

Auf dem Weg zum Superchip

NEUE SIMULATIONSTECHNIKEN

BEIM ENTWURF MIKROELEKTRONISCHER SCHALTANLAGEN

Die rasante Entwicklung der Technologie scheint das exponentielle Wachstum in der Mikroelektronikbranche zu garantieren.

Aber können wir das technologisch Machbare überhaupt umsetzen? Können wir

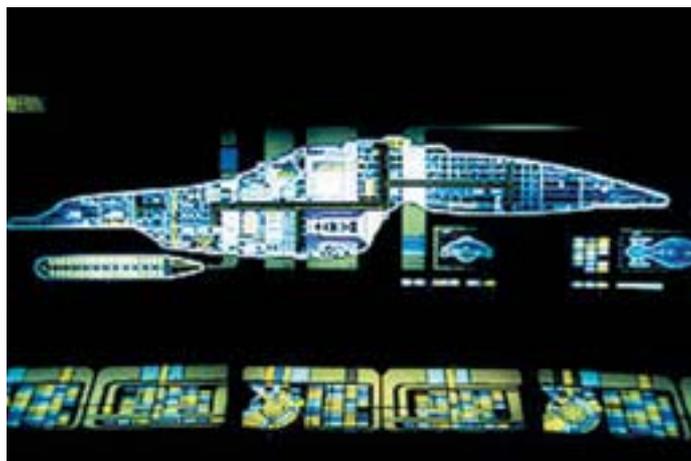
die Superchips der Zukunft überhaupt entwerfen?

Der Artikel der Autoren vom Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme

diskutiert die Entwurfsflücke – das Dilemma der Mikroelektronik – und zeigt zwei Wege zur

Überwindung der Krise auf:

Emulation (1000 mal schnellere Simulation) und die Formale Verifikation (Beweisen statt Simulieren).



Alle drei Jahre vervierfacht sich die Kapazität bei den Speicherchips. Alle zwei Jahre verdoppelt sich die Taktfrequenz beim Mikroprozessor. Die rasante Entwicklung der Technologie scheint das exponentielle Wachstum in der Mikroelektronikbranche zu garantieren. Aber können wir das technologisch Machbare überhaupt umsetzen? Können wir die Superchips der Zukunft überhaupt entwerfen?

Mikroelektronik macht aus Fiktion Realität

Die Voyager, unterwegs in fernen Galaxien, gerät in Kontakt mit einem unbekanntem Raumschiff. »Computer,« sagt Käpt'n Janeway, »auf den Schirm!« Der Bordcomputer der Voyager zeigt das Raumschiff auf einer Projektionsfläche im vorderen Bereich der Brücke ...

Die technische Entwicklung der heutigen Raumfahrt ist von der fiktiven Szene aus STAR TREK noch sehr weit entfernt. Die von den Autoren der Science-Fiction-Serie postulierte Sprachsteuerung ist aber schon heute ein Massenprodukt – dank der rasanten Entwicklung in der Mikroelektronik.

Mikroelektronikprodukte im Umfeld der Computer stehen im Blickpunkt der Öffentlichkeit.

Man unterhält sich in Hannover, der Heimatstadt des Heise-Verlages, genauso selbstverständlich über die neuen Mikroprozessorgenerationen wie über die aktuellen Erfolge der »Roten« im Wettkampf um den Aufstieg in die erste Liga.

Andere Mikroelektronikprodukte verrichten ihre Aufgaben unauffällig im Hintergrund. Im Automobil werkeln heutzutage an die 50 Mikrocontroller, um die Bremsen zu

steuern, die Benzineinspritzung zu regeln oder beim Unfall die Gurte zu straffen. Der Waschvorgang in einer Waschmaschine wird selbstverständlich durch einen Prozessor gesteuert, obwohl das gewünschte Waschprogramm wie vor 30 Jahren durch das geliebte einrastende Stellrad gewählt wird.

Zurück zu Käpt'n Janeway: »Zoom auf Raumschiff und technische Daten einblenden!« Der Bildschirm flimmert, das Bild verschwindet. Dann sagt eine freundliche Stimme: »Fehler im System aufgetreten, gehe zurück auf Vollbild.« Jedem STAR TREK-Fan ist sofort klar, dass die »Borg« sich in das System eingeschleust haben und die »Assimilierung« der Voyager vorbereiten.

Aus heutiger Sicht ist allerdings die Annahme viel realistischer, dass ein Problem dieser Art durch einen Software-, oder schlimmer, durch einen Hardware-Fehler verursacht wird.

Die Vermeidung von Fehlern ist beim Entwurf eines Systems mit mikroelektronischen Komponenten von immenser Bedeutung.

Der Mensch, der das System entwirft, ist immer noch die größte Fehlerquelle. Da Menschen in ihren Fähigkeiten viel zu begrenzt sind, als dass sie in der Lage wären, etwas so Komplexes wie einen Mikrochip zu überblicken, werden für den Entwurf von Mikrochips Werkzeuge benötigt.

Die Werkzeuge (englisch: tools) sind – wie könnte es anders sein – Computerprogramme.

Die enormen Fortschritte bei der Entwicklung der Mikroelektronik wären nicht möglich ohne die begleitende Entwicklung von Entwurfswerkzeugen zur Automatisierung des Chipentwurfs. Die EDA-Branche (EDA steht für Electronic Design Automation) entwickelt und vermarktet diese Werkzeuge – Computerprogramme zum Entwurf von Computerchips.

Doch durch die rasante technologische Entwicklung hat eben diese EDA-Branche ein Problem:

Die Entwurfslücke

Alle, die sich mit Mikroelektronik beschäftigen, bewegt die Frage: Wie geht es weiter – können wir das exponentielle Wachstum, das seit mehr als 30 Jahren anhält, fortsetzen?

Wir sehen ziemlich deutlich, dass weitere Fortschritte in der Fertigungstechnologie den bisher Jahr für Jahr erreichten Komplexitätsanstieg von ca. 50 Prozent für weitere 15 Jahre möglich machen werden. Die Chips müssen allerdings, bevor sie gefertigt werden können, entworfen werden und dies – bei kleiner werdenden Produktlebenszyklen – in immer kürzeren Zeiten.

Werden wir möglicherweise bald den Punkt erreichen, an dem wir sagen »Wir könnten die Superchips zwar fertigen, aber in vertretbarer Zeit entwerfen können wir sie leider nicht!«? Das wäre dann etwa so, als könnte ein Konzern ein Bürogebäude für eine Million Menschen bauen und alle Arbeitsplätze mit motivierten Mitarbeitern füllen, diese würden aber nicht produktiv arbeiten, weil es keine Konzepte für den Informationsfluss, das Management oder die Verwertung der Arbeitsergebnisse für so viele Menschen gibt.

Die Lösung des Problems, das auch als Entwurfslücke (Design Gap) bekannt ist, kann nur durch eine drastische Steigerung der Entwurfsproduktivität gelingen.

Wir müssen die Werkzeuge, also die Entwurfsprogramme besser machen, um die Produktivität steigern zu können.

»First Time Right«

Eines der wichtigsten Ziele eines Chip-Entwicklungsteams ist: »First Time Right«, also der sofortige Entwicklungserfolg.

Das Schlimmste, was einem Entwickler-Team passieren kann, ist das Re-Design. Der Chip durchläuft den komplet-

Nicht erst seit dem Pentium-Bug haben die Mikroelektronikindustrie und die staatlichen Fördergeber erkannt, dass neben der Forschung im Bereich der Halbleiterfertigung auch Investitionen im Bereich der Entwurfsautomatisierung sinnvoll und notwendig sind.

Die Abteilung Entwurfsautomatisierung des Instituts für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme betreibt angewandte und auch grundlegende Forschung auf diesem Gebiet.

Prof. Erich Barke und seine wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter rücken schon seit mehr als einem Jahrzehnt der Entwurfslücke zu Leibe.



ten Entwurfsprozess von der Idee bis zum fertigen Prototyp und – funktioniert nicht. Einige hundert Kilo-Euro und einige Monate Entwicklungszeit sind verloren.

Die aufwendigsten (und auch teuersten) Komponenten in einer Chip-Entwicklungsumgebung dienen deshalb einzig und allein der Absicherung des jeweils erreichten Entwurfszustands des Chips durch Simulationstechniken.

Wie teuer ein unerkannter Fehler werden kann, musste 1994 die Firma Intel schmerzlich erfahren. Der berühmt gewordene Pentium-Bug bescherte dem Marktführer einen Ergebnisverlust von geschätzten 500 Millionen Dollar.

Für die ganze Bandbreite der behandelten Themen ist an dieser Stelle kein Platz.

In den beiden folgenden Beiträgen konzentrieren wir uns daher auf zwei Ansätze aus dem Bereich der fortschrittlichen Simulationstechniken, die auch im Rahmen des CIS (ForschungsZentrum für Integrierte Simulation) bearbeitet werden: die Emulation digitaler Chips und die formale Verifikation analoger Komponenten.

ENTWURFSLÜCKE IN ZAHLEN

Die Grafik verdeutlicht die Dimensionen des Problems. Eigentlich sind die Erfolge der Entwurfsautomatisierung recht beachtlich.

So konnte in den vergangenen Jahrzehnten die Designproduktivität jedes Jahr um etwa 20 Prozent gesteigert werden, verglichen mit traditionellen Branchen ein herausragender Wert. Gemessen an den 50 Prozent Komplexitätszuwachs, den die Technologie bereitstellt, ist dieser Fortschritt jedoch völlig unzureichend.

Die Entwicklung eines leistungsfähigen Standardchips erfordert heute einen Entwicklungsaufwand von ca. 5 bis 10 Millionen Euro. Wird weiterhin nur eine Steigerung der Produktivität um 20 Prozent erreicht, so wird die Entwicklung eines technologisch machbaren Chips im Jahre 2010 ca. 3 bis 4 Milliarden Euro kosten.

Diese enormen Entwicklungskosten sind angesichts von Tausenden zu entwickelnden Schaltkreisen weder bezahlbar, noch stehen die erforderlichen Ingenieure zur Verfügung.

EMULIEREN STATT SIMULIEREN

Erst Testen, dann Fertigen

Simulationsprogramme für digitale Schaltungen erlauben es, einen digitalen Mikrochip zu testen, bevor er überhaupt gefertigt worden ist. Emulatoren können das auch – nur 1000 Mal schneller durch Benutzung programmierbarer Hardware statt Software.

Einen Chip zu fertigen dauert lange, auch wenn es auf den ersten Blick nicht so aussieht. Viele Fertigungsschritte können parallel abgewickelt werden, so dass immer eine große Zahl Chips gleichzeitig in der Produktion ist. Bis ein einzelner Chip alle Stationen passiert hat, ist es aber ein langer Weg.

Darum kann man heutzutage nicht mehr einen Chip entwerfen, bauen, testen, dann eine korrigierte Variante bauen, usw. Man muss die Schaltung weitgehend schon im Stadium der Blaupause testen.

Dafür gibt es zwei Verfahren: die Simulation und die Emulation. Obwohl vom Namen her sehr ähnlich, handelt es sich doch um zwei sehr unterschiedliche Ansätze.

Bei der Simulation gibt man den Schaltplan des Mikrochips an ein spezielles Programm auf einem schnellen Rechner. Dieses Programm simuliert nun die Abläufe, die sich in der Schaltung abspielen würden, wenn man sie schon gebaut hätte – allerdings in vereinfachter Form.

Die wirklichen Abläufe in modernen Schaltungen sind viel zu komplex, um selbst von den schnellsten heutigen Rechnern bewältigt zu werden. Aber wenn man die richtigen Annahmen macht (sprich: sich ein gutes Modell der Realität gesucht hat), können auch stark vereinfachte Abläufe das Verhalten einer Schaltung so weit korrekt abbilden, dass man alle ihre wesentlichen Funktionen überprüfen kann, ohne sie je gebaut zu haben.

Die wichtigste Vereinfachung macht die Digitaltechnik schon selbst: Sie erlaubt als Ein- und Ausgaben nur die logischen Werte Null und Eins.

Aber auch die besten Simulatoren sind für große Schaltungen oder gar ganze Chips

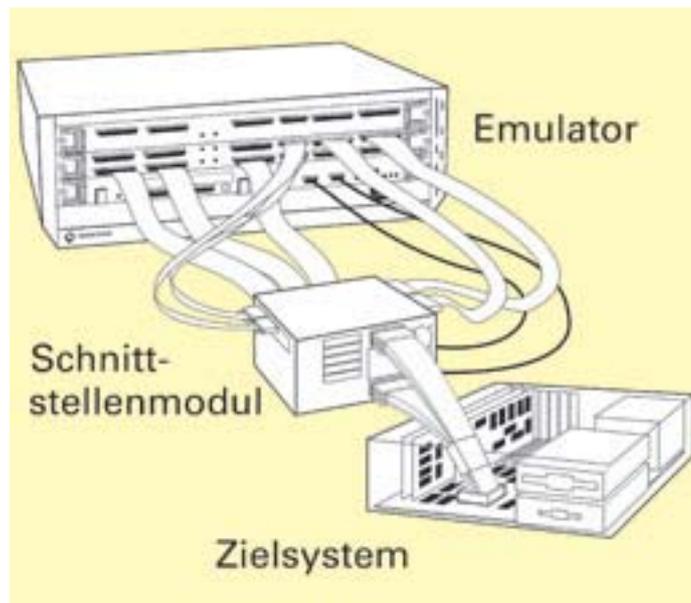
viel zu langsam: Ein Ablauf, der in der Wirklichkeit nur Sekunden in Anspruch nimmt, kann in der Simulation mehrere Tage dauern.

Emulation statt Simulation

Hier kommt das weniger bekannte Verfahren der Emulation ins Spiel.

gen schon in ihrer späteren Umgebung zu testen – in einen Fernseher oder einen Computer eingebaut zum Beispiel.

Vor allem lässt sich der Emulator in wenigen Minuten neu programmieren, wenn die Schaltung wegen eines Fehlers geändert wurde. Einen Chip neu zu fertigen, kann dagegen Wochen dauern.



Simulationsprogramme für analoge Schaltungen sind im Prinzip gestrickt wie vor 30 Jahren. Um die Entwurfsflücke zu schließen, sind revolutionäre Ideen gefragt! Hier ist eine: Beweisen statt Ausprobieren – Formal verifizieren statt simulieren.

Ein Emulator ist eine große Rechenmaschine ähnlich einem Großrechner. Allerdings ist sein Schaltplan nicht festgelegt. Im Gegenteil, man kann ihn fast nach Belieben ändern.

Wenn man eine Schaltung testen will, konfiguriert man also den Emulator mit dem gegebenen Schaltplan und kann ihn dann wie die fertige Schaltung benutzen. Die Abläufe der fertigen Schaltung werden nicht nachgeahmt, sondern bereits ganz real in mikroelektronischer Hardware ausgeführt.

Seine freie Programmierbarkeit macht einen Emulator allerdings immer langsamer als einen speziell für den jeweiligen Zweck gebauten Chip. Trotzdem ist ein Emulator gut eintausend mal schneller als ein Simulator. Und die Geschwindigkeit reicht sogar aus, um die meisten Schaltungen

BEWEISEN STATT AUSPROBIEREN

Und sie ist doch analog!

So klein sie auch sein mögen, die analogen Komponenten in der Mikroelektronik kann man nicht wegdiskutieren. Das liegt letztendlich an uns und unserer Welt, denn der Mensch nimmt fast alle Umwelteinflüsse, sei es Musik, Farbe oder Gerüche, analog wahr.

Die freundliche Computerstimme, die sich mit Käpt'n Janeway auf der Voyager unterhält, ist auch in der Science Fiction ein analoges Schallsignal.

Das heißt, man sollte nicht über die Schnittstelle zwischen analog und digital an sich diskutieren, sondern sich höchstens über deren Lage unterhalten.

So enthalten die heutigen Chips, die beide Welten vereinigen, häufig weit über 90 Prozent digitale Komponenten und 10 Prozent füllt der kleine, schwierige Analogteil.

Sehr viele oder noch mehr?

Eine Simulation ist letztendlich nicht mehr als die Berechnung einer Abfolge von Zuständen, die ein System einnimmt. In digitalen Systemen ergibt sich dafür eine Vielzahl von Möglichkeiten. Jedes Gatter des Systems hat zwei Zustände und durch die hohe Anzahl von Gattern ist die Zahl der unterschiedlichen

Verbreitung gefunden hat. Wer nun die Einleitung aufmerksam studiert hat, der wird gleich vermuten, dass die rasante Entwicklung der Mikroelektronikindustrie seit dieser Zeit etliche neue Verfahren hervorgebracht hat.

Dies ist aber ein Irrtum: Aktuelle Simulatoren sind schneller und besser, aber letztlich funktionieren sie nach wie vor wie SPICE vor 30 Jahren.

Neue, ungewöhnliche Ideen sind gefragt, um die Entwurfs-lücke in Zukunft schließen zu können – hier ist eine davon:

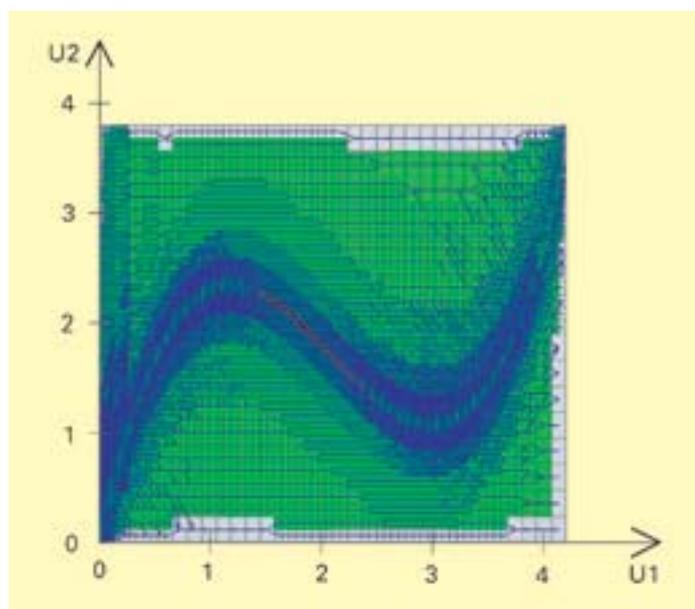
Anstatt eine Simulation eines Systems durchzuführen, versucht man, bestimmte Ei-

Wir haben schon über die unendlich vielen Zustände der analogen Schaltungen gesprochen, und es fällt schwer, Verfahren zu finden, die für solche Probleme zugänglich sind. Wir versuchen also die Quadratur des Kreises und machen aus dem analogen System ein digitales, wenn auch ein recht ungewöhnliches.

Der Zustandsraum wird dabei in diskrete Zustände unterteilt, und diese werden durch Pfeile, welche die Dynamik des Systems darstellen, verbunden. So entsteht ein Spielbrett aus Feldern und deren Verbindungen, die sozusagen erlaubte Spielzüge darstellen (siehe Abbildung).

Eine Frage ist zum Beispiel: Gibt es einen Weg, auf dem man immer wieder die Grenzen ($U_1 > 3$) und ($U_1 < 2$) überschreiten kann und zwar unendlich oft hintereinander? Um die Antwort vorweg zu nehmen: Es gibt sogar mehrere. Das Spielen machen wir natürlich nicht selbst, sondern der Computer ist in der Lage, entsprechende Bedingungen, wenn sie in einer ihm verständlichen Form dargeboten werden, zu überprüfen.

So kann Belana Torres auf die Frage von Käpt'n Janeway »Wird der Warp-Kern auch sicher weiterschwingen?« mit »Bewiesenermaßen ja, Sir!« antworten.



Zustände des Gesamtsystems immens groß.

Doch die kleinen analogen Schaltungen können diese Anzahl noch übertreffen. Ihre so genannten Zustandsvariablen sind kontinuierlich definiert. Dies bedeutet, dass die Anzahl der möglichen Zustände in der Schaltung schlichtweg unendlich groß ist, und das macht analoge Technik so schwierig und unbeliebt.

Seit langem gibt es Simulationsprogramme für analoge Schaltungen. SPICE ist ein Programm aus den siebziger Jahren, das eine sehr weite

genschaften dieses Systems zu beweisen. Warum? Simulieren ist Ausprobieren, man spielt eine gewisse Situation am Computer durch, allerdings kann man nie alle möglichen Situationen durchspielen.

So hatte offensichtlich niemand Raumschiff Voyager in der eingangs beschriebenen Situation getestet, und auch der Pentium-Bug wurde in Simulationsläufen nicht gefunden.

Wie wir heute wissen, hätte eine Untersuchung des Pentium mit der so genannten Formalen Verifikation den angesprochenen Fehler sicher gefunden.



Walter Hartong
Jahrgang 1972



Jan Torben Weinkopf
Jahrgang 1975



Stefan Zimmermann
Jahrgang 1967

Wissenschaftliche Mitarbeiter von Prof. E. Barke am Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Fachgebiet Entwurfsautomatisierung