und die Hardware kann durch die zentrale Bereitstellung für verschiedenste verteilte Nutzer effizient ausgelastet werden. Ähnlich wie High Performance Computing as a Service (HPCaaS) kann analog dazu von Reconfigurable Computing as a Service (RCaaS) gesprochen werden.

Literatur

- [1] S. L. Garfinkel, *Architects of the Information Society: Thirty-Five Years of the Laboratory for Computer Science at MIT*. The MIT Press, 1999.
- [2] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica et al., "A view of cloud computing," *Communications of the ACM*, vol. 53, no. 4, pp. 50–58, 2010.
- [3] Plunify Pte Ltd, "Simplify your chip design," September, 2013. [Online]. Available: <http://www.plunify.com>
- [4] W. Zhu, C. Luo, J. Wang, and S. Li, "Multimedia cloud computing," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 28, no. 3, pp. 59–69, 2011.
- [5] F. Giunta, R. Montella, G. Laccetti, F. Isaila, and F. Blas, "A gpu accelerated high performance cloud computing infrastructure for grid computing based virtual environmental laboratory," *Advances in Grid Computing*, 2011.
- [6] V. Mauch, M. Kunze, and M. Hillenbrand, "High performance cloud computing," *Future Generation Computer Systems*, 2012.
- [7] L. Woods, Z. István, and G. Alonso, "Hybrid fpga-accelerated sql query processing."
- [8] K. Eguro and R. Venkatesan, "Fpgas for trusted cloud computing," in *Field Programmable Logic and Applications (FPL), 2012 22nd International Conference on*. IEEE, 2012, pp. 63–70.
- [9] O. Knodel et al., "Next-generation massively parallel short-read mapping on FPGAs," in *Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), 2011 IEEE International Conference on*. IEEE, 2011.
- [10] J. Wawrzynek et al., "RAMP: Research accelerator for multiple processors," *Micro, IEEE*, vol. 27, no. 2, 2007.
- [11] R. Sass et al., "Reconfigurable computing cluster (RCC) project: Investigating the feasibility of FPGA-based petascale computing," in *Field-Programmable Custom Computing Machines, 2007. FCCM 2007. 15th Annual IEEE Symposium on*. IEEE, 2007.
- [12] O. Knodel and R. Spallek, "Integration of a multi-fpga system in a common cluster environment," *The International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, 2013.
- [13] M. Hansen, "Datenschutz im cloud computing," in *Daten- und Identitätsschutz in Cloud Computing, E-Government und E-Commerce*. Springer, 2012, pp. 79–95.
- [14] P. Mell and T. Grance, "The nist definition of cloud computing (draft)," *NIST special publication*, vol. 800, no. 145, p. 7, 2011.
- [15] The OpenStack project, "Open source software for building private and public clouds," September, 2013. [Online]. Available: <http://www.openstack.org>