

Angedacht: Die PC-Technologie in zehn Jahren

Jeder Zentralprozessor so fix wie 1000 Pentiums – Filmbibliotheken in Speicherkarten oder Minidisks

Was erreicht die Miniaturisierung in der Mikroelektronik? Wie sieht etwa der Personal Computer in zehn Jahren aus? Gedanken über diese Frage lassen schnell Zweifel an der Richtigkeit der Fragestellung aufkommen. Man müßte wohl besser fragen: Gibt es in zehn Jahren noch einen PC heutiger Art, oder: Welche Anwendungen benötigen die unglaubliche Rechenleistung der zu erwartenden Computer? Welche Anwendungen werden möglich?

Vor kurzem feierte eine wichtige deutsche Zeitschrift für den Macintosh-Rechner – der gegen die Wintel-Übermacht vielleicht auch überlebt, weil ihm von Beginn an bis heute eine Aura des Visionären anhaftet – ihre 150ste Ausgabe. In Rückblickartikeln darin liest man, daß 1984 die erste Festplatte für den Mac mit 10 Megabyte Speicherkapazität etwa 10.000 Mark kostete. Eineinhalb Jahre später waren schon „satte“ 20 Megabyte für nur knapp 7000 Mark zu haben. Und heute? Ein zehn Gigabyte-Festplattenlaufwerk, also eins mit der 100fachen Speicherkapazität von 1984, kostet mit rund 1000 Mark nur ein Zehntel des Preises der Toptechnik von vor 14 Jahren. Damit entwickelte sich die auf einem Standard-PC-Laufwerk zu speichernde Informationsmenge in etwa analog zum Moore'schen Gesetz für den Miniaturisierungstrend bei Halbleitern.

Moore's Gesetz: gestern – heute – morgen

1965 sagte der Gründer und damalige CEO von Intel, Gordon Moore, eine Verdopplung von Transistoren auf einem Chip alle 18 Monate voraus – was sich bis heute bewahrheitete. 1971 stellte der amerikanische Chip-Hersteller einen Prozessor mit 2300 Transistoren und einer Taktrate von 108 Kilohertz vor; ein heutiger Pentium II verfügt über 7,5 Millionen Transistoren und wird mit 300 Megahertz getaktet. Speicherchips (Typ DRAM) konnten zu Beginn der 70er Jahre ein Kilobit speichern, heuti-

ge Prototypen schaffen ein Gigabit, das Millionenfache. Die Strukturen in dem Silizium verringerten sich von acht Mikrometer auf 0,18 Mikrometer Breite. Dabei fallen bei dieser Entwicklung noch die Preise! 1991 kostete die Leistung von einer Millionen Instruktionen pro Sekunde (MIPS), erbracht durch einen Intel 486-Prozessor, noch 225 Dollar, heute mit dem Pentium II sind es etwa vier Dollar pro MIPS. Und kostete bei Festplatten 1991 ein Speichervolumen von einem Megabyte noch fünf Dollar, liegt der aktuelle Preis hierfür nur noch bei fünf bis zehn Cents. Kann diese Entwicklung noch mindestens zehn Jahre weitergehen? Experten sagen ja! Die Grenzen bei der Miniaturisierung von Transistoren auf Chips liegen wohl noch in weiter Ferne. So prognostiziert die amerikanische Halbleiterindustrie 70 Nanometer-Strukturen für 2010, der Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) einen 256-Gbit-Chip mit Strukturen von 50 Nanometern für das Jahr 2013. IBM hat gerade für Furore gesorgt, indem die Firma anfang Februar ein San Francisco einen Mikroprozessor vorstellte, der mit einem Gigahertz arbeitet.

Die Hauptlast der technologischen Weiterentwicklung trägt laut VDE die Lithographie. Bei den heutigen Strukturen verwendet man UV-Licht von 248 Nanometern Wellenlänge. Im Jahre 2003 werden voraussichtlich für die 100 Nanometer-Strukturen Röntgenstrahlen eingesetzt werden. Ab dem 16 Gigabit-Chip (70 Nanometer-Struktur) im Jahre 2006 wird ein Wettlauf um die kostengünstigste Lösung zwischen Röntgen-, Elektronen- und Ionenstrahl stattfinden. In der Finanzierbarkeit neuer Technologien der Mikroelektronik zeigt sich vielleicht eher als in der Technologie selbst eine Grenze ab. Jede Technologiegeneration erfordert neue und vor allem teurere Geräte. Zudem wird der Wettbewerb härter. Wenn alle Firmen die gleichen Verfahren beherrschen und mit gleichen Geräten arbei-

ten, spielt sich der Kostenwettbewerb vor allem über Ausbeute, Geräteauslastung, Wafer-Durchlaufzeiten und Geschwindigkeit der Produktionsaufnahme ab. Allerdings nähern sich die Ausbeuten bei den verschiedenen Firmen durch den Einsatz perfekter Geräte und das Einfahren der Geräte durch die Herstellerfirmen rasch an. Das mühsame Anfahren der Produktion, beginnend mit etwa zehn Prozent Ausbeute, entfällt. Man beginnt heute mit 50 bis 70 Prozent, um sich dann auf 90 Prozent zu steigern.

450 Millimeter-Wafer anvisiert – Kosten erzwingen Allianzen

Die Produktivität erhöht sich natürlich auch mit der Zahl der Chips, die man aus einem Silizium-Wafer gewinnt. Und diese hängt von der Größe der Chips und des Wafers ab. Die Fläche des 256-Megabit-Speicherchips wird sich in drei Jahren von heute 280 Quadratmillimeter auf 170 Quadratmillimeter verringern. Der 256-Gigabit-Chip als Endpunkt heutiger Betrachtungen soll sich – nach der Road Map der Semiconductor Industry Association SIA, der Gesellschaft der amerikanischen Halbleiterindustrie) – von anfangs 1580 auf 950 Quadratmillimeter reduzieren.

Die Vergrößerung des Wafer-Durchmessers von heute 200 Millimeter auf 300 Millimeter bringt eine Steigerung der Chips je Wafer um den Faktor 2,4 bis 2,7, je nach Chipgröße. Die Kosten je Chip werden dabei um 25 bis 40 Prozent sinken. Allerdings sind der Entwicklungsaufwand und die Geräte-Investitionen so hoch, daß die Unternehmen strategische Allianzen bilden. Daran werden sich sowohl die System- und Chiphersteller als auch die Geräteproduzenten beteiligen. Die Umstellung von 200- auf 300-Millimeter-Wafer wird in den nächsten drei Jahren die Halbleiterindustrie weltweit etwa 14 Milliarden Dollar kosten. Die 300-Millimeter-Wafer stellen jedoch noch nicht

den Endpunkt der Entwicklung dar. Man denkt bereits an 450-Millimeter-Wafer, um die Produktivität weiter zu erhöhen.

Technologisch wird die CMOS-Technik auf absehbare Zeit ihre Favoritenrolle beibehalten. Um Platz zu sparen, läßt sich der Kondensator auch über dem Transistor anordnen. Diese vertikale Speicherzelle hat nur etwa den halben Platzbedarf wie die horizontale. Ein vertikaler MOS-Transistor, bei dem die aktiven Strukturen an den Seitenflächen liegen, könnte bei kleinsten Kanallängen das Lithographieproblem entschärfen. Die kleinsten Abstände der Schichten werden dabei durch Molekularstrahlepitaxie erzeugt. Im Labor erreichte man auf diese Weise Kanallängen bis zu 25 Nanometer.

Unterschreiten die isolierenden Schichten eines Chip-Transistors die Dicke von etwa 10 Nanometer, dann "untertunneln" die Elektronen die Isolierung. Ein solches Auftreten von Quanteneffekten im Nanometerbereich bietet jedoch die Möglichkeit, völlig neuartige Schaltelemente zu bauen (siehe dazu den folgenden Artikel von Christoph Wasshuber).

Leiterbahnen: Kupfer liegt vor Aluminium

Bei den winzigen Schaltungsstrukturen entstehen Probleme mit den ebenfalls immer schmaler werdenden Aluminium-Leiterbahnen auf der Schaltung. Der Leitungswiderstand wächst an und schmälert die Hochfrequenz-Eigenschaften. Mit Kupferleiterbahnen, deren Herstellung man allmählich beherrscht (auch hier konnte IBM durch die Vorstellung eines ersten Chips mit Kupferleiterbahnen eine technologische Führung erobern), läßt sich der Widerstand verringern. Gleichzeitig nimmt mit dem Ersatz von Aluminium durch Kupfer die Neigung zur Elektromigration ab. Dieser Effekt tritt vermehrt bei feinsten Leiterbahnen auf, wenn sich die gleiche Anzahl von Elektronen durch immer engere Leitungsquerschnitte hindurchquetschen müssen. Die Aluminium-Atome werden dabei leichter mitgerissen als die schwereren Kupfer-Atome. Bei der Elektromigration entstehen Poren in der Leiterbahn, Atome wachsen als Hügel heraus und führen zu Kurzschlüssen. Kupfer statt Aluminium

erfüllt bei sehr schmalen Leiterbahnen also einen doppelten Zweck.

Nach VDE-Angaben beziehen sich weitere Materialforschungen auf Werkstoffe mit niedriger Dielektrizitätskonstante (DK), um das Basismaterial abzudecken und die Leiterbahnebenen zu trennen. Da bei Logikschaltungen fünf bis sechs Ebenen übereinander liegen – und in Zukunft vielleicht doppelt so viele, muß die störende kapazitive Kopplung durch Schichten mit niedriger DK (wie sie etwa Polymere aufweisen) minimiert werden. Werkstoffe mit hoher DK benötigt man dagegen für die kleinen Kondensatoren der Speicherzellen, um deren Kapazität zu erhöhen. (zum Beispiel Tantalpentoxid, Ferroelektrika).

Terabyte in Pfenniggröße

Auch andere Technologien entwickeln sich. Derzeit bringen die Festplatten moderner PCs 50 Megabyte pro Quadratzentimeter unter, zur Jahrtausendwende sollen es 200 Megabyte sein, die von Leseköpfen dünner als ein Haar gelesen werden, in der Lage, Magnetfelder 500 mal so schwach wie das der Erde zu erkennen. Die Grenzen dieser Technologie liegen wohl bei 500 bis 800 Megabyte pro Quadratzentimeter; dann stört die atomare Wärmebewegung die winzigen magnetischen Kräfte einzelner Bits. Aber auch dann gibt es Alternativen: „Nanoplattenspieler“ mit Datenbits, die Nadeln eines Atomkraftmikroskopes in einen Kunststoff geschrieben haben, 50 Nanometer breit und 100 Nanometer – tausend Atome – lang. Bei IBM in Kalifornien gibt es einen Prototypen mit einer Speicherdichte von zehn Gigabit (1,25 Gigabyte) pro Quadratzentimeter, dem 25fachen moderner Festplatten. Zudem gibt es Grundlagenforschungen mit holographischen Medien (anschaulich: einen Videofilm aus 1200 Hologrammen, gespeichert in einem zuckerwürfelgroßen Kristall), und eine norwegische Firma (Opticom, Oslo) will in fünf Jahren einen Speicher aus Polymeren und Proteinen in Scheckkarten-Größe auf den Markt bringen. Speicherkapazität: 170 Terabyte (170.000 Gigabyte); Preis: Pfennigbeträge. Zwar hüllt sich die Firma, die nur 25 Angestellte hat, aber als „virtuelle Firma“ mit vielen Forschern anderer Institute zusammenarbeitet, in absolu-

tes Schweigen über Einzelheiten des Verfahrens. Man weiß in etwa: Licht unterschiedlicher Wellenlänge soll Proteine zwischen zwei stabile Zustände hin- und herschalten. Professor Norbert Hampp von der Universität Marburg macht gegenüber dem Informatik-Spektrum aufmerksam, daß bei einer Speicherdichte von etwa einem Quadratmikrometer pro Bit (wegen der optischen Wellenlänge) bei innerer Lichtversorgung Wärmeprobleme, bei äußerer Lichteinstrahlung Probleme mit der Eindringtiefe entstünden. Nicht wenige Fachleute halten aus solchen und ähnlichen Überlegungen heraus das Opticom-Firmenkonstrukt als eine geniale Idee, um über Aktien an Geld zu kommen. Auszuschließen sind entsprechende Technologien, die Bakteriorhodopsin als Speichermedium einschließen könnten, jedoch wohl nicht. So oder so: Auch der VDE rechnet damit, daß im Jahre 2012 256 Gigabit-DRAM-Chips verfügbar sind (s.o.).

Cray II im Chip

Die jetzige Entwicklung auf zehn Jahre hochgerechnet ergibt nach dem berühmten Gesetz des früheren Intel-CEO einen PC mit einem Prozessor, der mehrere hundert Millionen Transistoren beinhaltet, im höheren Gigahertzbereich getaktet wird und somit rund tausendmal so leistungsfähig ist wie ein heutiger Prozessor. In diesen Einschätzungsbereich fällt auch die Aussage des VDE, im Jahre 2005 werde die Leistung eines Superrechners vom Typ Cray II auf einem Chip untergebracht sein; das entspräche der Leistung von 300 Pentium-Prozessoren.

Zudem wird man eine Art Festplatte (oder eine Plastikspeicherkarte) haben, die zumindest im einstelligen Terabytebereich Informationen speichert. Zum Texte erfassen benötigt man derartige Leistungen auch bei aufgeblähten Programmen sicher nicht, auch nicht für die Adreßdatenbank oder die Tabellenkalkulation zur privaten Steuerabrechnung. In diesem Zusammenhang muß die Marktsituation gesehen werden, eine Chipfabrik selbst ist heute eine Milliardeninvestition. Die vorhin genannte Kostenreduktion um 40 Prozent bei Chips durch größere Wafer wird wohl alleine durch den zu erwartenden Preisverfall bei Speicherchips aufge-

zehrt. Die Großunternehmen, die hier investieren, müssen also auch einen Markt für Computer der aufgezeigten Leistungsbereiche sehen. Auch für die Entwicklung „nur“ des PC (der ja kein Supercomputer ist) der relativ nahen Zukunft von nur zehn Jahren muß deshalb ein System betrachtet werden, daß die beschriebenen Komponenten, zudem Displays und Datentransfersysteme, aber auch Marktentwicklungen und gesellschaftliche Veränderungen mit einbezieht. Ebenso ist daran zu denken, daß es völlig neue, intelligente Produkte geben wird – Beispiele sind Autonavigationshilfen, prothetische Systeme, Haussteuerungen, Serviceroboter, und die Computerperipherie ändert sich.

Monitor direkt am Auge

Die klobigen Monitore werden beispielsweise der Vergangenheit angehören. Flachbildschirme sind Standard, wahrscheinlich sogar (beim Durchbruch von Polymertechnologien) Displays (oder – nimmt man Opticom ernst – ganze Computer) dünn wie Zeitungspapier. Andere Trends gehen zu Monitorbrillen, eventuell zu Lasergeräten in Brillengröße, die Bilder direkt auf die Netzhaut projizieren. Wahrscheinlich werden aber Flachbildschirme mit einer höheren Auflösung als den heute üblichen 72 dpi den größten Anteil am Monitormarkt haben. In dem Umfang, wie es heute Notebooks gibt, werden möglicherweise die Monitorbrillen mit eingebauten Lautsprechern in den Bügeln dominieren. Der ganze Rechner wird am Körper tragbar sein, die Energieversorgung erfolgt vielleicht durch den Körper, etwa, indem man die Atembewegung ausnutzt. Die Datenübertragung in die Brille geschieht über die Haut. Alleine durch Händeschütteln gibt man dann seine elektronische Visitenkarte weiter, identifiziert sich bei entsprechenden Kontrollsystemen.

Die 64 Kilobit pro Sekunde, die ISDN heute jedermann als maximale Datentransferrate über das Büro hinaus bietet, sind dann auch obsolet (in Intranets, also innerhalb von Büroumgebungen, ist die verbreitete Spitzentechnik heute bei Fast Ethernet mit 100 Megabit pro Sekunde angelangt). Wahrscheinlich kommen die Daten über das Fernsehkabel mit 36 Megabit pro Sekunde

(und sind dann schneller als heutiges Standard-Ethernet mit 10 Megabit pro Sekunde); dabei ist die Datenübertragung jedoch abhängig von der Anzahl der jeweiligen Nutzer. Die Deutsche Telekom gibt deshalb der DSL-Technik (digital subscriber line) mit sechs Megabit pro Sekunde über die Kupferleitung des Telefonnetzes den Vorzug, die zum Datenempfang garantiert zur Verfügung stehen. Die japanische Telefongesellschaft NTT will bis 2010 jedes japanische Haus über Glasfasern mit mindestens einem Terabit pro Sekunde ans Netz anbinden!

Filmproduktion für alle

Der PC in zehn Jahren benötigt seine Leistung also, um beliebige multimediale Daten (Filme, Musik, Straßenszenen) von irgendwoher aus dem weltweiten Netz in hoher Auflösung ohne Stocken darstellen zu können. Zudem wird er ein Sprachverständnis haben, daß über die neuesten Spracherkennungsprogramme für flüssig gesprochene Sprache (etwa von IBM, Dragon Systems oder Lernout & Hauspie) weit hinausgeht. Dafür dienen ihm Programme der Künstlichen Intelligenz als Basis, die auf riesige Datenbasen von Alltagswissen zurückgreifen können. Der künftige Personal Computer wird derartige Daten aber nicht nur aus dem Netz holen, sondern auch erheblich schneller erzeugen können als heute – und hier, in der gestaltenden Tätigkeit, liegt dann auch der Unterschied zwischen dem heute oft propagierten Netzcomputer und dem Zukunfts-PC. Jeder kann beispielsweise sein eigener Filmregisseur werden, mit virtuellen Figuren in einer virtuellen Kulisse, sogar mit sich selbst als Hauptdarsteller (die 3D-Animationsprogramme lassen sich dann ohne große Ausbildung bedienen)! Der PC in zehn Jahren wird also die Möglichkeiten zur kreativen Entfaltung des Einzelnen erheblich vergrößern – und das zu einem Preis von extrapolierter 500 bis 1000 Mark statt 10.000 Mark für ein Spitzengerät. Die weniger die Kreativität unterstützenden Netz-PCs werden noch viel billiger und damit weit mehr verbreitet sein. So vergrößern sich vielleicht auch die intellektuellen Abstände in unserer Gesellschaft...

Rolf Kickuth

Kurzmeldungen und Notizen

Erster Nicht-Amerikaner im ACM-Vorstand

Zum ersten Mal in ihrer über 50-jährigen Geschichte hat die mit 80.000 Mitgliedern wohl größte und bedeutendste Informatik-Gesellschaft einen Nicht-Amerikaner in ihren Vorstand gewählt: Prof. Dr. Claus Unger, Leiter des Lehrgebiets Praktische Informatik II der FernUniversität Hagen, ist nun als Secretary u. a. für den 40-Millionen-Dollar-Haushalt der Association for Computing Machinery (ACM), die ihren Sitz in New York hat, verantwortlich. Die ACM gliedert sich in 36 internationale Fachgruppen und hat nationale Chapter in 25 Ländern.

Neues Studienangebot: Business Informatics

Zum Wintersemester 1998/99 wird an der Universität Rostock ein international orientierter Studiengang mit der Bezeichnung „Business Informatics“ angeboten. Als Sprachen für den Studienbetrieb werden gleichberechtigt Englisch und Deutsch benutzt. Für beide Sprachen werden vorbereitende und studienbegleitende Kurse angeboten. Das Studium verbindet wesentliche Inhalte der Wirtschaftswissenschaften mit denen der anwendungsorientierten Informatik. Mit Partneruniversitäten sind auch einsemestrige Studienaufenthalte in England, Schweden oder Finnland vorgesehen. Nähere Informationen sind über 0381 498 2900 oder 0381 498 3434 zu erhalten.

Neuer Studiengang in Trier: Diplom-Wirtschaftsinformatik

Der Diplomstudiengang Wirtschaftsinformatik wird mit Beginn des Wintersemesters neu an der Universität Trier eingerichtet. Der Studiengang besteht aus den gleich gewichteten Fachteilen Betriebswirtschaftslehre, Informatik und Wirtschaftsinformatik. Mit diesem Konzept will die Universität dem vielseitigen Berufsbild des Wirtschaftsinformatikers gerecht werden. Informationen: Dr. Axel Kalenborn, Tel.: (06 51) 2 01-28 39, <http://www.wi.uni-trier.de>