

ZUKUNFT DER PROZESSOR-TECHNIK



Das Ende von Moores Law

Noch gilt das Mooresche Gesetz, nach dem sich die Rechenleistung von Prozessoren etwa alle 18 Monate verdoppelt. Doch wenn 2020 die Schaltkreisstrukturen die Größenordnung von Atomen haben, ist eine endgültige Grenze erreicht. ■ DR. KLAUS MANHART

Schneller, höher, weiter: Die permanente Steigerung der Rechenleistung ist seit Beginn des Computerzeitalters eine der wenigen Konstanten in der IT, die sich nicht ändert. 1965, also vor bald 50 Jahren, hat Gordon Earle Moore, damals Chef einer Halbleiterfirma im kalifornischen Fairchild und einige Jahre später Gründer von Intel, die These aufgestellt, dass sich die Integrationsdichte – also die Zahl der Transistoren pro Flächeneinheit – und damit die Leistungsfähigkeit von Prozessoren in regelmäßigen Abständen verdoppeln werde. Abgeleitet hatte er das nach ihm benannte Mooresche Gesetz aus Beobachtungen in der Zeit von 1959 bis 1965, bei der sich die Zahl der Komponenten auf einem Chip jedes Jahr verdoppelt. Diese Faustregel hat er 1975 dahingehend korrigiert, dass er die Verdoppelung der aktiven Komponenten eines Chips auf etwa alle zwei Jahre vor-

aussagte. Heute geht man davon aus, dass der Zeitraum der Verdoppelung mit etwa 18 Monaten hinreichend genau erfasst wird

Außer der physikalischen Grenze gibt es eine wirtschaftliche

Doch spätestens um das Jahr 2020 dürfte damit Schluss sein. Dann nämlich kommt die Chip-Industrie an eine technische und physikalische Grenze, bei der sich die Bauteile nicht mehr weiter miniaturisieren lassen. Vorausgesetzt, die technische Entwicklung setzt sich so fort wie die letzten Jahre – wogegen im Moment nichts spricht.

Die Transistoren als Universalelemente der Mikroelektronik haben dann um 2020 nur noch Abmessungen von wenigen Atomen. Davon abgesehen stellt sich schon vorher eine ökonomische Grenze: Der Herstellungsaufwand für die immer kleineren Bauelemente und Mikrostrukturen wird nach

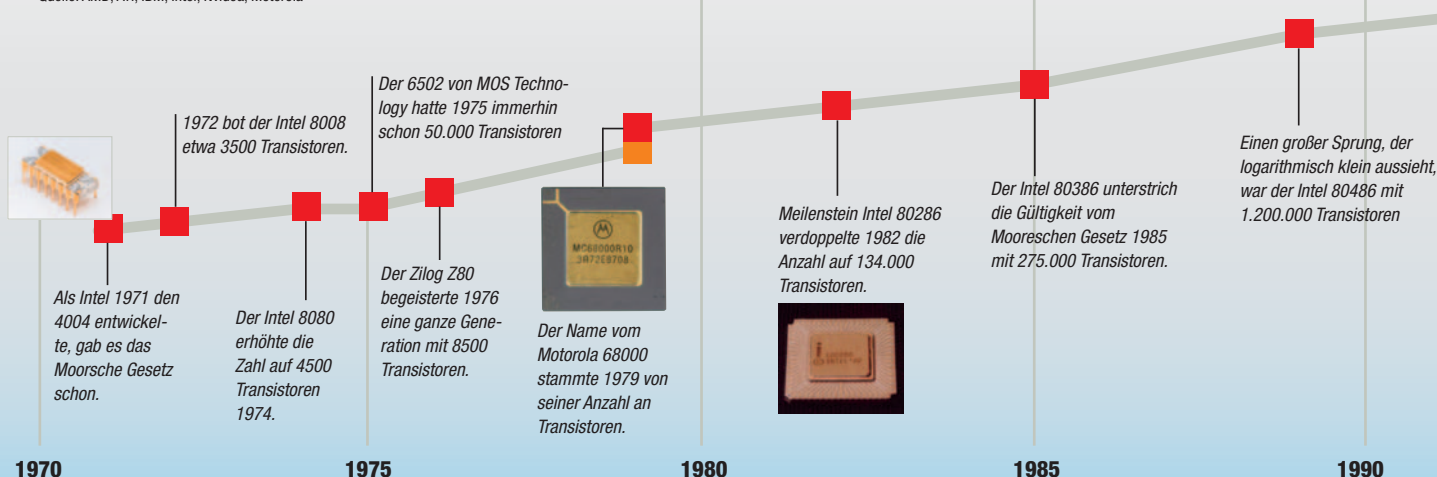
Ansicht vieler Experten so enorm, dass er für die Chip-Produzenten wirtschaftlich kaum mehr zu bewältigen ist. Es wird in wenigen Jahren einen Punkt geben, an dem sich die Investitionen nicht mehr lohnen. Das Aus für die Chip-Branche bedeutet das natürlich nicht. Intel, AMD und Co. werden andere Wege finden, die Performance ihrer Prozessoren weiter zu verbessern. Doch das wird deutlich langsamer sein: Und das bedeutet das Ende des Mooreschen Gesetzes.

Immer kleinere Strukturen sorgen für die höhere Rechenleistung

Als Moore im April 1965 seine These in der Zeitschrift Electronics veröffentlichte, hatte das Computerzeitalter noch gar nicht richtig begonnen: Der erste flache Transistor war gerade sechs Jahre alt. Die auf dem Markt erhältlichen Schaltkreise bestanden

Alle 18 Monate verdoppelt sich die Prozessorleistung

Quelle: AMD, ATI, IBM, Intel, Nvidia, Motorola



aus 30 Transistoren, im Labor bastelten Ingenieure an Chips mit 60 Komponenten. Dann ging es Schlag auf Schlag: Der erste 1-Chip-Mikroprozessor 4004 von Intel 1971 hatte schon 2300 Transistoren, der Intel 8008 drei Jahre später 4500.

Der 1993 entwickelte Intel Pentium konnte mit 3,1 Millionen, der 4 Jahre später entwickelte Pentium II mit 7,5 Millionen aufwarten. Aktuelle Prozessoren wie der Intel Core i7 verfügen über 1,5 Milliarden Komponenten und mehr – die nächste Prozessor-Generation erreicht dann 5 bis 10 Milliarden Transistoren.

Das Moorsche Gesetz ist eine Faustregel und kein Naturgesetz

Moore's Gesetz ist kein wissenschaftliches Naturgesetz, sondern eine Faustregel, die auf eine empirische Beobachtung zurückgeht. Bisher hat die Regel zuverlässig den Fortschritt vorhergesagt – zu Moore's eigener Verblüffung. Kritiker bemängeln, dass diese empirische Regularität nichts anderes ist als eine sich selbst erfüllende Prophezeiung. Danach hat sich das Moore'sche Gesetz nur deshalb bestätigt, weil alle relevanten Akteure sich an der Moore'schen Vorgabe ausrichten. Die gesamte High-Tech-Branche orientiert sich an Moore's Gesetz und der Halbleiterindustrie dient es seit Langem als Zielvorgabe, die es unbedingt einzuhalten gilt. Schon allein deshalb, weil sich Forscher und Entwickler auf gemeinsame Meilensteine einigen müssen, um wirtschaftlich arbeiten zu können. Aufgrund



Intel-Mitgründer Gordon Moore formulierte das nach ihm benannte „Gesetz“, nach dem sich die Rechenleistung regelmäßig verdoppelt

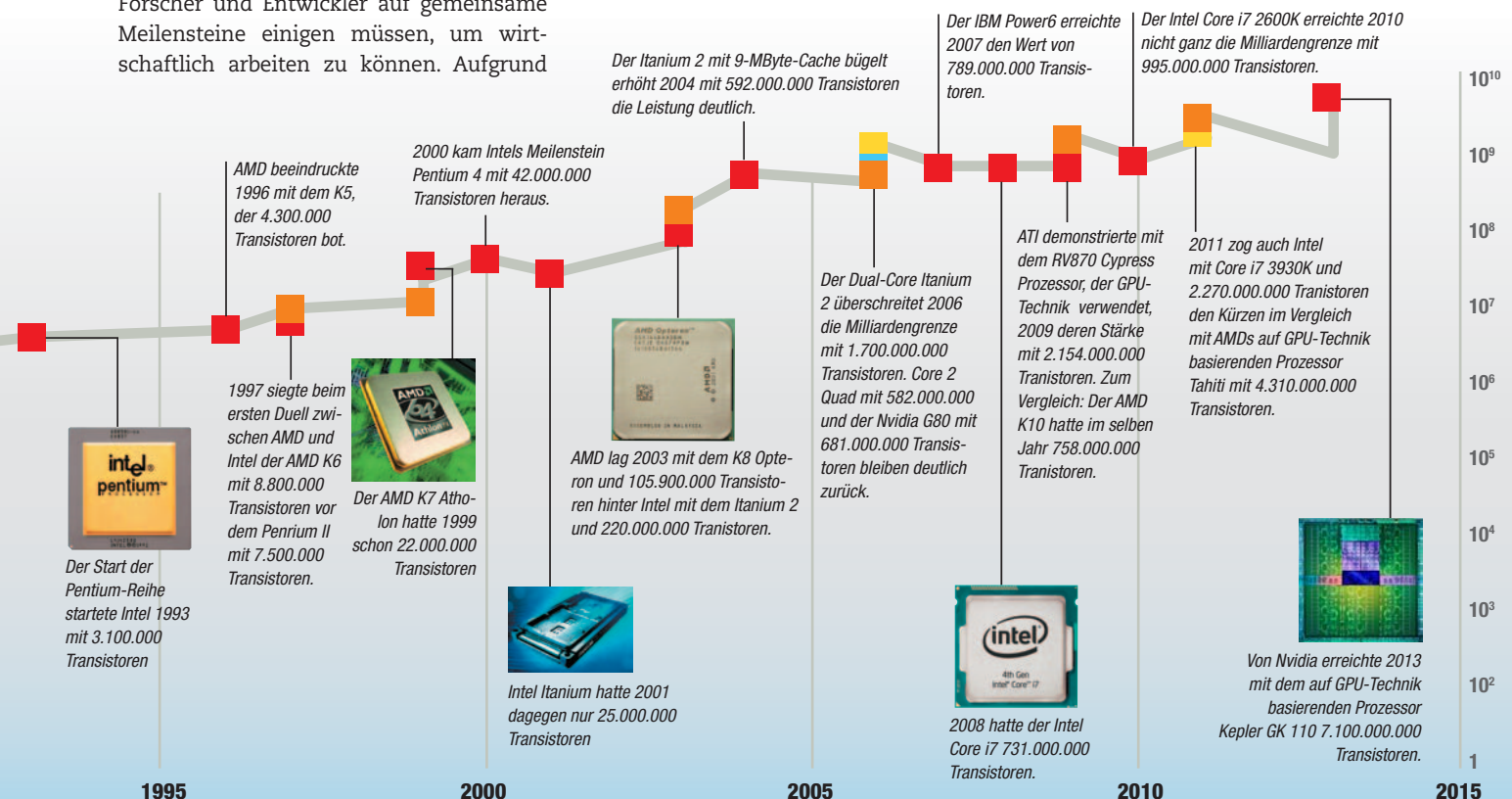
dieser Vorgaben gelang es den Herstellern von Prozessoren und Speicherchips in den letzten Jahren immer, die Leistung ihrer Produkte nach oben zu schrauben – genauso wie von Moore vorhergesagt, oder besser: vorgegeben. „Grundsätzlich“, sagte einmal Intels erster Cheftechnologe Pat Gelsinger vor vielen Jahren, „haben wir bisher keine physikalische Barriere gefunden, die uns hindert, Moore's Law fortzuschreiben.“ Technische Hindernisse, die sich dieser Entwicklung in den Weg stellten, wurden

rechtzeitig beiseite geräumt, sodass ein abzusehendes Ende der Entwicklung immer wieder ein gutes Stück nach hinten geschoben wurde: mit immer raffinierteren Tricks, Technologien und neuen Materialien.

Bestes Beispiel dafür ist die Foto-Lithografie – die Kerntechnologie bei der Chipherstellung. Sie spielte in der Geschichte der Mikroelektronik beim Vordringen in immer kleinere Strukturen bis heute eine besondere Rolle – und gilt als wichtigster Treiber des Moore'schen Gesetzes.

Kleinste Strukturen mit Foto-Lithografie

Mit der Foto-Lithografie werden die kleinsten Schaltkreisstrukturen auf den Wafer aufgebracht – eine flache etwa 1 Milimeterdicke runde Scheibe aus einem Halbleitermaterial, die die Basis für ICs bildet. Der logische Entwurf des Mikroprozessors wird dazu zunächst an einen Hochleistungscomputer übergeben, der die Leiterbahnen „routet“ und eine optimale Anordnung mit möglichst wenig Transistoren sowie minimaler Verlustleistung zu ermitteln sucht. Aus diesen Bahnberechnungen werden Masken – lichtdurchlässige Abbildungen des Schaltkreises – erstellt. Diese werden dann mit ultraviolett Licht durchleuchtet, und so das Schaltkreislayout von der Maske auf die Wafer übertragen, die anschließend geätzt werden.



Zukunftsmusik: Optische, Bio- und Quanten-Computer

Mit herkömmlicher Prozessortechnologie steht das Mooresche Gesetz vor dem Aus. Was aber, wenn die Chipherstellung eine völlig andere Richtung einschlagen würde? Hier die wichtigsten Alternativen – die allerdings noch in ferner Zukunft liegen.

■ Der 1-Atom-Transistor

Kann ein einziges Atom selbst als Prozessor agieren? Ja, sagen Forscher der University of New South Wales. Sie platzierten ein Phosphoratom zentral zwischen vier Elektroden und umgaben das Ganze mit einer Siliziumschicht. Tests zeigten, dass sich das Phosphoratom wie ein Feldeffekt-Transistor verhält – ein Schritt auf dem Weg zu atomaren Silizium-Transistoren und Quantencomputern.

■ Quantencomputer

Quantencomputing beginnt dort, wo Moores Gesetz endet – wenn die Schaltkreisstrukturen nur noch die Größe von Atomen und Molekülen haben. Ein Quantencomputer arbeitet auf der Basis quantenmechanischer Zustände. Während im klassischen Computer ein Bit nur die Zustände 0 und 1 annehmen kann, kann ein Qubit unendlich viele Zustände dazwischen einnehmen.

■ Bio-Computer

Bio-Computer sind Rechner, die auf der Verwendung der Erbsubstanz DNA oder RNA als Speicher- und Verarbeitungs-

medium beruhen. Die Entwicklung von Biocomputern gehört zur Bioelektronik und befindet sich noch ganz in der Anfangsphase.

■ Optische Computer

Optische Rechner arbeiten vollständig oder teilweise mit optischen Elementen anstatt der heute gängigen elektronischen Komponenten. Licht dient dabei als Informationsträger. Zum Einsatz kommen vor allem passive optische Elemente, die ähnliche Eigenschaften wie Transistoren haben.



Die US-Firma D-Wave soll den ersten Quantencomputer gebaut haben, doch Experten zweifeln an der Maschine. Quelle: D-Wave

Die Größe der kleinsten Strukturen, die mithilfe der Lithografie gerade noch erzeugt werden können, bestimmt die Wellenlänge für die Belichtung. Das Problem ist, dass die Wellenlänge des Lichts, das für die Projektionen verwendet wird, bereits mehrfach größer ist als die minimale Strukturbreite in den Chips. Je kleiner aber die Schaltkreisstrukturen im Verhältnis zur Wellenlänge des Lichtes werden, umso schwieriger wird es, sie fehlerfrei auf dem Wafer abzubilden. Im Moment wird in der Foto-Lithografie tiefes UV-Licht benutzt, das eine Wellenlänge von 193 Nanometern (nm) hat. Chiphersteller realisieren damit Strukturen von 45 Nanometern. Mehr gibt das Verfahren nicht her. Doch mit der weiter verfeinerten Immersions-Lithografie, einem tiefen Griff in die Trickkiste wie dem Double-Patterning-Verfahren sowie viel Aufwand wie cleveren Projektionsoptiken reizen die Chiphersteller die klassische Foto-Lithografie bis zum Äußersten aus. Mit 193 Nanometern Wellenlänge konnten damit Chip-Struktur-

größen von 22 Nanometern erzielt werden. Dies ist tatsächlich dann auch die Strukturbreite, in der die Prozessoren neuester Generation gefertigt werden.

Der nächste Schritt: EUV Lithografie

22 Nanometer, vielleicht noch 16 Nanometer – mehr geht mit der klassischen Fotolithografie nicht. Als Technologie für noch



Intel CEO Brian Krzanich präsentiert den winzigen Quark-X1000-Prozessor, der für Wearables wie Brillen oder Smartwatches entwickelt wird. Quelle: Intel

kleinere Strukturen ab 10 Nanometern gilt die EUV-Lithografie (*Extrem Ultra Violette*), oft als weiche Röntgenstrahlung bezeichnet. Darunter versteht man den Einsatz von Strahlungsquellen mit einer extrem kurzen Wellenlänge von etwa 13,5 Nanometern. Damit sind ohne aufwendige Tricksereien Tiefenstrukturen jenseits von 14 Nanometern möglich.

Doch auch EUV ist nicht unproblematisch. EUV-Licht wird in der Luft und in der Optik stark absorbiert, sodass die ganze Lithographie im Vakuum stattfinden müsste und spezielle Spiegelsysteme mit reflektiven Masken und Optiken notwendig wären. EUV-Lithografie ist deswegen außerordentlich teuer im Vergleich zur herkömmlichen Lithografie. Dennoch wird sie wohl in Zukunft eingesetzt.

Ursprünglich sollte die EUV-Lithografie schon beim Intel-22-Nanometer-Verfahren installiert werden, mit dem die Core i7 produziert werden. Doch der Einsatz von EUV verzögert sich immer weiter, auch wenn der Ausrüster für Halbleiterfabriken ASML berichtete, dass erste Feldtests bestanden worden wären, und man demnächst erste Stückzahlen ausliefere. Größtes Problem ist die Ausbeute, die aktuell noch zu gering ist. Derzeit liegt sie stabil bei 40 Wafern pro Stunde – zu wenig für eine wirtschaftliche Produktion.

Intel als höchstwahrscheinlich erster Interessent für die EUV-Lithografie hat schon bekanntgegeben, die im Jahr 2016 zu erwartenden Skymont-Prozessoren in der 10-Nanometer-Fertigung auch ohne die EUV-Lithografie herzustellen. Wie, darüber schweigt sich die Firma aus.

Die magische Schranke sind 5 Nanometer

Ob mit oder ohne EUV-Lithografie hält Intel an seinem Zeitplan fest, bei der Chipproduktion 2014 auf 14 Nanometern feine Strukturen zu wechseln (Codename *Broadwell*). AMD und Samsung planen dies ebenfalls für 2014. 2016 folgen die 10-Nanometer-Prozessoren von Intel (Codename *Skymont*), 2018 soll die Strukturbreite 7 Nanometer betragen. 2019 will Intel die Breite von 5 Nanometer erreichen, die unter Prozessor-Experten als magische Grenze gilt. In den nur 5 Nanometer breiten Strukturen liegen nur mehr wenige Siliziumatome nebeneinander. Da ein Siliziumatom 0,3 Nanometer groß ist haben bei 5 Nanometer knapp 17 Atome Platz. Weiter können die Schaltelemente dann kaum mehr schrumpfen, weil sich physikalische Schranken be-

merkbar machen würden. Ein Transistor, der nur wenige Atome dick wäre, enthielte nicht mehr genug bewegliche elektrische Ladungen, um wie gewohnt zu funktionieren. Zudem treten in diesen Dimensionen quantenmechanische Effekte auf. Durch diese Effekte werden die notwendigen Halbleitereigenschaften der Siliziumkristalle immer geringer, um beim Erreichen atomarer Größenordnungen schließlich völlig zu verschwinden. Sind einzelne Schaltkreise allein durch wenige Atome voneinander getrennt, durchtunneln zudem Elektronen die dünnen isolierenden Schranken – und erzeugen damit Lecks in den Schaltkreisen der Chips.

Ende der Entwicklung ist in Sicht

Was sich nach 7 oder 5 Nanometern als Technik durchsetzt, ist bisher unklar, so Intels ehemaliger Cheftechniker Justin Rattner. Er erachtet EUV als zu teuer, eine Alternative benannte er nicht: „*Da lauert ein Problem am Horizont.*“



Blick auf eine EUV-Anlage bei Zeiss in Jena, die Chips mithilfe von ultravioletter Strahlung produziert (EUV-Lithografie).

Quelle: Carl Zeiss

Der ehemalige Intel-Mitarbeiter und Prozessorexperte bei der DARPA, Robert Colwell, der in seiner Eigenschaft als einer der DARPA-Präsidenten das US-amerikanische Verteidigungsministerium in Fragen der Mikroelektronik berät, bereitete die Verantwortlichen dort auf das Jahr 2020 und einen 7-Nanometer-Prozess als das voraussichtliche Ende von Moores Law vor. „*Man könnte mich noch zu 2022 überreden, vielleicht sogar zu fünf Nanometern, wer weiß, aber auf keinen Fall einen Nanometer oder gar Femtometer oder Ähnliches*“, so Robert Colwell.

Cowell sieht – neben den physikalischen Grenzen – vor allem massive wirtschaftliche Probleme auf die Chip-Hersteller zukommen. Je kleiner die Strukturbreiten, desto größer werden die technischen Pro-

bleme und somit auch die Kosten. Spätestens nach dem Fertigungsprozess in fünf Nanometern sind die wirtschaftlichen Hindernisse so groß, dass die Finanzierung nicht mehr im Verhältnis zum erwarteten Gewinn stünde.

Die Aufrüstung auf die jeweils neue Fertigung setzt dabei Investitionen in Milliardenhöhe voraus. Sobald eine Größe wie Intel die Forschung aus diesem Grund nicht mehr vorantreibt, sei die exponentielle Steigerung an einen Endpunkt angelangt.

Abschied von der Gigantomanie

Das Ende immer leistungsfähigerer Rechner muss das nicht sein. Entwickler verfolgen verschiedene Strategien, die Performance trotzdem weiter zu steigern: neue Architekturen, neue Materialien sowie gänzlich neue Konzepte wie Quantencomputer und biologische Rechner (siehe Kasten).

Und abgesehen davon: Wäre es so schlimm, wenn Moores Gesetz fallen würde? Für die Chipindustrie vielleicht, für den Konsu-

umenten sicher nicht. Heutige Computer bieten mehr als genug Rechenpower, um für alles gerüstet zu sein.

In den Prospekten machen sich Gigahertz-Zahlen eines Prozessors vielleicht noch gut, in der Praxis spielt das kaum mehr eine Rolle. Ein neues Notebook muss heute nicht mehr unbedingt doppelt so schnell wie das Vorgängermodell sein – für die meisten dürfte es wichtiger sein, eine schnelle Internetverbindung zu haben und dass der Akku länger hält.

Übrigens: Gordon Moore selbst glaubte nicht an die ewige Gültigkeit seiner Regel. Schon 2007, auf Intels Entwicklerforum, sagte Moore das Ende seines Gesetzes voraus: Es werde wahrscheinlich noch 10 bis 15 Jahre Bestand haben, bis eine fundamentale Grenze erreicht sei. **tr**

Glossar

PC Magazin erklärt Begriffe aus der Transistoren und Halbleiterwelt.

■ Chip

Halbleiterbaustein, der aus dem Basismaterial für die sich darauf befindende integrierte Schaltung (IC) besteht.

■ CPU

Central Processing Unit, Prozessor: die Recheneinheit eines Computers

■ EUV-Lithografie

Extrem Ultraviolette Strahlung. Fotolithografie-Verfahren, das elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von 13,5 nm nutzt.

■ Foto-Lithografie

Reproduktionsverfahren, bei dem mittels Belichtung Muster auf Materialien aufgebracht werden. In der Halbleitertechnik werden dazu mit UV-Licht mit 193 nm Wellenlänge ICs hergestellt.

■ Halbleiter

Chemisches Element wie Germanium oder Silizium, das bei 0 Kelvin nicht leitet, weil im Leitungsband keine Elektronen vorhanden sind, jedoch bei Zimmertemperatur.

■ IC

Integrierte Schaltung. Die Integration von vielen elektronischen Bauteilen zu einer Schaltung, die auf einem Trägermaterial in einem Fertigungsprozess hergestellt wird.

■ Integrationsdichte, Packungsdichte

Die Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit. Je mehr Transistoren, desto höher die Integrationsdichte.

■ nm

Nanometer. 1 nm = 10⁻⁹ Meter = 0,000000001 Meter. In nm gibt man die Strukturbreite an.

■ Prozessor

Die zentrale Recheneinheit von Computern, in denen Befehle ausgeführt werden.

■ Strukturbreite

Realisierbarkeit der Breite der Strompfade. Die Strukturbreite hängt maßgeblich von der Entwicklung der fotolithografischen Verfahren ab.

■ Transistor

Halbleiterelement, das zum Verstärken und Schalten der elektrischen Spannungen und Ströme eingesetzt wird.

■ Wafer

Flache, ca. 1 mm dünne runde Scheibe aus einem Halbleitermaterial, die die Basis für integrierte Schaltungen (IC) bildet.