

Ein Porsche zum Preis eines Golf?

Technologieentwicklung bei Computerchips folgt Gesetzmässigkeiten

Werner Zimmermann

Ärgern Sie sich auch immer, wenn Sie das neueste Prospekt eines PC-Händlers sehen? Für das Geld, das Sie vor einem Jahr für Ihren - damals neuen - PC bezahlt haben, bekommen Sie heute einen Rechner, der 50% mehr leistet. Und wenn Ihr 'Alter' überhaupt noch im Angebot ist, dann kostet er über ein Drittel weniger.

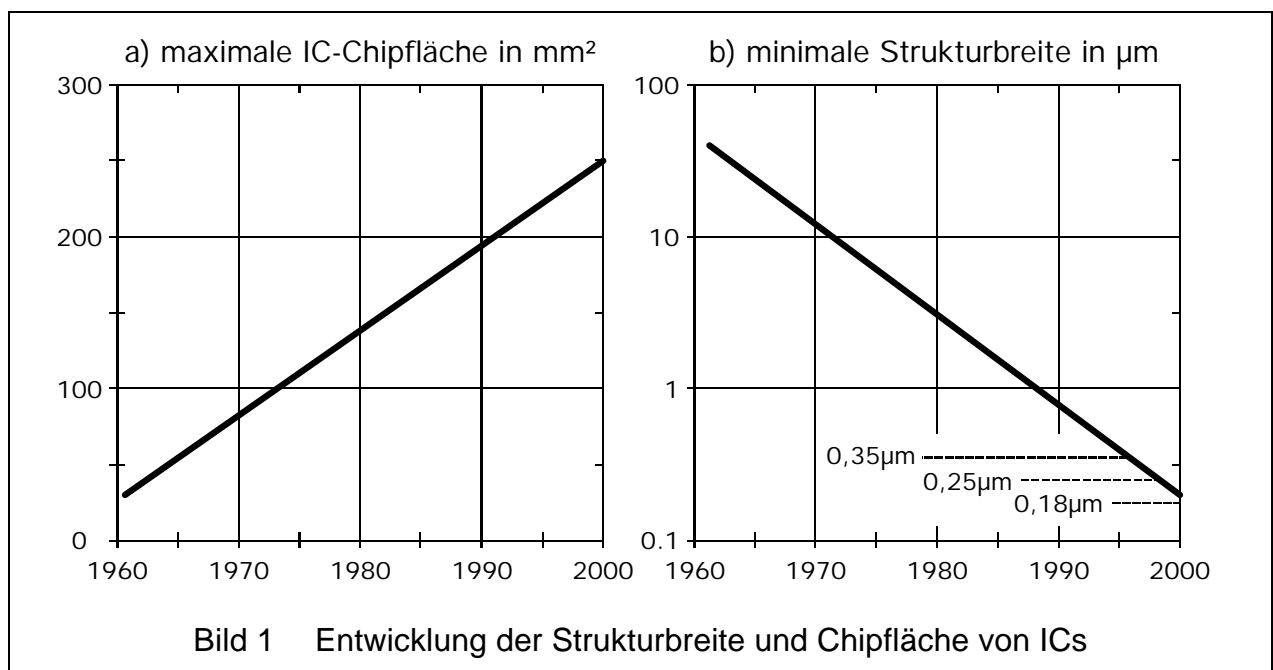
Merkwürdig, nicht? Oder können Sie sich vorstellen, daß Ihr Autohändler Ihnen heute einen Porsche zu dem Preis verkaufen würde, den vor einem Jahr ein Golf gekostet hat?

Bei Computerchips dagegen ist das ganz normal! Die Fortschritte der Mikroelektronik führen dazu, daß die Leistung integrierter Schaltungen bei gleichem oder sogar sinkendem Preis immer mehr zunimmt. Die Geschwindigkeit, mit der neue, leistungsfähigere Produkte in der Elektronik 'alte' Produkte ablösen, mag von aussen betrachtet nicht nur von Jahr zu Jahr immer rasanter erscheinen, für manchen wirkt sie vielleicht sogar bedrohlich, weil andere Technologien und Branchen kaum schritthalten können.

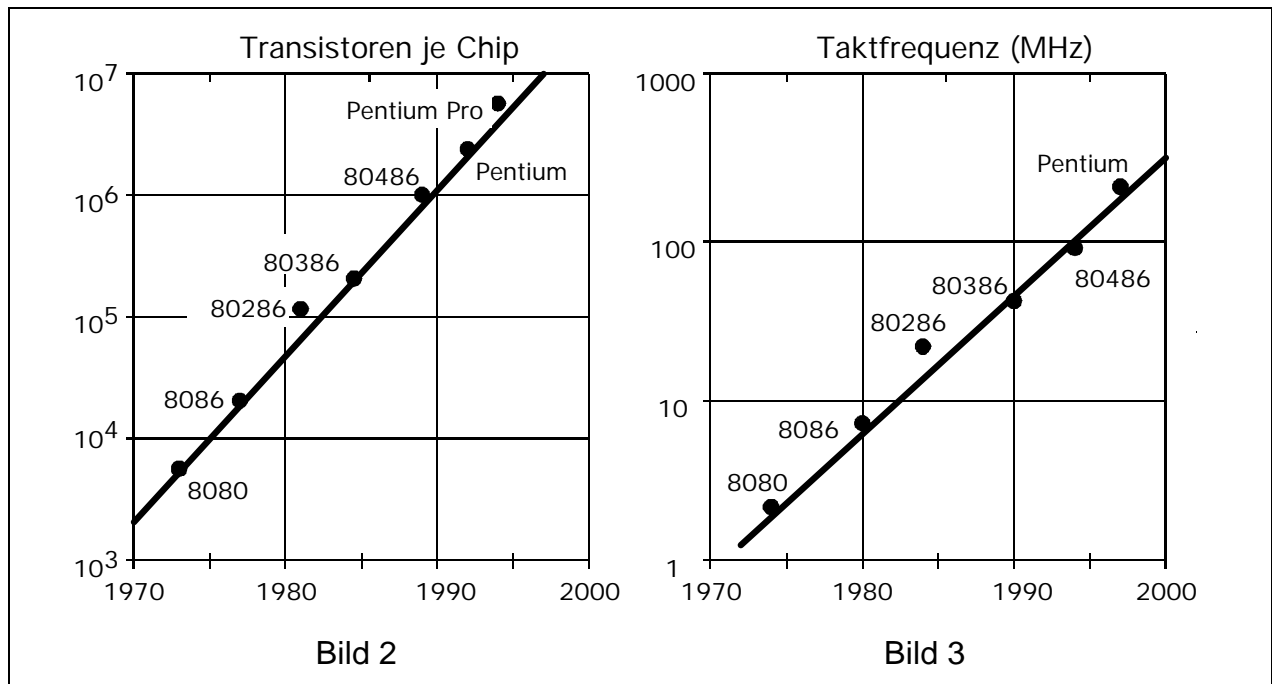
Das Moore'sche Gesetz

Dabei wurde diese **Entwicklung bereits vor über 20 Jahren** nicht nur qualitativ, sondern, wie es sich für einen guten Ingenieur gehört, sogar **quantitativ sehr genau vorhergesagt** [1]. Gordon Moore, einer der Gründer der Firma Intel, stellte 1975 in einem Vortrag auf dem International Electron Devices Meeting (IEDM) eine Prognose auf. Moore postulierte, daß die Chipfläche integrierter Schaltungen (IC Integrated Circuits) im Laufe der Jahre ungefähr linear wachsen wird (Bild 1a), während sich die Strukturbreite alle 2-3 Jahre halbiert (Bild 1b). Insgesamt ergibt dies den in der Fachwelt heute als Moore'sches Gesetz bezeichneten Zusammenhang:

Die Anzahl der Transistoren in einem IC verdoppelt sich alle 2 Jahre.



Die Gültigkeit und verblüffende Genauigkeit des Moore'schen Gesetzes kann man heute, 22 Jahre später, an den als Massenprodukt in jedem PCs eingesetzten verschiedenen Generationen von Mikroprozessoren [2] überprüfen (Bild 2).



Um die Konsequenzen diese Aussage zu verstehen, muß man folgendes wissen:

- **Die Anzahl der Transistoren** und Verbindungsleitungen, die auf einer gegebenen Siliziumfläche aufgebaut werden können, wird durch die bei der 'photo'lithographischen Herstellung und den anschließenden chemischen Ätzprozessen zuverlässig herstellbaren **kleinsten Strukturbreiten bestimmt**, also den kleinstmöglichen Abstand zwischen Halbleiterflächen, Leitungen usw.. Derzeit werden die neuesten Computerchips für den Massenmarkt mit Strukturbreiten von 0,35µm hergestellt, die Entwickler arbeiten bereits an 0,18µm Strukturen. Je kleiner die Strukturen sind, umso mehr Transistoren lassen sich auf einer gegebenen Fläche aufbauen bzw. umso kleiner wird bei gegebenem Schaltungsumfang der gesamte Chip.
- **Die Leistungsfähigkeit eines Computerchips wächst** ganz grob **proportional mit der Anzahl der Transistoren**. Zusätzlich kann man bei kleineren Strukturen wegen der dann kleineren Kapazitäten und kürzeren Leitungswege auch noch die Taktfrequenz steigern (Bild 3), wodurch sich zusammengenommen eine überproportionale Steigerung der Rechenleistung ergibt. Dazu kommen dann noch Fortschritte im "Bau" der Rechner, der sogenannten Rechnerarchitektur, die die Leistung nochmals steigern.
- **Die Fertigungskosten für einen Halbleiterchip sind** - wieder ganz grob - **nur von der Chipfläche, nicht aber von der Anzahl der Transistoren abhängig**. Durch die kleineren Strukturen bekommt man also immer mehr Transistoren und damit mehr Leistung bei gleichbleibenden Kosten. Natürlich wird der Aufwand für die Fertigungsanlagen, etwa die Reinräume, mit den kleineren Strukturen immer größer. So waren für eine Halbleiterfabrik für 0,5µm-Strukturen Investitionen von knapp 1 Mrd. US\$ notwendig, während man für 0,25µm Strukturen wohl schon 1,5Mrd.\$ investieren muß und bei 0,18µm mit 2 Mrd.\$ rechnet. Da aber durch Verbesserungen

im Fertigungsprozeß in der Regel auch die Ausbeute steigt, dh. bei einem Fertigungsdurchlauf immer mehr "gute" Teile produziert werden, können die höheren Investitionssummen - bei erfolgreichen (!) Produkten - weitgehend kompensiert werden, so daß die ursprüngliche Aussage doch stimmt. **Die Ausbeute begrenzt** dabei auch gleichzeitig **die Chipfläche**, da sie mit zunehmender Fläche abnimmt.

Gibt es Grenzen für die Integration?

Ja, aber die kommen nur teilweise aus dem technologischen Bereich. Die wesentlichen technischen Probleme sind:

- **Bei den photolithographischen Prozessen muß die Wellenlänge des** bei der Belichtung mit Hilfe von Photomasken **verwendeten 'Lichts' kleiner sein als die kleinste Strukturweite**. Sichtbares Licht war daher nur für Strukturen im μm -Bereich geeignet, heute werden Eximerlaser eingesetzt, die für Strukturen bis ca. $0,25\mu\text{m}$ ausreichend sind. Für noch kleinere Strukturen existieren für Laboruntersuchungen zwar bereits geeignete Quellen, wie beispielsweise Röntgen- oder Elektronenstrahlbelichtungseinrichtungen, doch sind diese für die Anwendung in der Massenfertigung zu teuer und erlauben nicht den erforderlichen Durchsatz.
- **Die Gehäusetechnologie der Computerchips bereitet** zunehmend **Schwierigkeiten**. Die aus einem Gehäuse abführbare **Wärmeverlustleistung** ist durch die Gehäusegröße vorgegeben und wird im wesentlichen durch die Chipfläche bestimmt. Andererseits ist die in einem Chip entstehende Verlustleistung der Anzahl der Transistoren, der Taktfrequenz und der Versorgungsspannung annähernd proportional. Je mehr Transistoren mit immer höherer Taktfrequenz arbeiten, desto mehr Wärme wird produziert. Da die mittlere zulässige Chiptemperatur der Silizium-Chips aber wegen der dann drastisch abnehmenden Langzeitzuverlässigkeit nicht wesentlich über den Wert von 125°C gesteigert werden kann, benötigen heute nicht nur die Stromversorgungen von PCs sondern die Mikroprozessoren selbst **Kühlkörper und eigene Lüfter**. Gleichzeitig wird die Versorgungsspannung von früher 5V auf derzeit 3V und zukünftig unter 2V abgesenkt.
- Solange andererseits aber immer noch nicht komplette Rechnersysteme, dh. der Mikroprozessor mit dem gesamten Speicher und allen übrigen Peripheriebausteinen wie Bildschirmsteuerung etc. in einem Chip integriert werden kann, nimmt die Zahl der an einem Computerchip anliegenden Signale immer mehr zu. Schon Standardmikroprozessoren haben heute annähernd 400 Anschlüsse auf einer Grundfläche von wenigen Quadratzentimetern. **Die Kontaktierung der Anschlüsse und der zugehörigen Leiterbahnen bereitet erhebliche Schwierigkeiten** bei der Leiterplattenherstellung.

Die eigentlichen Schwierigkeiten aber kommen eher aus dem 'Engineering'bereich:

- **Schaltungen** mit mehreren Millionen Transistoren **können nicht mehr** auf der Ebene logischer Grundelemente oder gar Transistoren **'von Hand' entworfen** und mit Hilfe von Schaltplanzeichnungen beschrieben **werden**. Der **Entwurf** erfolgt heute **mit Hardwarebeschreibungssprachen, wie** beispielsweise **VHDL, und automatischer Schaltungssynthese**. Bei dieser neuartigen Entwurfsmethodik, die mehr einer hardwarenahen Softwareentwicklung denn einer klassischen Hardwareentwicklung ähnelt, gibt es bei der Mehrzahl der heute tätigen Entwickler noch Ausbildungs-

defizite. Über die **Aktivitäten des Fachbereichs Informationstechnik** zu dieser Thematik wird an anderer Stelle in diesem Heft berichtet [4].

- Computerchips ohne die entsprechende Software leisten wenig mehr als daß sie Verlustwärme produzieren. **Die Leistungsfähigkeit von Software** aber **wächst** im Gegensatz zu ihrem Rechenleistungsbedarf deutlich **langsamer als die der Hardware**. Damit sich die Kluft zwischen Hardware und Software zumindest nicht noch weiter vergrößert sind verstärkte Anstrengungen in der Softwareentwicklung notwendig. Über Ansätze im Ausbildungsbereich wie den im Sommersemester 1997 angelaufenen **Studiengang Softwaretechnik an der FHTE** wird ebenfalls an anderer Stelle in dieser Ausgabe berichtet.
- Durch die Verkleinerung der Strukturbreiten, die Reduktion der Ströme und Spannungen und die Erhöhung der Taktfrequenz treten wieder Effekte auf, die der Analogtechniker ganz gut kannte, die man aber mit dem Übergang zur Digitaltechnik eigentlich überwunden zu haben glaubte. Bei elektrischen Strömen und Ladungen, die nur noch aus einer handvoll Elektronen bestehen, beeinflußt das Rauschen plötzlich auch die Funktion von Rechnern. Bei Frequenzen, die sich dem Mikrowellenbereich von 1GHz und mehr annähern, spielen Wellen- und Ausbreitungseigenschaften in Rechnernetzen eine entscheidende, auf Leiterplatten eine wichtige und selbst innerhalb von ICs bereits eine nicht mehr einfach zu vernachlässigende Rolle. Für die Ausbildung heißt dies, daß die in jüngster Zeit eher ungeliebt erscheinenden **Grundlagenfächer der Physik und Elektrotechnik** oder die von den Computingingenieuren bisher so verschmähte **Hochfrequenztechnik** ihren festen Platz **auch im Computerbereich** (zurück-)erobern werden.

Und die wirtschaftliche Situation?

Erinnern Sie sich noch an das Gezeter, als die Automobilhersteller in einer 'inquisitions'-ähnlichen Kampagne ihre Zulieferer mit Forderungen nach teilweise drastischen Preisreduktionen unter Druck setzten; Ständig mehr Leistung für immer weniger Geld und steigende Investitionskosten? Also müßte es der Computer-, insbesondere der Halbleiterindustrie doch katastrophal schlecht gehen. Nun, das Gegenteil ist der Fall. Der Marktführer der Halbleiterhersteller, Intel, hat mit einem jährlichen Umsatzvolumen von 21 Mrd.\$, dieselbe Größenregion erreicht, in der sich beispielsweise auch der weltgrößte Automobilzulieferer bewegt. Bei einem Gewinn von 25% des Umsatzes und einem Forschungs- und Entwicklungsaufwand in ähnlicher Höhe. Größenordnungen, von denen etwa die Automobilbranche nur träumen kann. Der Marktführer im Softwarebereich, Microsoft, erreicht immerhin auch schon einen Umsatz von 6 Mrd.\$ bei einem Gewinn von gut einem Drittel des Umsatzes und wächst mit ähnlichen Raten [3]. Und das alles nicht mit Lean Managementmethoden, sprich Reduktion der Mitarbeiterzahl! An der Spitze von Intel und Mikrosoft stehen Ingenieure und Naturwissenschaftler, die mit guten, schnell entwickelten und auf dem Markt eingeführten technischen Produkten **jährlich etwa 15% mehr Mitarbeiter** beschäftigen. Übrigens, soweit Entwicklung und Produktion betroffen sind, nicht in Billiglohnländern, sondern vorwiegend im eigenen Land. Natürlich hat dieses Geschäft auch seine Schattenseiten. Firmen, die zu langsam auf technische Entwicklungen reagieren, verschwinden sehr schnell. Aber umgekehrt können neueinsteigende Firmen mit guten Produkten auch schneller wachsen als in den meisten anderen Branchen. Die Marktführer im Halbleiter- und Softwarebereich genau wie die meisten ihrer Wettbewerber sind Firmengründungen der letzten 30 Jahre. Gute Chancen mit überschaubarem Investitionsvolumen in wenigen Jahren Beacht-

liches auf die Beine zu stellen, bestehen dabei auch hierzulande insbesondere im Dienstleistungsbereich der Software- und ASIC-Entwicklung. So verfügen etwa die auf diesem Gebiet tätigen Steinbeis-Transferzentren alleine im Fachbereich Informationstechnik über mehr als 170 Mitarbeiter. Wie sagte doch Gordon Moore auf der IEDM 1996: **We just did it!**

- [1] K.Knapp: Halbleiterproduktion unter der Lupe. Elektronik. 3/97, S.18
- [2] S.Goodfellow, D.Weiss: Processor Specifications. Electronic Design.1/97, S.53ff
- [3] M.Cusumano, R.Selby: Microsoft Secrets. Free Press, Simon & Schuster, New York, 1995
- [4] W.Zimmermann, G.Kampe: Chips aus dem Computer. In dieser Ausgabe des Spektrums.

Prof. Dr.-Ing. Werner Zimmermann lehrt Digital-, Rechner- und Regelungstechnik im Fachbereich Informationstechnik.