

# Was kommt nach dem Silizium?



## Prozessortechnik vom Allerkleinsten

Was verbindet Johannes Gutenberg und Bill Gates? Beide haben – zu unterschiedlichen Zeiten und auf verschiedene Weise – die menschliche Kommunikation auf ein fundamental neues Niveau gehoben. Gutenberg erfand im Jahre 1455 den Buchdruck und machte damit Wissen zunächst einer elitären Gesellschaft, bald aber jedermann zugänglich. Mit der intelligenten Vermarktung des Betriebssystems DOS (1981), vor allem aber ab 1983 mit dem erheblich anwenderfreundlicheren Windows verknüpfte Gates die Welt elektronisch und ermöglichte sekundenschnelle Kommunikation zwischen entferntesten Plätzen des Globus. Ohne diese moderne elektronische Kommunikationstechnik ist unser tägliches Leben kaum noch vorstellbar. Die Computertechnologie hat in rund einem viertel Jahrhundert unseren Alltag wohl mehr verändert als alle anderen technischen Entwicklungen zuvor. Trotzdem stellt sich bereits heute die Frage nach dem *Danach*. Denn die Siliziumtechnologie, auf der jegliche moderne Hardware beruht, wird in nicht allzu ferner Zeit das Ende ihres Leistungsvermögens erreichen.

### Das Moore'sche Gesetz

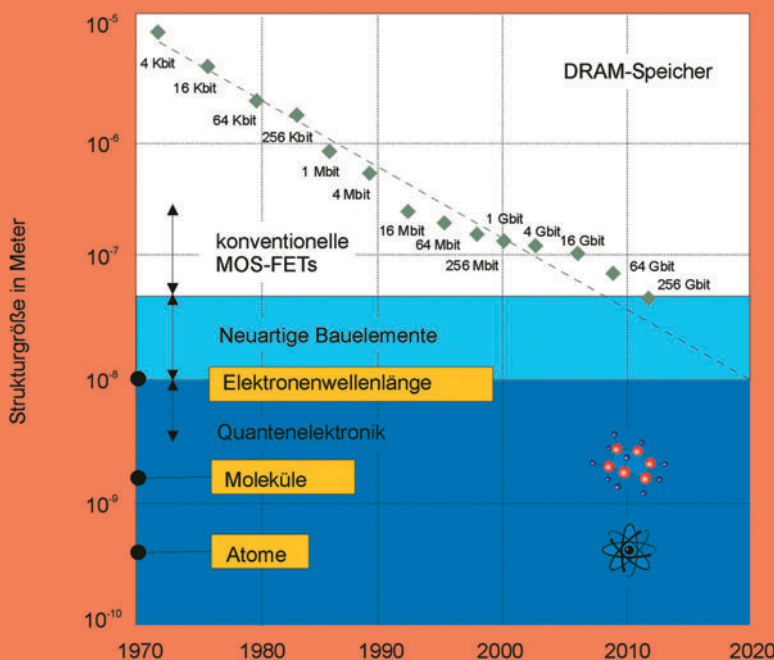


Abbildung 1: Moore'sches Gesetz; sagt die Verdopplung der Speicherkapazitäten nach jeweils 18 Monaten voraus.

Das nahende Ende des Silizium-Zeitalters hat einen relativ simplen physikalischen Grund: Die weitere Verkleinerung der Siliziumtransistoren, Voraussetzung für künftige Leistungssteigerungen, führt ab einem nicht genau bekannten Grad dazu, dass Silizium vom Halbleiter zum Nichtleiter wird und damit als Transistor nicht mehr genutzt werden kann. Aus diesem Grund gibt es weltweit große Anstrengungen, die *Nach-Silizium-*

*Zeit* vorzubereiten. Natürlich existieren verschiedene Ansätze, diese gigantische Herausforderung zu bewältigen – und die sind sowohl physikalischer als auch chemischer Natur. Denn prinzipiell kommen zukünftig sowohl so genannte nulldimensionale Quantenpunkte mit ihren spezifischen elektronischen Eigenschaften als auch einzelne Moleküle als Träger von Informationen in Frage.

Nanotechnologie befasst sich mit funktionalen Systemen, typischerweise basierend auf Bausteinen im Nanometerbereich, und mit spezifischen größenabhängigen Eigenschaften des einzelnen Bausteins oder des Systems. Diese umfassende Definition schließt reine Skalierungseffekte aus und besagt letztlich, dass durch die Verkleinerung eines Bausteins oder eines ganzen Systems eine neuartige Eigenschaft auftreten muss. Eine solche Eigenschaft ist der bereits erwähnte Übergang vom Halbleiter zum Nichtleiter im Falle von Silizium. Die Gründe hierfür sind elektronischer Natur und sollen an dieser Stelle nicht näher beleuchtet werden. Jedenfalls berücksichtigt das Moore'sche Gesetz indirekt diese Tatsache.

### Grenzen der Miniaturisierung

Dieses *Gesetz* unterstellt, dass sich die Speicherkapazität von Computern durchschnittlich alle 18 Monate verdoppelt. Wie man Abbildung 1 entnehmen kann, gibt es einen linearen Entwicklungszusammenhang zwischen der Größe der Computerbausteine (Strukturgröße) und der Speicherleistung. Von 4 Kbit im Jahre 1970

sind wir inzwischen in kontinuierlicher Entwicklung bei 4 Gbit angekommen.

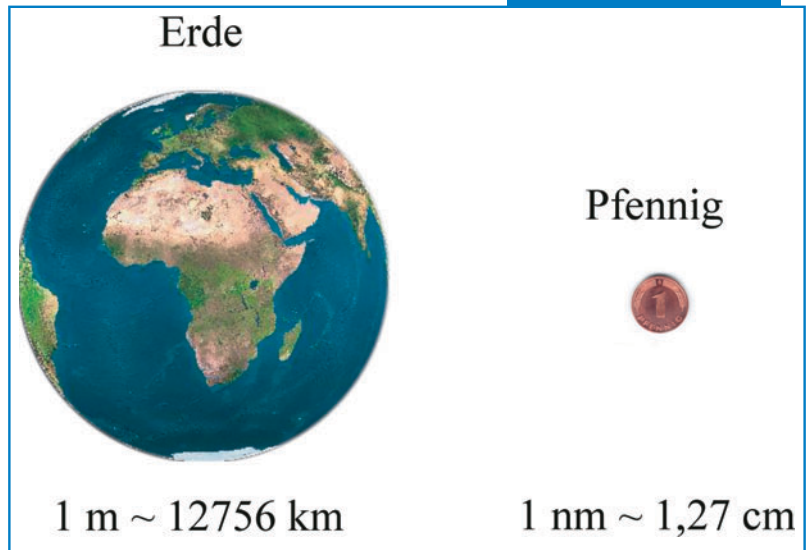
Diese modernsten Computer sind mit 130-nm-Transistoren bestückt. Somit bewegen wir uns also schon heute im typischen Nanometerbereich, und die Verkleinerungsentwicklung ist noch keineswegs am Ende. Jedoch ist mit erwarteten 256 Gbit, die etwa zwischen 2010 und 2015 erreicht werden dürften, definitiv Schluss. Denn das Moore'sche Gesetz zeigt auch auf, dass um das Jahr 2010 neuartige Bauelemente benötigt werden (hellblauer Bereich in Abb. 1), soll der technologische Fortschritt nicht plötzlich gestoppt werden. Was aber ist zu tun?

Bevor wir uns eingehender mit künftigen Möglichkeiten beschäftigen, sei zuvor das Phänomen *Nano* allgemein nochmals kurz verdeutlicht. Die physikalische Längeneinheit Nanometer (nm) entspricht  $10^{-9}$  m oder 1 Millionstel Millimeter. Was das praktisch bedeutet, soll Abbildung 2 veranschaulichen. Der Durchmesser der Erde beträgt 12.756 km, der einer 1-Pfennig-Münze 1,27 cm. Somit verhält sich der Erddurchmesser zum Pfennigdurchmesser wie 1 m zu 1 nm. Dies sollte man sich immer vergegenwärtigen, wenn Nanopartikel als Bausteine zur Diskussion stehen: Nicht nur wissenschaftlich, sondern auch technisch bedeutet das eine gigantische Herausforderung.

Und warum Nanotechnologie, wenn die Herausforderungen so groß sind? Transistoren immer kleiner zu machen, hätte allein zum Zweck der Platzersparnis wenig Sinn. Denn mit dem Kleinermachen handelt man sich neue Schwierigkeiten ein - vor allem im Bereich der Handhabung und Adressierung, das heißt der Herstellung der Kontakte zur *Außenwelt*. Versuchen Sie einmal, einen Stecker in eine Buchse zu schieben, die Sie allenfalls unter dem Elektronenmikroskop sehen können! Mit der Miniaturisierung sind jedoch als Vorteile eine Reduktion der Stromflüsse und damit schnellere Rechner und geringerer Stromverbrauch verbunden. Die



**Abbildung 3:** Rote Farbe von 10-nm-Goldnanopartikeln in einer Aluminiumoxidfolie eingebettet.



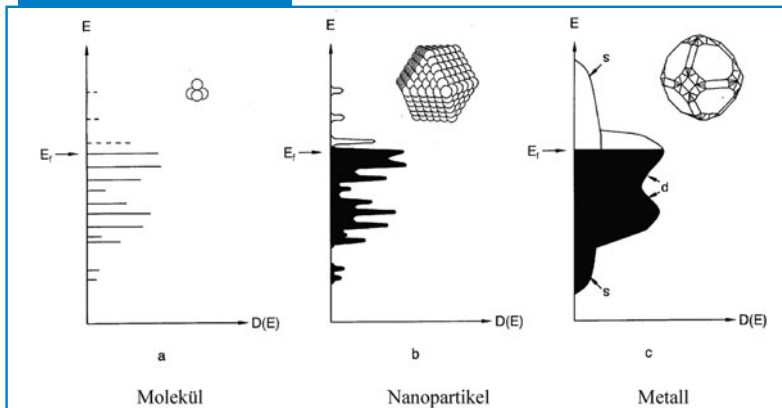
**Abbildung 2:** Vergleich Erddurchmesser und Pfennigdurchmesser. Die Differenz entspricht dem Verhältnis Meter zu Nanometer.

kleinsten derzeit zugänglichen Transistoren „bewegen“ bei jedem Ja-Nein-Vorgang einer Rechenoperation immerhin noch ca. 500.000 Elektronen. Eine provokante aber zulässige Frage muss daher lauten: Warum schaltet man nicht mit einem einzigen Elektron? Dies wäre die ultimative Verkleinerung des Rechenvorgangs und rein physikalisch durch nichts zu unterbieten. Doch wie könnte es gelingen, Bausteine herzustellen und zu nutzen, die nur mit einem einzigen Elektron arbeiten können? Um die mögliche Antwort auf diese Frage geben zu können, müssen wir ein wenig physikalische Grundlagenarbeit betreiben.

## Rotes Gold

Die allgemein bekannten metallischen Eigenschaften beruhen auf der besonderen - vielleicht auch besonders einfachen - elektronischen Situation in einem Metall. Im Gegensatz zu anderen chemischen Bindungen zwischen Atomen sind die Elektronen in einem Metall *delokalisiert*, das heißt sie können sich zwischen den regelmäßig angeordneten Atomrümpfen quasi frei bewegen. Im Fachjargon spricht man vom so genannten Bändermodell, einem Energieband, in dem sich die relevanten Elektronen praktisch ununterscheidbar aufhalten. Diese Tatsache bestimmt zum Beispiel den Glanz und die elektrische Leitfähigkeit eines Metalls. Verkleinert man nun ein Stück Metall bis in den Bereich von wenigen Dutzend Nanometern, beginnen sich die uns bekannten, vermeintlich *typischen* Eigenschaften zu verändern. Zum Beispiel die Farbe: Goldpartikel von 30 nm und weniger Durchmesser sind nicht mehr goldfarben, sondern rot! Dieses Phänomen ist seit Jahrhunderten bekannt (*rotes Gold*), obwohl es früher natür-





**Abbildung 4:** Skizze der elektronischen Zustände in einem Molekül (a), einem Metallnanopartikel (b) und einem massiven Metall (*Bulk*) mit ausgeprägter Bandstruktur.

lich nicht verstanden werden konnte. Das Rot von 10 nm Goldpartikeln ist in Abbildung 3 gezeigt.

Die Ursache liegt in einer Wechselwirkung des sichtbaren Lichtes mit den Oberflächenenergiezuständen der Partikel, die man auch als Plasmonenschwingung bezeichnet und die quantitativ im so genannten Mie'schen Gesetz erfasst ist. Die Farbe ist demnach unter anderem von der Teilchengröße und -form, dem umgebenden Medium und natürlich von der Art des Metalls abhängig.

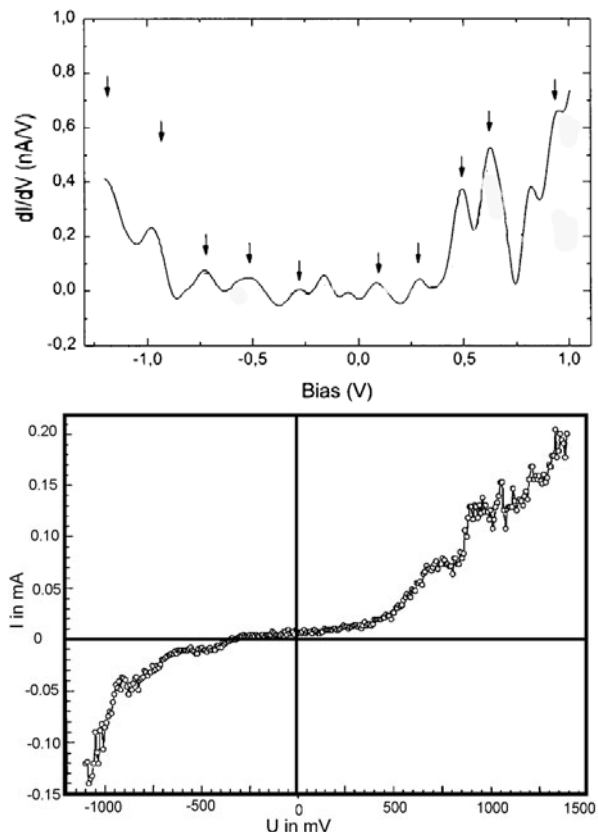
Weitaus bedeutsamer als ein Farbwechsel oder auch ein sich mit der Teilchengröße verändernder Schmelzpunkt ist jedoch die Änderung der intrinsischen elektronischen Verhältnisse in einem Metall- (oder auch Halbleiter-) Partikel, wenn dieses eine charakteristische Größe unterschreitet.

## Quanteneffekte

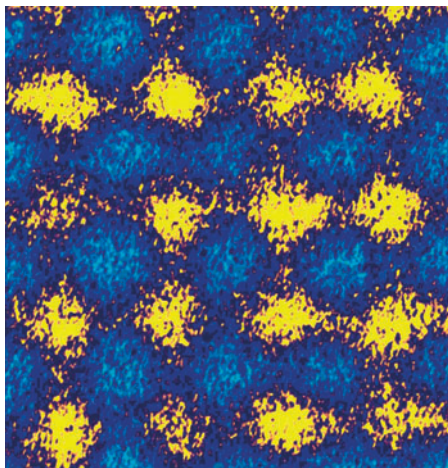
Die Gründe für dieses größenabhängige elektronische Verhalten werden aus Abbildung 4 ersichtlich. Die schon erwähnte Delokalisierung von Elektronen in einem Band ist in 4c angedeutet. Die schwarzen Bereiche kennzeichnen ununterscheidbare energetische Zustände der relevanten Elektronen (hier so genannte s- und d-Elektronen). Umgekehrt finden sich in einem kleinen Molekül aus zum Beispiel nur vier Atomen (4a) ganz abgegrenzte Energiezustände, die man auch als Molekülorbitale bezeichnet. Entsprechendes gilt im Grunde auch für einzelne Atome. Die Abgrenzung von Energiezuständen in

Atomen oder Molekülen wird mittels der Quantenmechanik beschrieben, die an die Stelle klassischer physikalischer Gesetze für massive (*Bulk*-) Zustände tritt. Ein anzunehmender Übergangszustand auf dem Weg von 4b nach 4a oder umgekehrt, zunächst bestehend aus einer endlichen, aber unbekannt Anzahl von Atomen, sollte sinngemäß ein Aussehen wie in b angedeutet haben, das heißt abgegrenzte Energieniveaus sind erkenntlich, aber eben noch nicht so scharf ausgebildet wie in a.

Ein solches Teilchen folgt streng genommen also auch nicht mehr klassischen physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die wir aus dem Alltag kennen, sondern den Regeln der Quantenmechanik. Deshalb werden Teilchen wie in 4b angedeutet auch als *Quantenpunkte* oder gelegentlich als *künstliche Atome* bezeichnet. Erst kürzlich ist es nun erstmals gelungen, den experimentellen Beweis für einen elektronisch quantisierten Zustand in einem Metallnanopartikel zu führen. Die Strom-Spannungskennlinie eines aus nur 55 Atomen bestehenden 1.4-nm-Goldclusters in Abbildung 5a zeigt im Bereich von -1 bis +1 V



**Abbildung 5:** oben: Energieniveaus in einem  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ -Nanocluster bei 7K. unten: Strom-Spannungscharakteristik eines  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ -Nanoclusters bei Raumtemperatur.



**Abbildung 6:** Ausschnitt aus einer regelmäßigen Anordnung von  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ -Nanoclustern (Elektronenmikroskopie).

verbreiterte, aber doch konkrete Energieniveaus (Pfeile) und entspricht damit qualitativ der nur abgeschätzten Situation in b. Somit ist der Ausdruck *künstliches Atom* für einen derartigen Nanocluster voll gerechtfertigt. Was aber haben diese fundamentalen Erkenntnisse mit unserem Transistorproblem zu tun?

## Schalten mit einem Elektron

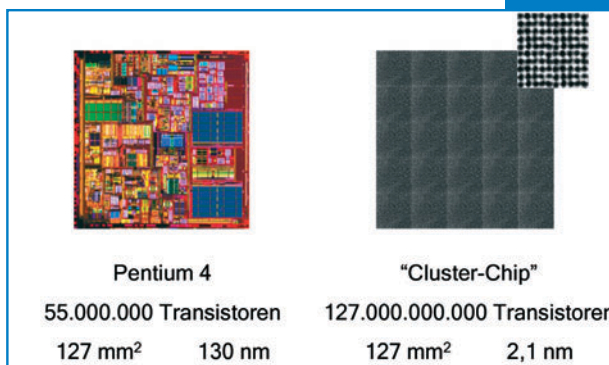
Die Strom-Spannungskennlinie, also das Aufzeigen der Beziehung zwischen einer an ein Metall angelegten Spannung ( $U$ ) und dem daraus resultierenden Strom ( $I$ ), ist charakteristisch für das elektronische *Innenleben*. Eine lineare Beziehung würde nichts anderes bedeuten, als dass der untersuchte Körper den Ohmschen Gesetzen folgt, also typisches *Bulk*-Verhalten zeigt. Im vorliegenden Fall eines 1.4-nm-Metallnanoclusters, der allerdings noch von einer schützenden Hülle aus im Wesentlichen organischen Molekülen umgeben ist – was nicht unerheblich für die zu beobachtenden Eigenschaften ist –, registriert man keine lineare Abhängigkeit, sondern die  $U/I$ -Beziehung ist durch eine so genannte Coulomb-Blockade charakterisiert.

Dies bedeutet nichts anderes, als dass sich ein solcher Nanopartikel wie ein Einelektronenschalter verhält: Ein Elektron wird bei einer bestimmten Spannung über eine Kontaktspitze auf das Teilchen übertragen und verhindert dort durch seine negative Ladung, dass ein zweites Elektron übertragen werden kann, bis eine entsprechend höhere Spannung das erste Elektron an eine Gegenelektrode abgibt. Dieser Effekt ist temperaturabhängig und wurde mit größeren Metallnanopartikeln bei sehr tiefen Temperaturen schon früher beobachtet. Mit dem Nano-

cluster  $\text{Au}_{55}(\text{PPh}_3)_{12}\text{Cl}_6$ , wie ihn Abbildung 5b im Modell zeigt, ist der Einelektronenschalter jedoch schon bei Raumtemperatur funktionsfähig. Damit sind prinzipiell auch die Voraussetzungen geschaffen, Einelektronentransistoren für künftige Computergenerationen zu bauen. Zuvor sind jedoch noch viele und große Probleme zu lösen. Eines davon ist die Organisation dieser Quantenpunkte in bestimmten Strukturen. Ansätze hierzu gibt es. Abbildung 6 zeigt einen Ausschnitt aus regelmäßig angeordneten Nanoclustern der beschriebenen Art auf einer speziell präparierten Oberfläche.

Ein weiteres weitgehend ungelöstes Problem ist die individuelle Verbindung dieser unvorstellbar kleinen Schalter mit der Außenwelt bzw. die Herstellung von Verbindungen untereinander. Auch hierzu gibt es bereits Lösungsansätze, aber noch keine praktisch einsatzfähigen Techniken.

Als Fazit bleibt jedoch die berechtigte Hoffnung, dass mit den beschriebenen oder ähnlichen Quantenpunkten das Problem, das uns das Moore'sche Gesetz für etwa das Jahr 2020 vorhersagt, gelöst werden kann. Der erfolgreiche Einsatz von Metallnanopartikeln in der Chip-technologie würde einer weiteren technischen Revolution gleichkommen. Dies verdeutlicht Abbildung 7, in der einer der gegenwärtig leistungsstärksten Chips in einem *Pentium 4* mit einem *Cluster-Chip* verglichen wird. 55 Millionen Transistoren auf  $127\text{mm}^2$  würden auf derselben Fläche ersetzt durch 127 Milliarden Transistoren aus 2.1-nm-Nanoteilchen.



**Abbildung 7:** Vergleich eines gegenwärtigen Pentium 4-Prozessors mit einem denkbaren künftigen *Cluster-Chip*.

## Kontakt

**Prof. Dr. Günter Schmid**

Institut für Anorganische Chemie

Tel. 02 01/1 83-24 01

Fax: 02 01/1 83-41 95

guenter.schmid@uni-essen.de

[http://www.uni-essen.de/ac\\_schmid/](http://www.uni-essen.de/ac_schmid/)