Interaktive Schaltungssimulation - Ein Beitrag zur zukunftsorientierten Grundstudiumsausbildung in der Technischen Informatik

L. Larsson, B. Mertsching, S. Schmalz
Universität Hamburg, Fachbereich Informatik
Vogt-Kölln-Straße 30, D-22527 Hamburg, Germany

e-mail: {larsson,mertsching,schmalz}@informatik.uni-hamburg.de

Zusammenfassung

Am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg werden seit dem Wintersemester 1994/1995 ergänzend zu den Grundstudiumsvorlesungen und -übungen der Technischen Informatik sogenannte Praxistutorien zur Begleitung dieser Pflichtveranstaltungen angeboten. Dabei sind im ersten Semester digitale Schaltungen mit Logikgattern und speichernden Elementen aufzubauen und zu simulieren; im zweiten Semester sind dann verschiedene aus dem ersten Semester bekannte digitale Grundelemente mit analogen Komponenten nachzubauen und ebenfalls zu simulieren. Die frühzeitige Unterstützung der Lehre durch Schaltungssimulation erlaubt so vom ersten Semester an einen quasi praktischen Zugang zu den theoretisch behandelten Grundlagen der Technischen Informatik.

1 Einleitung

Das Tutorium im ersten Semester umfaßt Aufgaben der zentralen thematischen Schwerpunkte *Schaltnetze* und *Schaltwerke* und soll durch exemplarische Implementation einfacher digitaler Schaltungen mit digitalen Grundelementen die theoretischen Grundlagen dieser Themenbereiche und deren Anwendung veranschaulichen. Bei der Konzeption wurde Wert auf starken Bezug zum PC-Kontext gelegt, was sich für die Motivation der Studierenden als außerordentlich hilfreich erwiesen hat.

Published by GMD, in Proc. 8. E.I.S. - Workshop, Entwurf Integrierter Schaltungen, Hamburg, Germany, 8-9 April 1997, in L. Peters, K. Lagemann (Hrsg.), Tagungsband, S. 239-248, GMD 1997.

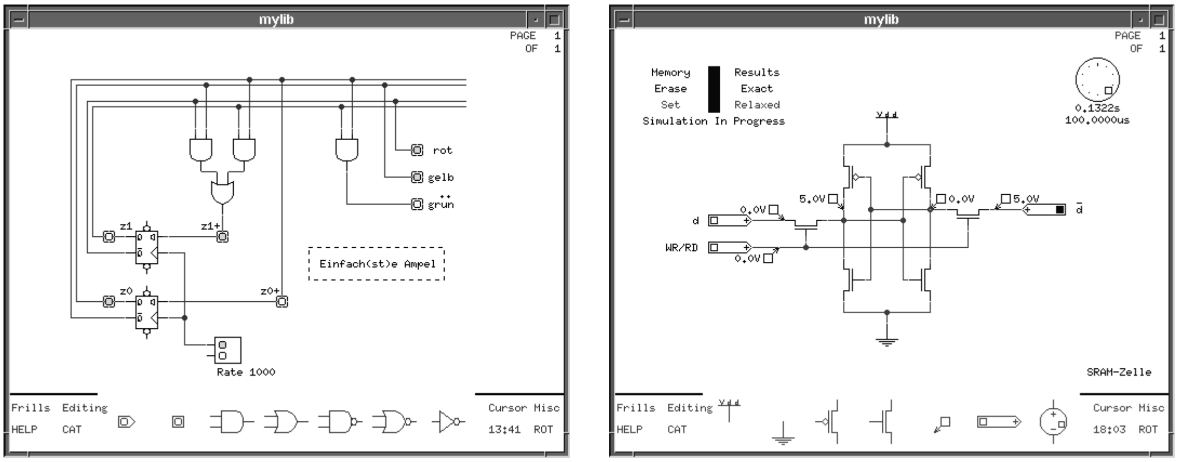

Abbildung 1: *Simulation einer einfachen Ampel (DigLOG, links) sowie einer 6-Transistor SRAM-Zelle (AnaLOG, rechts). Sowohl der digitale (DigLOG) als auch der analoge (AnaLOG) Simulatorkern verwenden die gleiche Grundoberfäche.*

Das Tutorium im zweiten Semester erleichtert das Verständnis der in Vorlesung und Übungen theoretisch behandelten elektrotechnischen Grundlagen und soll durch Anwendung das Interesse für technische Fragestellungen verstärken. Dabei wird bewußt auf eine quantitative Behandlung verzichtet. Vielmehr sollen durch Aufbau und Simulation digitaler Grundelemente mit analogen Komponenten die für den digitalen Schaltungsentwurf wichtigen elektrotechnischen Hintergründe veranschaulicht werden.

Bei den Praxistutorien kommt der frei erhältliche Simulator DigLOG / AnaLOG (Abb. 1) der *Caltech VLSI CAD Tools* [Gillespie 1996] vom California Institute of Technology (Caltech) zum Einsatz, so daß Studierende neben den Rechnern an der Universität auch private PCs (unter Linux/X11) einsetzen können. Die freiwilligen Veranstaltungen werden sehr gut angenommen und sollen Eingang in die regulären Lehrveranstaltungen des Grundstudiums finden. Eine weitere Vertiefung der Technischen Informatik ist in sich anschließenden Vorlesungen, Praktika und Projekten möglich.

2 Motivation

Die Grundstudiumsausbildung der Technischen Informatik an der Universität Hamburg umfaßt drei Semester Vorlesungen mit begleitenden Übungen, wobei das Curiculum im Gegensatz zur softwaretechnischen Grundausbildung derzeit keine Rechnerarbeit vorsieht. Praktika zur Technischen Informatik sind erst ab dem zweiten Semester vorgesehen. Seitens der Studierenden bestand daher der Wunsch, den theoretisch behandelten Stoff ergänzend anhand demonstrativer Schaltungen zu erfassen. Insbesondere bereiten dynamische Schaltvorgänge erhebliche Verständnisprobleme, wie etwa Taktzustands- und Taktflankensteuerung oder Automaten. So wurde die Frage nach frei erhältlichen Simulatoren wiederholt gestellt. Die Lehrenden suchten nach geeigneten Veranstaltungsformen, um die Studierenden verstärkt für die Technische Informatik zu interes-

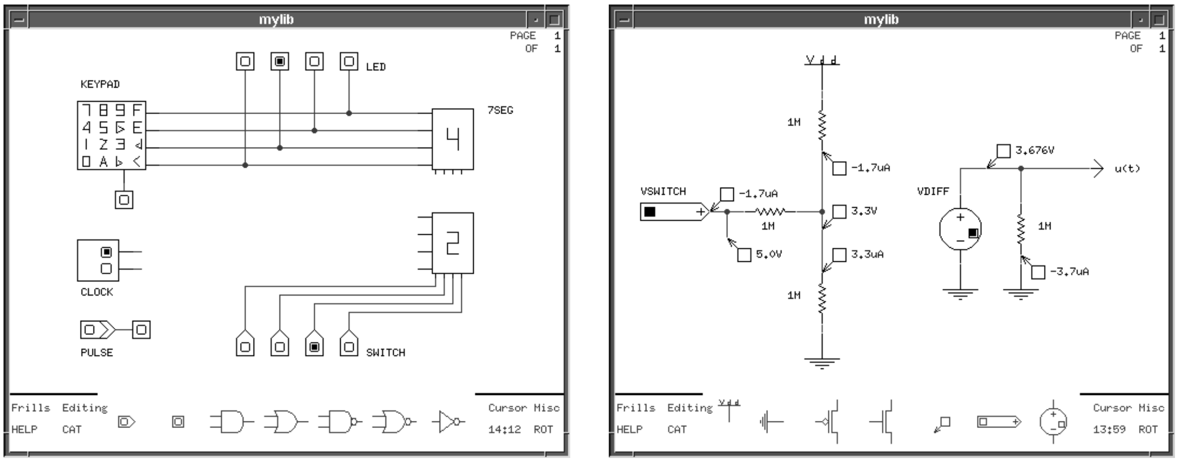

Abbildung 2: *Grundelemente zur Steuerung und Beobachtung der Simulation.*

sieren. Mit den Praxistutorien wurde ein organisatorischer Rahmen geschaffen, um in unverbindlicher, spielerischer Form die Inhalte zu vertiefen.

3 Konzeption der Praxistutorien

Die Praxistutorien wurden in zwei Teilen konzipiert: Im ersten Teil sind Simulationen digitaler Schaltungen, im zweiten Teil analoge Simulationen digitaler Funktionselemente durchzuführen. Die Wahl des Simulators fiel auf DigLOG / AnaLOG, welcher sich durch besonders einfache Bedienbarkeit auszeichnet. Zudem ist der Simulator auch auf leistungsschwächeren Maschinen benutzbar. Die Eingabe von Schaltungen erfolgt graphisch durch Schaltpläne (Abb. 1). Dies wurde bei der Konzeption der Aufgaben bezüglich des Umfangs berücksichtigt. Erste Hürden im Umgang mit dem Simulator werden durch eine zentrale Einführung überwunden. Durch den Einsatz studentischer Hilfskräfte für Betreuungsaufgaben werden mögliche Hemmungen, Fragen zu stellen, abgebaut. Der Schwierigkeitsgrad nimmt mit fortlaufenden Aufgabenblättern zu, damit alle Teilnehmenden von der Veranstaltung profitieren können. Die digitale Simulation erfordert nicht die Erstellung umfangreicher Stimuli, sondern wird mit Schaltern, Taktgeneratoren und verschiedenen optoelektronischen Anzeigen durchgeführt (Abb. 2). Für die analoge Simulation stehen unterschiedliche Signalquellen und Multimeter zur Verfügung (Abb. 2). Ergänzend können sowohl digitale als auch analoge Simulationen mit einem Mehrkanaloszilloskop (Abb. 3) beobachtet werden.

Organisation und Aufgabenumfang

Die Aufgabenblätter werden vor Beginn der Praxistutorien in den Übungen verteilt, so daß die Studierenden etwas Zeit zur Vorbereitung haben. Für beide Praxistutorien wurden jeweils fünf Gruppen angeboten. Von den fünf angebotenen Gruppen wurden jeweils zwei Gruppen für die letzten sechs Wochen der Vorlesungszeit (6×4 Stun-

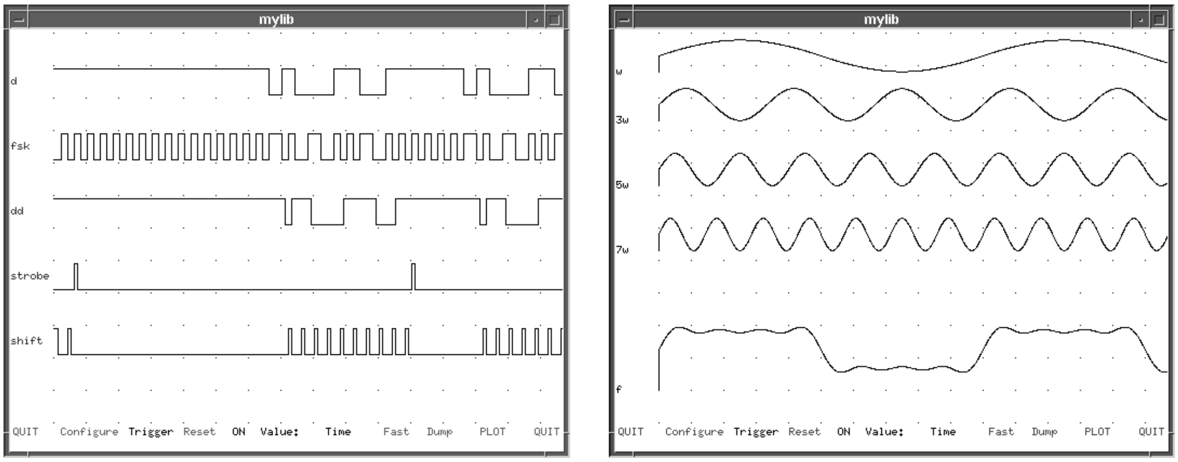

Abbildung 3: *Mehrkanaloszilloskop zur Beobachtung digitaler (links) und analoger (rechts) Simulationen.*

den) und drei Gruppen als Blockveranstaltungen in der vorlesungsfreien Zeit ($3 \times 2 \times 4$ Stunden) angeboten (davon eine Gruppe am Anfang der vorlesungsfreien Zeit und zwei Gruppen am Ende der vorlesungsfreien Zeit). Die Aufgabenblätter zur Digitalsimulation haben einen Gesamtumfang von 19 Seiten, die dazu gehörenden Musterlösungen einen Gesamtumfang von 25 Seiten. Diese werden nach Abschluß der Tutorien an alle Studierenden ausgegeben. Die Aufgabenblätter zur Analogsimulation weisen einen Gesamtumfang von 29 Seiten auf, Musterlösungen dazu existieren derzeit nur in Form von Schaltungsdateien des AnaLOG-Simulators. Diese wurden zunächst nur den Tutorinnen und Tutoren zur Verfügung gestellt.

Sowohl das Praxistutorium im ersten Semester (digitale Simulation) als auch das Praxistutorium im zweiten Semester (analoge Simulation) haben einen Umfang von sechs Aufgabenblättern mit durchschnittlich jeweils etwa drei, zum Teil aufeinander aufbauenden Aufgaben. Zur Bearbeitung jedes der Aufgabenblätter sind 4 Unterrichtsstunden vorgesehen.

Online-Dokumentation

Zusätzlich zur Textdokumentation von DigLOG und AnaLOG (60 Seiten) gibt es die Dokumentation der *Caltech VLSI Tools* als Hypertext (2,6 MBytes). Um die Handhabung zu vereinfachen, wurden einige ergänzende HTML-Seiten, mit Hyperlinks auf für die Praxistutorien wichtige Stellen der Originaldokumentation, erstellt. Der Quellcode ist zusammen mit ergänzten Schaltungsbeispielen, Installationshinweisen (für Linux) unter http://tech-www.informatik.uni-hamburg.de/CADtools/Chipmunk/ verfügbar.

Simulationsrandbedingungen

DigLOG verwendet US-Norm-Gattersymbole anstelle der in Vorlesung und Übungen verwendeten DIN-Symbole. In Hinblick auf kommerzielle CAD-Programme ist dies sicherlich kein Nachteil. So wurde bisher auf die Erstellung entsprechender DIN-Symbole verzichtet, obwohl die *Caltech VLSI Tools* einen graphischen Symboleditor für DigLOG (und AnaLOG) enthalten. Mixed-Mode-Simulation ist nicht möglich. Zwar sind unter DigLOG auch MOS-FETs als Switch-Level-Model verfügbar, auf die jedoch verzichtet wurde, um Problemen vorzubeugen (sobald ein digitales Element plaziert wird, verweigert der Simulator die Plazierung analoger Komponenten).

3.1 DigLOG - Aufgaben

Der erste Teil der Aufgaben umfaßt die Realisierung von Schaltnetzen, hierbei sind 7-Segment-Dekoder, Paritätskodierer, Hamming-Encoder/Decoder, Addierer, Subtrahierer sowie Multiplizierer und Dividierer aufzubauen. Im zweiten Teil sind spezielle Schaltwerke wie Ampelschaltungen mit steigenden Schwierigkeitsgraden, FSK-Modulator und FSK-Demodulator, die zusammen ein einfaches Modem ergeben, sowie ein RS-232-Sender und Empfänger zu realisieren.

Die Aufgaben zum Automatenentwurf implizieren ein Bearbeitungsschema, wie es bei der Verwendung von Synthese-Tools zur Anwendung kommt. So liegt der Schwerpunkt nicht nur in der manuellen Logikminimierung, sondern auch in der Konstruktion und im Verständnis von Automaten beschreibenden Graphen. Dazu werden teilweise einfache speicherprogrammierbare Automaten vorgegeben.

Lernziele

Die thematische Auswahl der Tutoriumsaufgaben zielt ab auf die Wiedererkennung schon im Rahmen von Vorlesung und Übungen behandelter Teilgebiete. Die praktische Anwendung verschiedener theoretischer Grundlagen bei der Implementation und Simulation digitaler Schaltungen soll den Studierenden die Einordnung bezüglich der Bedeutung zuvor erlernter Methoden vermitteln.

Minimierung

Die Minimierung logischer Schaltungen wird im Rahmen der Übungen mit Papier und Bleistift unter Umständen nur als eine zeitintensive Aufgabe verstanden. Beim Aufbau eines Schaltnetzes wird der Vorteil jedoch offensichtlich. Für die erste Aufgabe (ein einfacher 7-Segment-Dekoder für einen Spielwürfel) ist der Lösungsweg sehr weit vorgegeben, so daß die Lösung einfach und schnell implementiert und simuliert werden kann. Die erste, sehr einfach gehaltene Aufgabe dient primär der Einarbeitung in den Simulator, um frühzeitig ein Erfolgserlebnis garantieren zu können. Darüber hinaus wird der praktische Nutzen von Logik- und Bündelminimierung verdeutlicht.

Kodierung

Ein einfacher Paritätskodierer und ein (optionaler) Hamming-Encoder/-Decoder wiederholen den Stoff der Vorlesung und Übungen und ermöglichen darüber hinausgehend das direkte Experiment. Beide Schaltnetze sind etwas aufwendiger zu implementieren und überwiegend für diejenigen gedacht, die mit der Einarbeitung in den Simulator sehr schnell zurecht gekommen sind. Durch diesen Aufgabenkomplex kann die Bedeutung der Bitfehlererkennung und Bitfehlerkorrektur spielerisch erfaßt werden. Die interaktive Simulation von Kanalstörungen erlaubt anschaulich, die Grenzen der im Grundstudium behandelten Verfahren zu erkennen.

Duale Arithmetik

Die praktische Bedeutung dualer Arithmetik wird besonders bei der Implementation von Schaltnetzen für arithmetische Operationen mit ganzzahligen Operanden und bei der Logiksimulation durch die direkte Übertragbarkeit dualer Arithmetik in geeignete Digitalschaltungen deutlich. So sind zunächst ein einfacher 1-Bit Halbaddierer sowie ein 1-Bit Volladdierer zu realisieren, die anschließend zu 4-Bit Einheiten zusammengesetzt werden können. Hierbei werden die Vorteile der hierarchischen Entwurfsstrategie hervorgehoben. Gleichzeitig sind die Auswirkungen endlicher Maschinenwortbreite sichtbar. Der Aufbau von Multiplizierer, Komparator und Dividierer als Schaltnetz dient einer möglichen Vertiefung.

Automatenimplementation

Die Bedeutung endlicher Automaten für die Realisierung digitaler Schaltungen wird, neben der Veranschaulichung der zeitlichen Zusammenhänge und des Verhaltens von Automaten selbst, durch geeignete Aufgaben vermittelt. Dabei sollen die Studierenden lernen, Probleme aus *"Sicht des Automaten"* zu erfassen, auch wenn diese von der Aufgabenstellung her anfangs sehr unterschiedlich zu sein scheinen. So sind zuerst einfache Ampelsteuerungen zu realisieren, bei denen der Automat vergleichsweise direkt in Erscheinung tritt, im Gegensatz zur Implementation von FSK-Modem und RS-232-Schnittstelle, wo der Charakter des Automaten zunächst weniger offensichtlich ist.

Liegt die Spezifikation eines Automaten schon als Zustandsgraph vor, so ist bei Verwendung von Synthese-Tools dieser Graph geeignet zu repräsentieren – die Abbildung des Zustandsgraphen auf ein Schaltwerk erfolgt automatisch. Um die Abbildung eines Zustandsgraphen auf eine digitale Schaltung sicher zu verstehen, sind Zustandsgraph, Zustandsübergangstabelle und Ausgangsfunktionstabelle bei einigen Aufgaben vorgegeben. Liegt der thematische Schwerpunkt einer Aufgabe jedoch im Verständnis von Zeitdiagrammen und der Erstellung von Zustandsgraphen, so sind die betreffenden Automaten durch Mikroprogrammierung zu realisieren, um nicht durch aufwendige Minimierung und Schaltplaneingabe von den wesentlichen Inhalten abzulenken.

In Anlehnung an den Einsatz von Synthese-Tools liegt ein weiterer Schwerpunkt der Aufgaben in der Erstellung geeigneter Zustandsgraphen ausgehend von verbalen Spezifikationen und Zeitdiagrammen. Diesem wichtigen Aspekt wird durch die Aufgaben zum FSK-Modem sowie zur RS-232-Schnittstelle Rechnung getragen. Auf Aufgaben, die ausgehend von einer natürlichsprachlichen Spezifikation die vollständig eigenständige Erstellung von Zeitdiagramm und Zustandsgraph erfordern, wurde bewußt verzichtet. Dies ist weiterführenden Praktika und Projekten vorbehalten.

3.2 AnaLOG - Aufgaben

Hier sind zunächst einige bereits bekannte Logikgatter aus Umschaltern zu realisieren, um anschließend als CMOS-Schaltungen mit MOSFETs aufgebaut zu werden. Simulationen von RC-Gliedern veranschaulichen die Modellierung der Signalverzögerung. Der Aufbau von Flipflops mit MOSFETs ermöglicht, Setup- und Hold-Zeiten anschaulich zu vermitteln. Die Implementation einer SRAM- und einer DRAM-Zelle verdeutlichen die Realisierungsmöglichkeiten digitaler Elemente jenseits der logischen Abstraktionsebene. Aufgaben zu ADCs und DACs sowie zu Eigenschaften digitaler Signale und deren Modellierung runden die Aufgaben ab.

Lernziele

Durch exemplarischen Aufbau und Simulation elementarer digitaler Grundelemente mit analogen Komponenten soll den Studierenden ein anschaulicher Zugang zu den notwendigen elektrotechnischen Hintergründen digitaler Systeme ermöglicht werden. Dabei ist das Lernziel nicht die quantitative Modellierung, sondern die Vermittlung der globalen Zusammenhänge zwischen digitalen Schaltungen und deren Realisierung durch analoge Grundelemente, da diese Beziehungen im Zusammenhang mit der Multi-Valued-Logic-Simulation und insbesondere bei der Implementation realer digitaler Systeme eine wesentliche Rolle spielen.

Jenseits der logischen Modellierung

Die Realisierung einiger einfacher Grundgatter in Form von Kontaktnetzen mit Hilfe von Umschaltern dient als Vorübung zur Implementation einiger CMOS-Gatter. Aufbau und Simulation eines TriState-Puffers zeigt sehr einfach den Übergang von der rein logischen auf die elektrische Modellierungsebene. Ein in der betreffenden Aufgabenstellung vorgegebener Testaufbau zum T-Gate soll durch Nachbau und Simulation die Funktionsweise des T-Gates veranschaulichen. Darauf aufbauend sind ein einfacher Multiplexer sowie optional ein XOR mit T-Gates zu realisieren. Es wird schon in der Aufgabenstellung darauf hingewiesen, daß die Realisierung mit Hilfe des T-Gates, also einer elektrischen Komponente, effizienter als mit Grundgattern, also logisch modellierten Komponenten, möglich ist.

Signalverzögerung und Versorgungsleitungen

Der störende Einfluß parasitärer Widerstände und Kapazitäten bezüglich der Signalverzögerung und Spannungsstabilität auf den Versorgungsleitungen wird durch einige einfache Aufbauten demonstriert. Der für die Implementation realer digitaler Systeme (auch schon für Testaufbauten) wichtige Aspekt des Puffer-Kondensators wird durch einen einfachen Aufbau demonstriert. Dabei bietet die Simulation den großen Vorteil, daß durch geeignete Vorgabe elektrischer Parameter die zu zeigenden Effekte sich besonders deutlich hervorheben lassen.

Speicherelemente

Der Aufbau digitaler Flipflops mit analogen Komponenten und der direkte Vergleich mit funktional äquivalenten, aus digitalen Grundelementen aufgebauten Flipflops, verdeutlicht die sich aus dem Übergang von der logischen auf die elektrotechnische Abstraktionsebene ergebenden Optimierungsmöglichkeiten. Dazu sind mit Invertern und T-Gates jeweils ein dynamisches Zwei-Phasen-Takt D-Flipflop sowie ein statisches taktzustandsgesteuertes D-Flipflop aufzubauen.

Die notwendige Beachtung von Setup- und Hold-Zeiten ergibt sich in natürlicher Weise als Konsequenz der technischen Realisierung von Speicherelementen. Dies ist anhand des taktzustandsgesteuerten D-Flipflops zu untersuchen. Optional ist mit zwei taktzustandsgesteuerten D-Flipflops ein flankengesteuertes D-Flipflop aufzubauen, wobei die korrekte Funktion durch geeignete Einstellung relativer Signallaufzeiten innerhalb der Flipflop-Struktur mit Hilfe von Kapazitäten zu erreichen ist.

Die Funktionsweise und Realisierungsmöglichkeiten von statischen und dynamischen Speicherzellen wird durch ein eigenes Aufgabenblatt vertieft. Auch hierbei wird die effizientere Implementation mit analogen Komponenten, verglichen mit der auf logischen Gattern basierenden, deutlich. Die Notwendigkeit der Ansteuerung einer 6-MOS-Transistor-SRAM-Zelle mit komplementären Datenbits wird durch die Simulation verständlich, ebenso wie die Notwendigkeit des Refreshs dynamischer Speicher.

Kirchhoffsche Gesetze

Die exemplarische Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze anhand eines Analog-Digital-Konverters und eines Flash-Analog-Digital-Konverters wird durch entsprechende Aufgaben in einfacher Weise demonstriert. Die begrifflichen Schwierigkeiten mit den elementaren Begriffen Spannung und Strom, wie sie bei vielen Studierenden vorzufinden sind, sollen durch Aufbau und Simulation zwei verschiedener Komperatoren überwunden werden. Ein aus zwei rückgekoppelten und zwei als Verstärker wirkenden CMOS-Invertern aufgebauter speichernder Komperator (bipolare Variante in [Tietze 1993]) demonstriert direkt den Begriff der Differenzspannung. Ein dynamischer Komperator [Weste 1993] aus CMOS-Inverter, T-Gate und Kondensator zeigt durch seine Funktionsweise die Bedeutung von Stromrichtung relativ zum (auf Referenzspannung aufgeladenen) Koppelkondensator des Komperators.

Modellierung digitaler Signale

Die stark vereinfachte Idealisierung digitaler Signale durch Rechtecksignale wird zunächst ohne weitere Erklärungen bei den Aufgaben zum Teil durch trapezförmige Signale ersetzt. Die Modellierung realer Signale wird durch die Fourier-Synthese eines Rechtecksignals verdeutlicht. Dazu erfolgt in der Aufgabenstellung zunächst eine rein mathematische Darstellung der Fourier-Reihe. Der sehr einfache Versuchsaufbau aus einigen Sinussignalgeneratoren und Widerständen soll die Brücke zwischen der mathematischen Modellierung und der einfachen Umsetzung in eine geeignete Schaltung demonstrieren. Nebenbei wird so eine einfach zu verstehende Anwendung der Fourier-Transformation vorgestellt. Eine Aufgabe zur dynamischen Leistungsumsetzung des

CMOS-Inverters veranschaulicht die Bedeutung der Signalfrequenz und Flankensteilheit. Übersprechen (steilflankiger Signale) wird durch eine abschließende Aufgabe dargelegt.

4 Ergebnisse

Obwohl die Teilnahme an den Praxistutorien vollkommen freiwillig ist, ist die Akzeptanz der Studierenden mit etwa 50% sehr hoch. Ihr Interesse zeigte sich in der Vielzahl gefundener Lösungswege abseits der vorbereiteten Musterlösungen sowie durch die eingebrachten Verbesserungsvorschläge und Erweiterungen. Bei der momentanen Novellierung des Informatikstudiums an der Universität Hamburg werden die interaktiven Schaltungssimulationen in die reguläre Lehre Eingang finden.

5 Diskussion

Obgleich die Praxistutorien, die während der Vorlesungszeit stattfanden, teilweise thematisch der Vorlesung ein wenig vorgriffen, wurde dieser Umstand von den Studierenden nur geringfügig als Nachteil empfunden. Die Aufgabe von Tutorien, unterschiedlichen Wissensstand zwischen Studienanfängern auszugleichen, wird auch bei geringfügigem thematischen Vorgriff erfüllt. Die als Blockveranstaltungen in der vorlesungsfreien Zeit angebotenen Praxistutorien wurden besser besucht, obwohl Tutorien eigentlich während der Vorlesungszeit stattfinden sollen.

Die Überwindung von Verständnisschwierigkeiten durch das Praxistutorium wurden besonders durch die Aufgaben zur dualen Arithmetik deutlich. Eine Übungsaufgabe zur endlichen Maschinenwortbreite wird meist nicht richtig gelöst. Vielmehr wird ein vermeindlich richtiger Zahlenwert als Lösung angegeben. Die Realisierung des RS-232-Empfängers erwies sich für die meisten Studierenden als zu schwierig, obwohl die Aufgabe sehr detailiert (verbal, Zeitdiagramm und Zustandsgraph) vorgegeben ist. Dennoch sind die Reaktionen seitens der Studierenden überwiegend positiv.

Literatur

[Gillespie 1996]
Gillespie, D.; Lazzaro, J.: DigLOG / AnaLOG, Caltech VLSI CAD Tools. California Institute of Technology (ftp://ftp.pcmp.caltech.edu/pub/chipmunk/)

[Lagemann 1987]
Lagemann, K.: Rechnerstrukturen. Berlin (Springer) 1987

[Mead 1989]
Mead, C.: Analog VLSI and Neural Systems. Reading (Addison-Wesley) 1989

[Paul 1995a]
Paul, R.: Elektrotechnik und Elektronik für Informatiker. Band 1. Grundgebiete der Elektrotechnik. Stuttgart (Teubner) 1995

[Paul 1995b]
Paul, R.: Elektrotechnik und Elektronik für Informatiker. Band 2. Grundgebiete der Elektrotechnik. Stuttgart (Teubner) 1995

[Paul 1996]
Paul, R.; Paul, S.: Repetitorium der Elektrotechnik. Berlin (Springer) 1996

[Press 1986]
Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.: Numerical Recipes. Cambridge (Cambridge University Press) 1986

[Rost 1983]
Rost, A.: Grundlagen der Elektronik. Wien (Springer) 1993

[Schiffmann 1994]
Schiffmann, W.; Schmitz, R.: Technische Informatik 2. 2. Aufl. Berlin (Springer-Verlag) 1994

[Schiffmann 1996]
Schiffmann, W.; Schmitz, R.: Technische Informatik 1. 3. Aufl. Berlin (Springer-Verlag) 1996

[Tietze 1993]
Tietze, U.; Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. Berlin u. a. (Springer-Verlag) 1993, 10. Aufl.

[Weste 1993]
Weste, N. H. E.; Eshraghian, K.: Principles of CMOS VLSI Design, A Systems Perspective. Second Edition. Reading (Addison-Wesley) 1993