



## **Moore's Law: Totgesagte schrumpfen länger**

"Die Rechenleistung von Computern verdoppelt sich alle ein bis zwei Jahre." So oder ähnlich wird das von Intel-Mitbegründer Gordon Moore vor fast 50 Jahren formulierte Moore's Law oft zitiert - aber schon das ist eine Interpretation dessen, was der Ingenieur 1965 in der Fachzeitschrift Electronics veröffentlicht hatte. Daher gibt es rund um diese Faustregel, die in der Technologiebranche fast wie ein unumstößliches Naturgesetz behandelt wird, zahllose Missverständnisse.

Der Ausgangspunkt von Gordon Moore war eigentlich ein ganz simpler: Er hatte, noch beim damals größten Chiphersteller Fairchild tätig, beobachtet, dass sich in einem Jahr 60 statt vorher 30 Schaltelemente auf einem Baustein integrieren ließen. Moore extrapolierte diesen Effekt auf die nächsten zehn Jahre, bis 1975 sollten sich also 65.000 Elemente integrieren lassen. Das erwies sich als korrekt, allerdings verlief die Verdopplung mit Schwankungen im Zeitraum von 18 bis 24 Monaten. Daraus wurden dann durch den Intel-Manager David House 18 Monate, wie Moore im Jahr 2003 auf einer Konferenz angab.

Aus der technischen Beobachtung war also auch schon damals ein Marketingargument geworden, dem aber die gesamte Halbleiterbranche folgte, weil Intel dies ständig vormachte. Das gilt auch für die Verdopplung der Rechenleistung, denn die war durch mehr Rechenwerke für immer komplexere Aufgaben in den ersten Jahrzehnten der Chipentwicklung noch leicht zu erreichen. Heute bedeutet die Verdopplung der integrierten Elemente nicht automatisch eine Verdopplung der Rechenleistung. Die Aufteilung von Programmen in Threads und die damit mögliche Nutzung von Mehrkern-CPUs war in den 1960er Jahren noch nicht erfunden, es ging darum, den Funktionsumfang der Prozessoren zu erhöhen.

### **Eine Regel aus der Vorzeit der CPUs**

Die damaligen Chips waren vor allem Ansammlungen von fest verdrahteten Funktionen für bestimmte Anwendungen, noch nicht voll programmierbare Prozessoren. Je mehr Rechenarten in den Chip integriert werden konnten, desto schneller arbeitete er auch. Erst 1971 entwickelte das 1968 gegründete Unternehmen Integrated Electronics - Intel - mit dem 4004 den ersten echten Mikroprozessor.

Intel selbst legte sich im Jahr 2006 mit der Tick-Tock-Strategie darauf fest, alle zwei Jahre die Strukturbreite der Schaltungen zu verkleinern. Der Druck zur Einhaltung von Moore's Law wurde also immer größer. Dabei stellt die Verkleinerung ein Tick dar, ein Tock ist eine Überarbeitung der Prozessorarchitektur. Erstmals seit acht Jahren gibt es nun eine größere Verzögerung bei der Verkleinerung, die im Englischen mit "shrink" für das deutsche Wort "schrumpfen" beschrieben wird: Mitte 2014 wäre eigentlich der erste 14-Nanometer-Prozessor Broadwell alias Core M fällig gewesen. Nun soll er erst Ende 2014 erscheinen, und auch das nur für Tablets und Convertibles. Intel bestätigte das schon vor gut einem Jahr.



### **Spätestens 2035 ist Schluss**

Der inzwischen 85-jährige Gordon Moore hat sich zu dem nach ihm benannten Gesetz in den letzten Jahren immer seltener geäußert, die Tendenz ist aber klar: "So eine Sache kann nicht ewig weitergehen", sagte er 2005 Golem.de. Noch etwa 20 Jahre sollte die Regel nach seiner damaligen Einschätzung Gültigkeit behalten. Damit wäre also 2025 die bisherige Entwicklung am Ende angelangt. Der ehemalige Intel-Mitarbeiter Robert Colwell, der seit dem Pentium Pro von 1995 an zahlreichen Prozessordesigns mitgearbeitet hat, ist da kritischer. Bereits 2013 sagte er in einem Vortrag auf der Konferenz Hot Chips, dass er nur noch bis zum Jahr 2020 mit einem Fortbestehen des Moore'schen Gesetzes rechnet. Dann, so Colwell, seien die Möglichkeiten des Siliziums mit einer Strukturbreite von 7 Nanometern endgültig ausgeschöpft. Colwell ist als Leiter der Prozessorabteilung der US-Militärforschungsbehörde Darpa weiterhin mit Halbleitertechnik beschäftigt. Ende Oktober 2014 bekräftigte der Ingenieur dann, dass dieser Zeitraum sich nicht groß verändern dürfte. Einem Bericht der EE Times zufolge sagte Colwell auf einer Konferenz der Ingenieursvereinigung IEEE: "Man kann darüber streiten, wann es endet, aber es gibt keine Chance, dass das noch bis 2035 so weitergeht." Ganz für erledigt erklären wollte Colwell die Regel aber auch jetzt noch nicht, er sagte nur: "Wir befinden uns am Lebensabend von Moore's Law."

### **Neue Interconnects und andere Architekturen als Alternative**

Colwell machte diese Äußerungen bei einer Podiumsdiskussion zusammen mit dem IBM-Forscher Wilfried Haensch und dem Informatik-Professor Thomas Sterling von der Universität von Indiana. Die drei waren sich einig, dass Moore's Gesetz nicht mehr lange Gültigkeit behalten wird, aber nicht darüber, was nach dem Silizium als Basismaterial dienen soll. Stattdessen sprach sich Haensch für eine Vernetzung von Chipbestandteilen aus, die menschlichen Neuronen ähneln soll. Sterling dagegen forderte eine vollständige Abkehr von der Von-Neumann-Architektur, auf der heutige Computer basieren. Eine Alternative dazu könnten Quantencomputer sein, die im Gegenzug auch Robert Colwell erwähnte. Sie eignen sich aber noch nicht für allgemeine Aufgaben, sind dafür bei speziellen Anwendungen wie der Kryptographie sehr schnell - eben die Fast-alles-Rechner.

Eher ins Reich der PR einzuordnen sind Frontalangriffe auf Moore's Law, wie sie 2010 Nvidias Chefwissenschaftler Bill Dally führte. Er bezeichnete die Steigerung der Rechenleistung durch Verkleinerung der Strukturbreite als erledigt, wichtiger sei stärkere Parallelisierung - natürlich durch GPUs. Dass Nvidia mit seinen Produkten, zu denen später auch noch ARM-SoCs kamen, das Moore'sche Gesetz genauso brauche wie andere Chiphersteller, war Intels Replik. Der starre Blick nur auf die Strukturbreite von Prozessoren für Desktop-PCs und Notebooks - den ja Intel durch sein Tick-Tock geschärft hatte - hilft spätestens seit 2007 bei der Beurteilung von Moore's Law nicht mehr weiter. Damals erschien das erste iPhone und in der Folge begann die PC-Krise: Die Nutzer kauften immer mehr Smartphones und Tablets und weniger neue PCs. Dieser Trend hält bis heute an, auch wenn die Marktforscher für PCs langsam Besserung beobachten. Von den zweistelligen



Zuwachsraten, die bis Anfang des 21. Jahrhunderts üblich waren, ist die Branche bei weniger portablen Computern aber noch weit entfernt.

Die Konzentration auf möglichst sparsame Systems-on-a-Chip hat bei den Halbleiterherstellern zu einer Diversifikation der Fertigung geführt, bei der mehrere Strukturbreiten mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren parallel entwickelt und später lange in Serie eingesetzt werden. Ein gutes Beispiel dafür ist der weltgrößte Auftragshersteller, auch Foundry genannt, namens TSMC aus Taiwan.

Dort werden seit dem Ende des Jahres 2011, und damit seit fast drei Jahren, GPUs mit 28 Nanometern Strukturbreite hergestellt. Darunter leiden AMD und Nvidia, welche die schnellsten ihrer Desktop-Chips dort herstellen lassen. Golem.de hat diesen Effekt als die Nanometer-Falle beschrieben. Er führte dazu, dass die Ende 2013 vorgestellten Radeon-R9-GPUs (Codename Hawaii) von AMD eine extreme Leistungsaufnahme aufwiesen. Nvidia hat fast ein Jahr gebraucht, um mit der GTX 980 mit Maxwell-Technik zu beweisen, dass sich auch bei gleicher Strukturbreite schnellere und sparsamere Grafikprozessoren herstellen lassen. Möglich wurde das durch eine stark veränderte Architektur, die man aber zuerst in kleineren GPUs erproben musste.

TSMC hat offenbar in den vergangenen Jahren wenig in die Entwicklung von kleineren Strukturbreiten für große Logikbausteine wie GPUs investiert, dafür viel mehr in andere Fertigungsprozesse für sparsame SoCs, weil sich hier größere Stückzahlen und Umsätze erreichen lassen. So gibt es in einem anderen als dem für GPUs verwendeten Prozess bereits 20-Nanometer-SoCs, mit denen unter anderem Apples A8 hergestellt wird.

Mit geringeren Ausbeuten und damit teureren Chips werden auch schon 16-Nanometer-SoCs bei TSMC hergestellt. Dabei werden auch Transistoren in der FinFET-Bauweise eingesetzt. Diesen Schritt hatte Intel bereits mit seinen 22-Nanometer-CPU, Codename Ivy Bridge, und der Serie Core i-3000 vollzogen - und zwar im Jahr 2012. Nach den FinFETs soll es bei TSMC aber wieder schneller gehen, bereits Ende des Jahres 2015 will das Unternehmen die Serienfertigung von 10-Nanometer-SoCs aufnehmen.

Bis dahin dürfte Intel gerade einmal seine 14-Nanometer-Generation für alle Produktgruppen fit gemacht haben und erste 10-Nanometer-Chips herstellen, denn die aktuelle Strukturbreite wird für die Atom-SoCs mit einem anderen Prozess parallel zu den größeren CPUs wie dem Core M entwickelt. Wie Intels Fertigungschef Mark Bohr auf dem letzten Intel Developer Forum im September 2014 vor Journalisten sagte, liegt die Serienreife dieser beiden Verfahren rund 6 Monate auseinander.

Intel kann sich die Investition in die gleiche Strukturbreite für verschiedene Prozesse offenbar schneller leisten als TSMC. Das liegt an einer dem Moore's Law ähnlichen Regel, die viel weniger bekannt ist und entweder als "Moore's Second Law" oder nach dem US-Investor Arthur Rock als "Rock's Law" bezeichnet wird.

Demnach verdoppeln sich die Kosten für eine neue Chipfabrik alle vier Jahre. Ähnlich wie beim ersten Gesetz von Gordon Moore ergibt das eine exponentielle Steigerung, und zwar für Investitionen. Das setzt ein kontinuierlich steigendes Wachstum voraus - das aber haben heute allenfalls noch die Chips für Mobilgeräte.



### Neue Bauformen und Materialien

Neben CPUs, GPUs und SoCs galt Moore's Law bisher auch für alle anderen Halbleiter, beispielsweise die durch Mobilgeräte und SSDs immer wichtiger gewordenen Flash-Speicher. Auch hier zeichnet sich aber eine Verlängerung der Zeiträume bis zum nächsten Shrink ab, was die Hersteller durch andere Kniffe abmildern. So hat beispielsweise Samsung erst 2014 die Fertigung von V-NAND aufgenommen, auch 3D-NAND genannt. Bis zu 32 Schichten von Speicherzellen werden dabei in einem Die übereinandergestapelt, was in der Fertigung noch viel höhere Kapazitäten als bei den schon lange üblichen Chipstapeln aus mehreren Dies ermöglicht. Dadurch kann das Unternehmen bei gleichbleibender Strukturbreite mehr Speicher pro Fläche anbieten und letztendlich die Kosten pro Gigabyte doch senken. Für Flash-Speicher ist das wirtschaftlich gesehen wichtiger als immer dem nächsten Shrink hinterherzujagen.

Neben den FinFETs, die sich nach und nach bei den Prozessoren durchsetzen dürften, wartet die Halbleiterbranche aber noch immer auf den nächsten Durchbruch bei der Bauform der schnell schaltenden Transistoren, die für CPUs und GPUs wichtig sind. Die letzte große Änderung gab es hier 2007 von Intel mit dem sogenannten High-k Metal Gate (HKMG). Dabei wird der eigentliche Schalter des Transistors, das Gate, zu einem Teil aus Metall hergestellt. Zudem gibt es mit Materialien wie Hafnium seitdem bessere Isolatoren gegen Leckströme. Dies war zuvor eines der größten Probleme bei schnellen Chips.

Mit HKMG werden seitdem fast alle modernen Bausteine hergestellt, und zwar bei allen Unternehmen. Die gleichzeitige Änderung der Bauform und der Materialien war der größte Umbau von integrierten Schaltungen seit ihrer Erfindung. Das Verfahren ermöglicht es auch, in der Produktion das Gate zuerst oder zuletzt zu formen, was den Prozess für mehr Leistung oder geringeren Energiebedarf flexibel anpassbar macht. Auch das führte zu der Diversifikation der Fertigung.

Ein ähnlich innovatives Prinzip wie HKMG ist aber bisher nicht in Sicht, und das Unternehmen, von dem es kommen könnte, hält sich dazu noch äußerst bedeckt. Intel hat zwar schon angekündigt, dass im Zweijahresrhythmus die Strukturbreiten von 10 und 7 Nanometern erreicht werden sollen - und auch darüber hinaus habe man schon Ideen, erklärte Intel-Vize Renee James auf dem IDF 2014. Dabei sagte die Managerin auch: "Seit es das Gesetz gibt, wird Moore's Law alle zehn Jahre für tot erklärt". Welcher grundlegende Trick den Fortbestand der Regel aber vielleicht bis hin zu 5 Nanometern sichern soll, verriet sie nicht. Wenn dieser Shrink auch erreicht wird, gilt das Gesetz immerhin bis 2019.

Von weniger bekannten Unternehmen gibt es zudem schon seit Jahren das Prinzip von "More than Moore", das unter anderem die Firma X-Fab verfolgt. Dieser Hersteller integriert digitale Schaltungen unter anderem mit Analogelektronik, was auch Mixed-Signal-Processing heißt. Damit erhöht sich der Funktionsreichtum eines Chips bisher sogar schneller als die Transistordichte allein. Durch neue Techniken wie optische Verbindungen soll dieser Trend anhalten.



### **Moore's Law ist längst weniger wichtig geworden**

Es ist an der Zeit, von Moore's Law Abschied zu nehmen - aber nicht so abrupt, wie das der schon oft beschworene "Tod" der Regel nahelegen würde. Die Beobachtung eines Ingenieurs, der sie selbst nie als Gesetz bezeichnete, war zwar lange Zeit die Triebfeder der gesamten Computerbranche, basiert aber auf dem Stand der Halbleitertechnik Mitte der 1960er Jahre. Damals wie heute werden integrierte Schaltungen aus Silizium gebaut, und dieses Material scheint allmählich ausgereizt. Schon seit mehreren Jahren sind einige Teile eines Chips nur noch wenige Atomlagen dick, und dass das nicht ewig so

weitergehen kann, hat die Branche längst eingesehen.

Nur auf die Strukturbreite zu achten, ist bei der Vielfältigkeit heutiger Bausteine viel zu kurz gedacht. Neue Arten der Konstruktion von Transistoren, neue Materialien und vor allem die Veränderung der Nachfrage bei den Kunden machen eine andere Betrachtung der Fortschritte der Halbleiterfertigung nötig. Es kommt heute fast nur noch bei großen Server-CPU's und den Desktop-GPU's für Spiele und Rechenanwendungen darauf an, möglichst viele Transistoren auf kleinsten Raum zu quetschen. Bei den anhaltend boomenden mobilen Geräten sind minimaler Energiebedarf und geringe Herstellungskosten viel wichtiger - andere Komponenten wie Display, Designer-Gehäuse und Akku sind hier die teuersten Elemente, das war beim klassischen Desktop-PC die CPU.

Dennoch scheint beim Wechsel zu einer anderen Technologie als dem Silizium oder gar einer völlig anderen Architektur für Computer eine gewisse Ratlosigkeit zu herrschen. Noch rund zehn Jahre dürfte die Industrie aber Zeit für "the next big thing" auf technologischer Ebene haben. Der frühere Intel-Vize Pat Gelsinger hat diesen Zustand im Gespräch mit Golem.de einmal mit einem Beispiel beschrieben: "Stell Dir vor, Du fährst nachts im Nebel mit dem Auto. Durch die Scheinwerfer kannst Du zwar nur 100 Meter weit sehen - aber das heißt nicht, dass die Straße danach einfach aufhört." Dass Moore's Law 2015 immerhin noch seinen 50. Geburtstag feiern kann, gilt also als sicher.

24.10.2014, Autor: Nico Ernst , golem.de

### **Kommentar**

Ein monumentaler Artikel der zwar schwere Kost ist, aber an Fragen nichts offen lässt. Zusammenfassend würde ich behaupten, dass alle Anstrengungen der Chipindustrie immer schneller Chips und Prozessoren zu entwickeln nichts gebracht haben. Spätestens beim nächsten Software

Hintergrundinfos zum Wissenschaftsthiller „Die Nanolithografie“ von Thomas Biehlig

Update von Windows & Co wird die zusätzliche Leistung sinnlos verplempert. Warten wir einfach auf „the next big thing“.

Doch was hat das Moorsche Gesetz ´ mit meinem Buch zu tun? Finden Sie es heraus.

@T.Biehlig

[Neugierig auf das Buch? Klicken Sie einfach auf diesen Link - und Sie werden zu Amazon weiter geleitet.](#)

