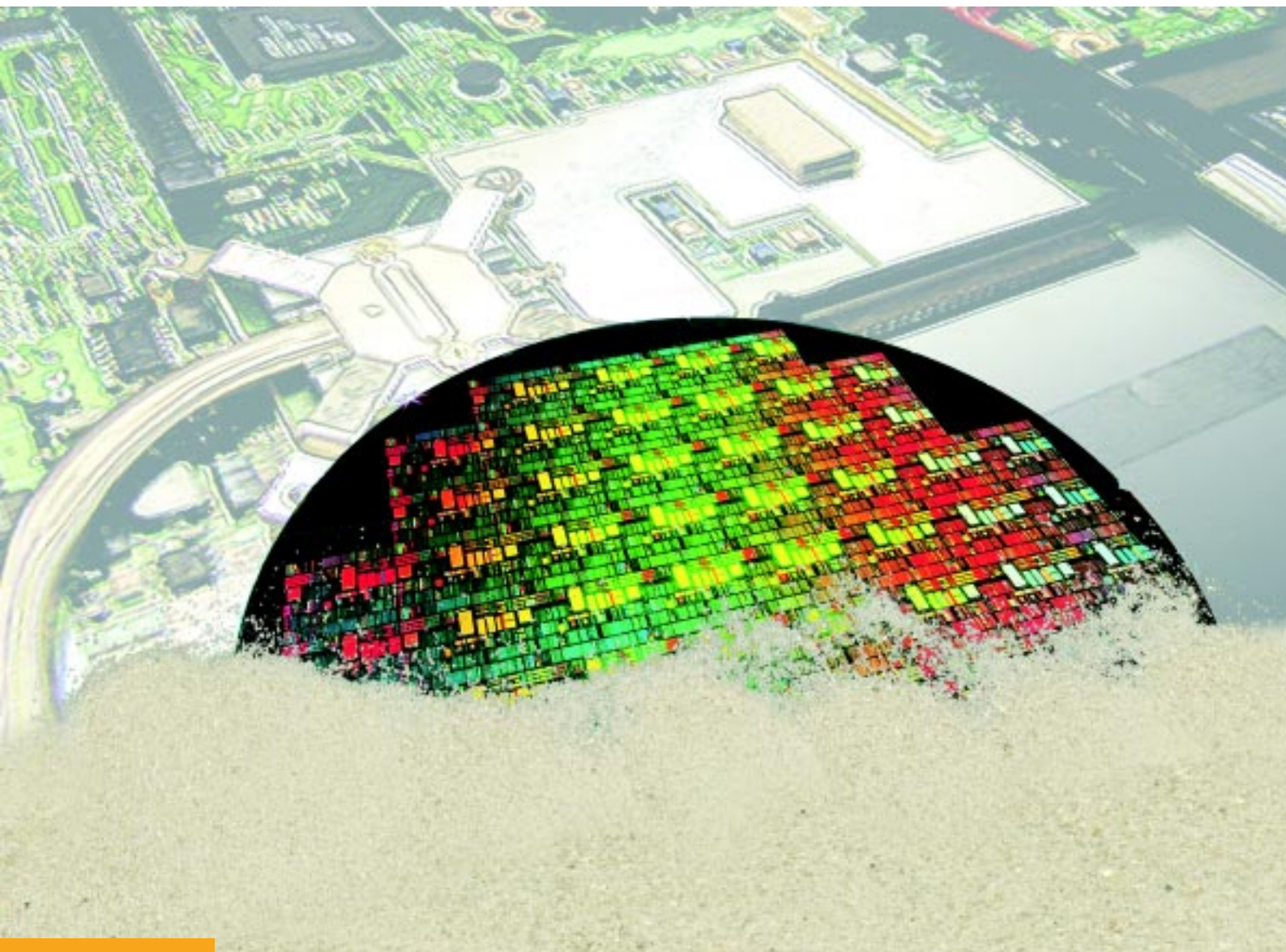




Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Vom Sand zum Superchip

300mm-Wafer für die Nanoelektronik



FORSCHUNG

Deutschland. Das von morgen.

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bundesministerium  
für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat Publikationen; Internetredaktion  
11055 Berlin

### **Bestellungen**

Schriftlich an den Herausgeber  
Postfach 30 02 35  
53182 Bonn

oder per

Tel. : 01805 - 262 302

Fax: 01805 - 262 303

(0,12 Euro/Min.)

E-Mail: [books@bmbf.bund.de](mailto:books@bmbf.bund.de)

Internet: <http://www.bmbf.de>

### **Koordination**

VDI - Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf  
Dr. Jochen Dreßen

### **Autor**

Dr. Mathias Schulenburg, Köln

### **Gestaltung**

Suzy Coppens, Köln  
[www.bergerhof-studios.de](http://www.bergerhof-studios.de)

### **Druckerei**

Druckhaus Locher GmbH, Köln

Gedruckt auf Recyclingpapier

Bonn, Berlin 2004

## **Bildnachweis Titelseite:**

Montage: Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln  
Wafer: Infineon Technologies AG, München



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Vom Sand zum Superchip

**300mm-Wafer für die Nanoelektronik**





# Vorwort

Deutschland hat im Elektronikbereich in den vergangenen Jahren eine weltweit sichtbare Aufwärtsentwicklung genommen. Allein in der Region Dresden ist in einem Netzwerk aus Industrie, Instituten und Hochschulen der größte europäische Elektronikstandort mit ca. 20.000 neuen Arbeitsplätzen entstanden. Hier werden hochkomplexe Chips produziert, die international zur Weltspitze zählen. Der Elektronik kommt wegen ihrer außergewöhnlich hohen Wertschöpfung, ihrer weltweit unverändert glänzenden Wachstumsraten und ihrer Schlüsselstellung für alle Wirtschaftsbereiche eine herausragende Bedeutung zu.

Die Elektronik hat sich als Innovationsmotor in der Nanotechnologie erwiesen, der seinen volkswirtschaftlichen Nutzen bereits nachweisbar erbringt. Nirgendwo sonst erobert eine Technologie mit einer derartigen Geschwindigkeit den Nanokosmos, wie dies bei der Nanoelektronik der Fall ist. Schon in wenigen Jahren werden funktionskritische Bauteile eines Mainstream-Halbleiterchips Abmessungen in der Größenordnung einiger Atomlagen aufweisen. Die Nanofab, wie diese fortschrittliche Herstelltechnologie international heißt, bildet in meinem Hause einen Innovationsschwerpunkt. Eine zielgerichtete Forschungsförderung wird dabei weiterhin dafür sorgen, dass Deutschland in dieser wichtigen Branche auch in Zukunft in der ersten Liga mitspielt. Wir werden von der Chiparchitektur über das Design der Bauelemente bis zur Lithographie und zum Silizium-Wafer weiterhin international Maßstäbe setzen. Gesellschaftliche Ziele wie die Verwirklichung eines intelligenten Internets („smart web“), einer perfekten Logistik, der Erhalt der Mobilität oder eines elektronischen Dolmetschers kommen dadurch einer Realisierung spürbar näher.

Die wichtigste Ressource ist dabei das Wissen und die Kreativität der zahlreichen Spezialisten, welche die Entwicklung hin zur Nanoelektronik und damit zu immer leistungsfähigeren Chipsystemen vorantreiben. Dabei spielt die Nanoelektronik speziell für einen Hochlohnstandort wie Deutschland eine besondere Rolle, da hier mit einem vergleichsweise geringen Arbeitskostenanteil hohe Wettbewerbsmerkmale an Endprodukten entstehen. Nur wenn es gelingt, Produkte mit entscheidenden Leistungskriterien auszustatten, kann man Erfolge auf den Weltmärkten erzielen.

Mit dieser Broschüre soll die von Silizium, dem „Werkstoff des Wissens“, ausgehende Faszination vermittelt und gleichzeitig verdeutlicht werden, welche unerwartet dynamische Leistungssteigerung der von Menschen modifizierte Werkstoff Silizium durch Forschung in Deutschland entfaltet.

Edelgard Bulmahn  
Bundesministerin für Bildung und Forschung

# Inhalt

03	Vorwort
04-05	Inhalt
06-07	Silizium – Treibstoff der Informationsgesellschaft
08-09	Warum 300mm-Wafer?
10-13	Wie Halbleiter eine leitende Stellung bekamen

<b>14-19</b>	<b>Vom Sand zum Supercomputer</b>
<b>20-21</b>	<b>Silizium und Kohlenstoff</b>
<b>22-23</b>	<b>Wafer made in Germany</b>
<b>24</b>	<b>Bildnachweis</b>

# Silizium – Treibstoff der Informationsgesellschaft

Der Mensch ist das erstaunliche Resultat einer Milliarden Jahre dauernden Evolution auf unserem Planeten. Aber warum ist er eigentlich anderen Arten so überlegen, wie dies den Anschein hat? Worauf beruht seine Einzigartigkeit? Offensichtlich ist es seine im Tierreich unerreichte Fähigkeit, komplexeste Informationen effizient zu verarbeiten und mit seinen Artgenossen mittels einer universellen Sprache zu kommunizieren.

Nur das menschliche Gehirn beherbergt all die phänomenalen Fähigkeiten, die es uns ermöglicht haben, die Struktur der Atome zu enträtseln, Milliarden von Lichtjahren weit in das Universum hinaus zu blicken oder technische Vorrichtungen zu realisieren, die es uns ermöglichen, unseren Lebensraum nach unseren Vorstellungen zu gestalten.

Basis des Erfolgs dieser Evolution ist die unglaublich vielfältige und anpassungsfähige biochemische Grundstruktur aller Organismen. Der Kohlenstoff stellt dabei das zentrale Element der Biologie dar, aus dem sowohl die Zellmembranen der primitivsten Einzeller, als auch die Nervenzellen unseres Gehirns bestehen. Natürlich sind für das Funktionieren eines Organismus noch eine Vielzahl anderer chemischer Elemente in den unterschiedlichsten Verbindungen erforderlich. Der Schlüssel des Erfolgs der Evolution liegt jedoch wesentlich in der chemischen Vielfalt des Kohlenstoffs, dem Schlüsselement des Lebens.

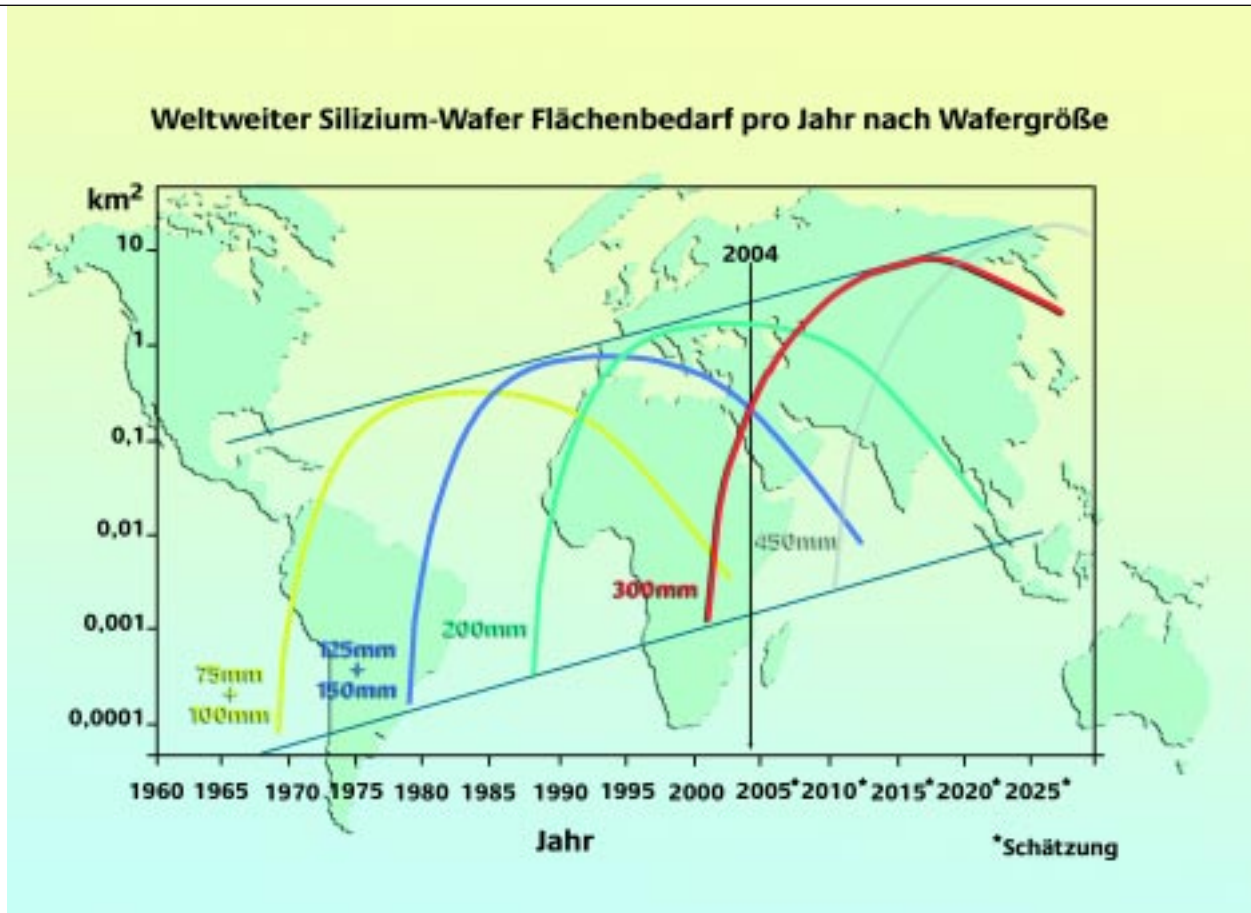
In der Technik lassen sich nun überraschende Parallelen zur Biologie finden. Auch hier hat sich eine markante Technologie innerhalb kürzester Zeit rasant vermehrt. Auch in der Technik reicht es heute nicht mehr aus, Maschinen schneller oder stärker zu machen, sondern der Fortschritt besteht vor allen Dingen darin, Maschinen mit mehr Intelligenz auszustatten. Hierfür steht die rasante Entwicklung der Elektronik im Verlaufe der letzten Jahrzehnte. Waren es Anfang des 20. Jahrhunderts vor allem die großen Kraftmaschinen, von der Dampfturbine bis zum Elektromotor, die den Fortschritt versinnbildlichten, so sind es jetzt die hochkomplexen Computerchips und die darauf aufbauenden Informations- und Kommunikationstechnologien, welche die Technologieposition eines Industrielandes im internationalen Wettbewerb bestimmen.

Ebenso wie in der Biologie, bestimmt auch in der modernen Technik die Fähigkeit zur komplexen Informationsverarbeitung wesentlich über den Erfolg gegenüber den Wettbewerbern. Kaum ein modernes technisches Produkt

kann heute auf Elektronik verzichten. Der Elektronik verdanken wir nicht nur eine immer bessere Energieeffizienz unserer technischen Systeme, sondern auch eine höhere Betriebssicherheit und eine zielgerichtete Adressierung der menschlichen Bedürfnisse. Mit der Elektronik bringen wir unseren technischen Helfern das Denken bei. Dabei geht es nicht um eine Kopie menschlichen Denkvermögens. Vielmehr geht es darum, den Menschen von unangenehmen oder nicht zu bewältigenden Rechenaufgaben zu entbinden um ihm den Freiraum für seine eigentlichen Stärken im kreativen Bereich zu geben.

Bemerkenswert an der Elektronik als künstlicher Form der Informationsverarbeitung ist, dass sie ebenso wie die Biologie auf einem zentralen chemischen Element aufbaut: dem Silizium. Und auch für das Silizium gilt, dass es nicht durch Zufall die Grundlage dieser einzigartigen Technologie bildet, sondern weil es sich aufgrund einer Vielzahl von Vorteilen gegenüber Konkurrenten durchgesetzt hat. Wie in der Biologie war dabei nicht allein die bloße Funktionalität ausschlaggebend, sondern ganz wesentlich auch die Effizienz. Ebenso, wie sich in der Biologie der kohlenstoffbasierte Organismus als bestmögliche Anpassung an unser Ökosystem erwiesen hat, konnte sich die Siliziumelektronik am Markt als ungeschlagener Sieger eines Wettbewerbs behaupten. Nur die Siliziumelektronik erlaubte einen so rasanten Fortschritt in einer so kurzen Zeit und zu derart sinkenden Kosten, wie wir es in den letzten Jahrzehnten beobachten konnten.

Natürlich besteht ein moderner Halbleiter-Chip nicht aus Silizium alleine. Ebenso wie in unserem Gehirn sind für die Funktionsfähigkeit noch eine ganze Anzahl anderer Substanzen erforderlich. Das Geheimnis des Erfolges liegt jedoch in beiden Fällen in der genialen Einfachheit, Universalität und Effizienz des grundlegenden Materials begründet.



Es überrascht nicht, dass die Siliziumelektronik, als das zentrale Nervensystem moderner Technologie, für jede zukunftsorientierte Gesellschaft eine zentrale Bedeutung einnehmen muss. Für eine führende Volkswirtschaft ist eine Schwerpunktsetzung im Bereich der Informationstechnologien unverzichtbar. Folgerichtig stellt die Siliziumelektronik auch einen Fokus der öffentlich finanzierten Forschung am Standort Deutschland dar. Das BMBF fördert nachhaltig die Erforschung zukünftiger Systeme für die Informationsverarbeitung und legt damit den Grundstein für intelligente Technologien von übermorgen.

Neben den wachsenden Produktionsstätten der Siliziumelektronik für Speicherchips (Infineon) und Prozessoren (AMD), und dem industriellen Forschungs- und Entwicklungszentrum AMTC für die Photomasken, ist die neue 300mm-Wafer Fabrik von Siltronic in Freiberg ein weiteres Glied in der Wertschöpfungskette in der Region Sachsen. Mit über 140 weiteren Unternehmen der Branchen (Zulieferer, Dienstleister, Gerätehersteller) im Verbund mit Hochschulen und staatlichen Forschungseinrichtungen ist diejenige industrielle Clusterbildung gelungen, welche Voraussetzung einer robusten selbsttragenden Prosperität ist. Auf dem Weg zum größten europäischen Elektronik-Zentrum ist „Silicon Saxony“ ein Beispiel für die erfolgreiche Konzentration von Forschungskompetenzen und finanziellen Ressourcen aus ganz Deutschland zur Entwicklung einer Region.

Die Entwicklung der 300mm-Wafertechnologie wurde vom BMBF mit insgesamt 143 Mio. € aus dem Bundeshaushalt gefördert. Weitere erhebliche Fördermittel fließen in die Maskentechnologie und andere Themen der Nanoelektronik. Die BMBF-Förderung mobilisiert in jedem Fall Kompetenzen aus ganz Deutschland. Konsortien mit einer Vielzahl von Partnern aus Hochschulen und Industrie arbeiten breitenwirksam und vorwettbewerblich zusammen. Je näher die Umsetzung der Forschung an Produkte heranrückt, desto wichtiger ist jene Clusterbildung. Die bundesstaatliche Schwerpunktsetzung hat zur Profilierung des High-Tech-Profil Deutschlands weltweit beigetragen, was durch die hohe Zahl ausländischer Direktinvestitionen in der Region belegt wird.

Aufgrund der ITRS-Roadmap ist bereits heute klar, dass 300mm-Wafer der internationale Standard werden. Laut der ITRS wird der Bedarf der internationalen Halbleiterindustrie an 300mm-Wafern in den nächsten Jahren stark ansteigen.

Bei den 300mm-Siliziumwafern nimmt Deutschland eine Spitzenposition ein. Die Siltronic AG gehört zu den drei weltweit agierenden Anbietern auf diesem Markt und beliefert die gesamte relevante Halbleiterindustrie. Die Ausgangslage dieser Technologie in Deutschland gestattet dank der konkurrenzfähigen Industrie und der nachhaltigen Förderung des BMBF beste Voraussetzungen für die Bewältigung der noch vor uns liegenden Herausforderungen.

# Warum 300mm-Wafer?

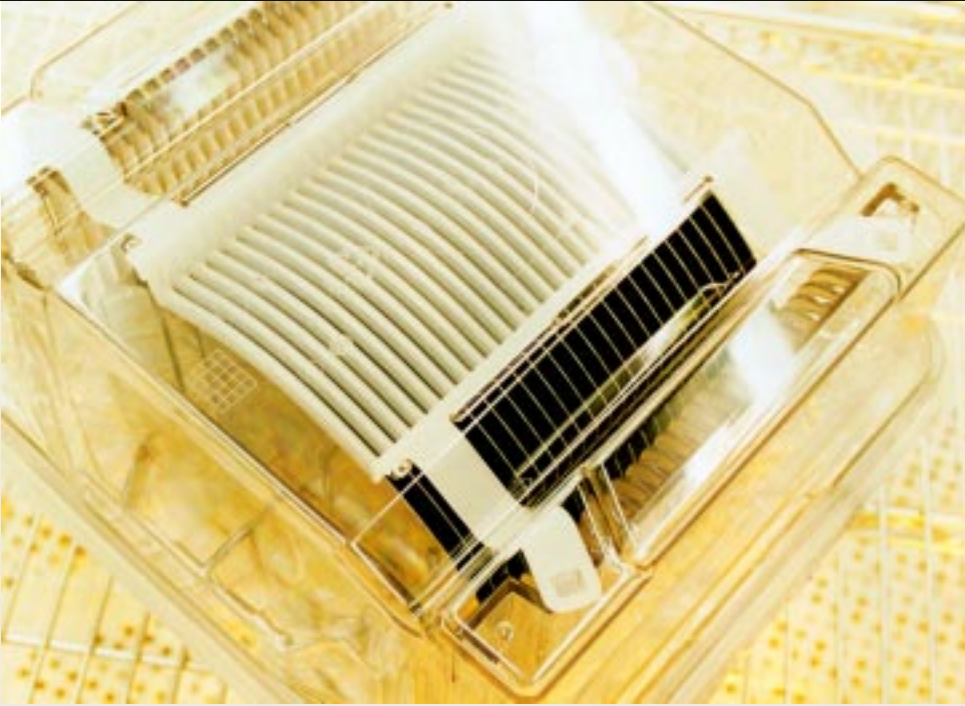
Der Übergang zur sogenannten 300mm-Technologie wird die Halbleiterindustrie zwischen 15 und 20 Milliarden Dollar kosten. Das sind erklärungsbedürftige Summen: In der Halbleiterindustrie ist echter Fortschritt möglich. Technik und Naturgesetze erlauben es, - besonders auf dem Computersektor - immer mehr Leistung für immer weniger Geld anzubieten. Wer das tut, kann seinen Marktanteil behaupten oder erweitern, Industriestandards mitbestimmen und mehr. Wer nicht mitmacht, ist irgendwann nicht mehr konkurrenzfähig. Diese Umstände haben die Halbleiterindustrie zum dynamischsten Unternehmen der Industriegeschichte gemacht.

Computerchips entstehen aus Wafern, sorgfältig präparierten Siliziumscheiben eines festgelegten Größenrasters. Das Raster ist notwendig, weil an der Wandlung eines Wafers in Chips zahlreiche hochkomplizierte Geräte beteiligt sind, die ohne Normung unbezahlbar wären.

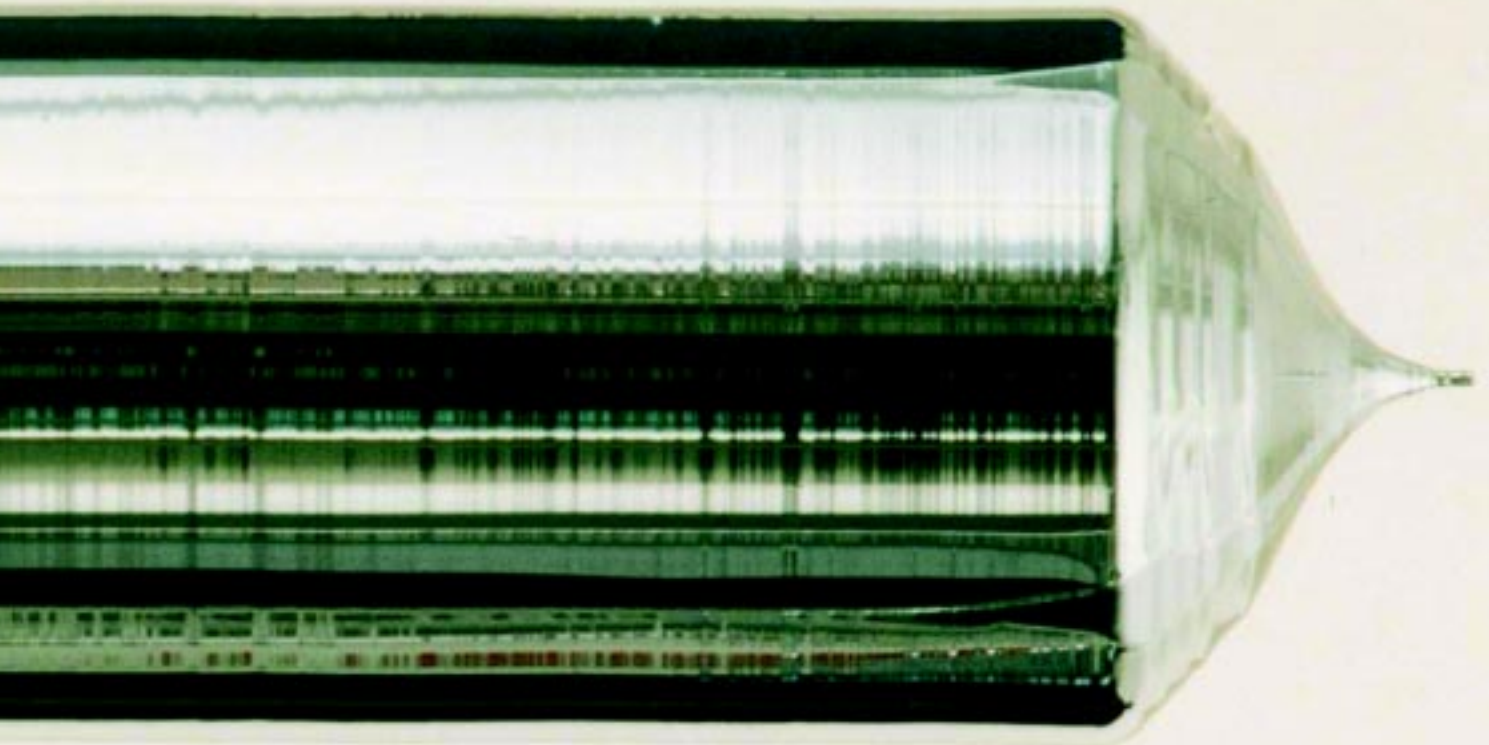
Eine Möglichkeit, mehr für weniger zu bieten, besteht darin, die Dimensionen der Chips schrumpfen zu lassen. So ist pro Chip mehr Leistung möglich, und pro Wafer können mehr Chips produziert werden. Allerdings ist die Technik für diese Schrumpfung teuer, was durch eine

Vergrößerung des Waferdurchmessers aufgefangen werden muss: Auf einem größeren Wafer entsteht pro Arbeitsschritt eine größere Zahl an Chips. Alle fünf bis acht Jahre wird deshalb das Waferraster nach oben erweitert.

Für Massenprodukte wie populäre Prozessoren oder Memorychips ist der größte im Raster verfügbare Wafer gerade der beste, weil er pro Chip die niedrigsten Kosten ermöglicht. Der größte für die Massenproduktion verfügbare Waferdurchmesser war bislang 200 Millimeter. Daraus werden jetzt mit großem Aufwand 300 Millimeter. Auf



links: Transportbehälter für 300mm-Wafer. Die extremen Anforderungen an Reinheit und Partikelfreiheit müssen bis zum letzten Glied der Produktionskette gewährleistet sein.  
unten: Silizium-Einkristall mit perfekter Kristallorientierung



diesem „Pizza-Wafer“ sind mehr als doppelt so viele Chips realisierbar als auf dem 200mm-Vorgänger.

Der Übergang auf 300 Millimeter ist weit mehr als eine einfache geometrische Operation, er bedeutet die Entwicklung einer ganz neuen Generation von Fertigungsmethoden. Das beginnt mit der Züchtung entsprechend großer Silizium-Einkristalle, die mit neuen Verfahren in Wafer zerlegt, die mit neuen Verfahren poliert und behandelt werden. Wenn in diesen Wafern fotolithografisch Chipstrukturen realisiert werden, wird das mit neuen

Belichtungsautomaten geschehen, die mit kurzwelligerem Licht feinere Strukturen schreiben. Der Transport der 300mm-Wafer zwischen den einzelnen Bearbeitungsstationen geschieht mit neuen Handhabungsautomaten; die Reinräume, in denen das stattfindet, sind Hektar groß und tauschen ständig ihr gesamtes Luftvolumen aus, um die Partikeldichte millionenfach unter die der frischesten Bergluft zu senken. Kurzum: für den Übergang auf 300mm-Wafer-Technologie sind Milliarden an Investitionen notwendig. Warum? Damit Chips besser und – billiger werden.

Oberfläche eines Silizium-Einkristalls,  
atomgenau abgebildet mit einem  
Rastertunnelmikroskop. Fremdatome  
sind farblich gekennzeichnet.

# Wie Halbleiter eine leitende Stellung bekamen

Die Elektronikindustrie ist ein traditionell unruhiger Produktionszweig, denn das Innovationstempo ist hoch. Unter den turbulenten Ereignissen des Jahres 1970 ist eine Szene besonders bemerkenswert: Federico Faggin, ein hoch begabter Chip-Entwickler, legte spät in der Nacht mit zitternden Händen einen 50mm-Wafer in ein Testgerät und hoffte, dass seine Entwicklung funktionieren möge.

Zu Recht, „Die ganze Arbeit hatte sich plötzlich, in einem Moment absoluter Befriedigung, bezahlt gemacht.“ Das war bei Intel, im April 1970, und betraf den ersten Mikroprozessor der Firma. Die Rechte daran aber hatte die japanische Firma Busicom, die einen Rechner damit bauen wollte, aber das Interesse daran verlor, woraufhin Intel die Rechte zurückkaufen und zu dem werden konnte, was es ist. Einer der wenigen erhalten gebliebenen Busicom-Musterrechner mit dem Original-Chipsatz steht heute im *Arithmeum* in Bonn.

Der erste Mikroprozessor hatte es anfangs schwer, sich durchzusetzen. Es gab mentale Blockaden auch der Entwicklungsingenieure, die den Gedankensprung vom „raumfüllenden“ Computer zum Chipcomputer häufig nicht schafften.

Die ersten Integrierten Schaltungen, auch die Prozessoren, arbeiteten mit der sogenannten Bipolar-Technik, deren Transistoren als Stromverstärker arbeiten. Solche Transistoren schalten schnell, verbrauchen aber auch viel Energie. Das Aufkommen der Quarzarmbanduhren begünstigte eine Strom sparende Technik, MOS-Feldeffekt-Transistoren. Solche Transistoren werden spannungsgesteuert, ähnlich Elektronenröhren und verbrauchen sehr wenig Energie. (Heutige Feldeffekt-Leistungstransistoren schalten einen Elektroherd mit der Leistung, die im Fühlerwedeln einer Ameise steckt.) Die Transistoren in den ersten MOS-ICs schalteten allerdings zu langsam. Als es gelang, im CMOS-Prozess die Vorzüge beider Transistorarten zu vereinen, war kein Halten mehr. Aus Integrierten Schaltungen wurden hoch-, höchst-, sehr hoch-, ultrahoch-integrierte Schaltungen – die Ingenieure bekamen Mühe, die Entwicklung sprachlich angemessen zu begleiten. „Moore’s

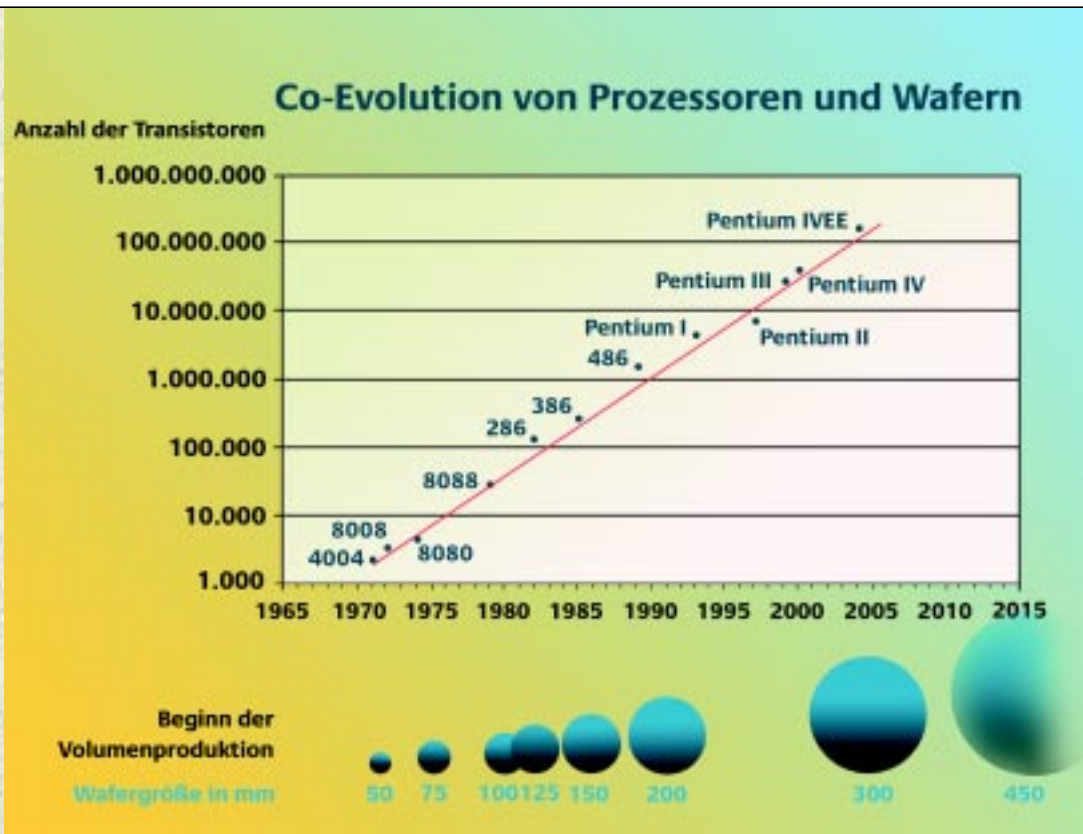
law“, wonach sich die Rechenleistung von Mikroprozessoren alle 18 Monate verdoppelt, wurde zum Leitfaden der Chipindustrie. Chip Chip hurra, von 1 auf 100.000.000 in 40 Jahren! bejubelten Fachleute die Entwicklung - mit berechtigtem Stolz.

Heute ist die Zahl der auf einem einzigen 300mm-Wafer realisierbaren Memory-Bits größer als die 1984 von der *gesamten* Halbleiterindustrie realisierten Bits. Die Halbleiterindustrie ist zur produktivsten Unternehmung der Industriegeschichte geworden. Halbleiter sind mittlerweile so verbreitet, dass sie die Welt noch im entferntesten Winkel beeinflussen. Pro Jahr werden mehr Transistoren produziert als Reiskörner, und der Wert eines Reiskorns entspricht dem von mehr als 100 Chip-Transistoren.

*Wenn die Automobilindustrie ein ähnliches Tempo vorgelegt hätte wie die Halbleiterindustrie, würde ein Rolls Royce heute pro Liter 200.000 Kilometer weit kommen und es wäre billiger, ihn wegzuworfen als ihn zu parken.*

*Gordon Moore, Intel Corporation*

Käme die Welt ohne technisches Silizium aus? Es hätte schon in prähistorischen Zeiten Schwierigkeiten gegeben. Feuerstein etwa ist ein sehr feinkörniges Gemenge aus Quarz, also Siliziumdioxid, und Feuerstein war in der Steinzeit ein wichtiges Rohmaterial für Werkzeuge aller Art. Das Mittelalter hätte ohne Silizium auf Tongefäße, Butzenscheiben und die ersten Brillen verzichten müssen – Ton besteht aus Silikatmineralen, in Glas ist Silizium ein Hauptbestandteil. Aus der heutigen technischen Welt würde sich Silizium nicht mehr ohne ganz gravierende Folgen heraus



nehmen lassen, sie ist allzu sehr von Silizium-Halbleitern in Computern und Leistungssteuerungen abhängig: Die Kommunikation bräche zusammen, Flugzeuge könnten nicht mehr fliegen, die Bahn nicht mehr fahren, Autos blieben liegen, das Stromnetz würde kraftlos, die Prozesssteuerungen chemischer Anlagen würden versagen, Fernsehen und Radio schweigen, auch Zeitungen wären nicht mehr druckbar. Kulturkritiker könnten das nur kurz begrüßen, denn ohne Silizium in Computern würde es hierzulande sehr schnell sehr still, und die Nächte wären sehr dunkel.

Immer noch sind Firmen der Vereinigten Staaten von Amerika bei der Produktion von Halbleitern, insbesondere Mikroprozessoren führend, aber die europäische Industrie schließt auf. Die Region Dresden ist, auch durch die nachhaltige Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), in der Halbleitertechnik zu einem europäischen Glanzlicht mit ständig zunehmender Ausstrahlung geworden. Nach dem Maskentechnologiezentrum im vorigen Jahr kommt nun mit der Fertigungsstelle für 300mm-Wafer der Firma Siltronic eine weitere Schlüsselkomponente für den Bau fortgeschrittener Mikro- bzw. Nanoelektronik nach *Silicon Saxony*. Im Grunde verdankt die Region das einem ziemlich gewöhnlichen Stoff: Silizium.

Siliziumwafer mit Computerchips (quadratische Areale). Moderne Chips enthalten über 100 Millionen Einzeltransistoren.



*Silizium in seiner schönsten Form:  
Die Kugelspielerin, Walter Schott 1898*



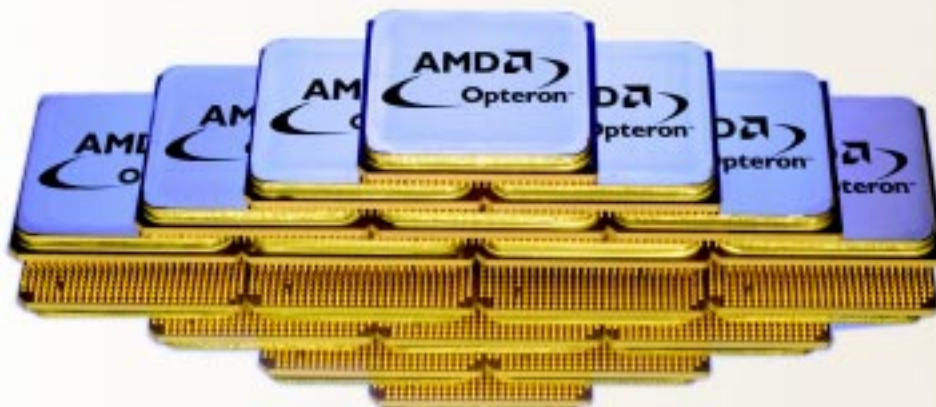
### Silizium in Dresden

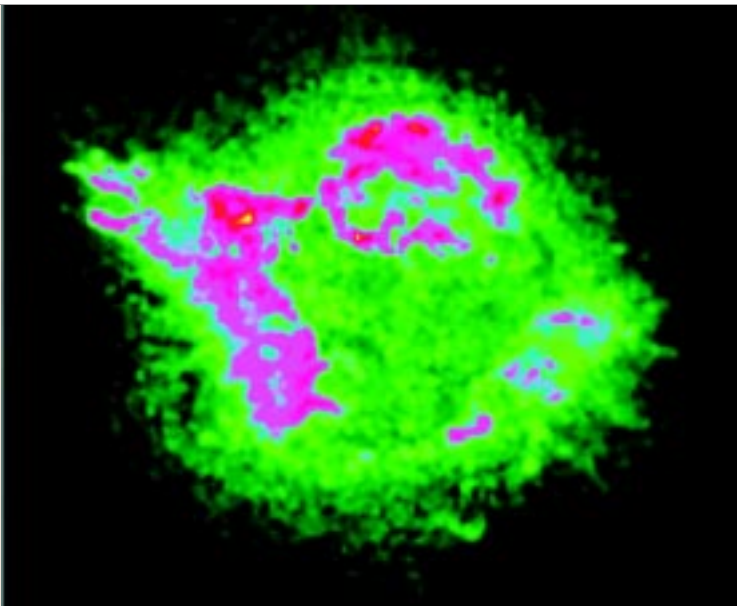
Es ist nicht das erste Mal, dass Silizium in der Region Dresden zu hohen Ehren kommt. Vor 300 Jahren verpflichtete August der Starke Ehrenfried Walter von Tschirnhaus und Johann Friedrich Böttger zur Zusammenarbeit bei der alchimistischen Herstellung von Gold.

Das konnte nicht gelingen, dafür fanden die Herren ein Verfahren zur Herstellung von etwas ebenfalls sehr Wertvollem: Porzellan. Das Rezept - 1/2 Kaolin, 1/4 Quarz, 1/4 Feldspat und viel Könnerschaft - wurde als *Arkanum* gehütet, wie ein besonders gewichtiges Geheimnis genannt wird. Das Element Silizium ist in diesem Gemenge zu fast einem Drittel vertreten. Kaolin oder auch Porzellanerde – in wenig reiner Form als Lehm bekannt – fand sich in der Nähe, alsbald karrten Fuhrwerke Fässer in feinsten Qualität aus einer Grube bei Aue heran. Die Meißner Porzellanmanufaktur nahe Dresden begann, viel Geld zu verdienen. Der Versuch, aus Substanzen eher niederer Abkunft etwas Außerordentliches und obendrein Profitables zu machen, war vollauf geglückt.

So schön die Karriere des Siliziums im Porzellan auch war und ist, in der Computerindustrie wurde das Material, nun in reiner Form, in einer Weise befördert, die in der Industriegeschichte ohne Beispiel ist. Dabei ist Silizium als zweithäufigstes Element der Erdkruste ein ungewöhnlich gewöhnlicher Stoff. Silizium ist verbreiteter als Sand am Meer; der Quarzsand, der sich dort häufig findet, ist nichts anderes als Siliziumdioxid,  $\text{SiO}_2$ . Und wenn es Glätte gibt, werden die Straßen damit bestreut. Tiefer kann ein Element kaum sinken. Eben dieses Silizium aber hat sich zum Fundament der Industriegesellschaften entwickelt. Wenn Silizium zu einem Computerchip veredelt wird, gelingt eine Wertdichte von 10.000 €/Gramm. Gold im Vergleich: unveredelt 20 €/Gramm, zu Schmuck verarbeitet vielleicht das Zehnfache. Damit hätte Silizium Gold um mindestens den Faktor 50 geschlagen – weil es sich mit Intelligenz beladen lässt.

*Silizium in seiner komplexesten Form:  
Opteron-Prozessor mit über 100  
Millionen Transistoren*





Cassiopeia A, Supernova, deren Licht Mitte des 17. Jahrhunderts (unbemerkt) eintraf, zeigt dem Chandra-Röntgenteleskop eine gewaltige Wolke aus frisch produziertem Silizium.

### Eine kurze Geschichte des Siliziums

Silizium hat, wie die meisten chemischen Elemente, eine turbulente Vergangenheit. Es wurde und wird in Sternen synthetisiert, von Turbulenzen in die Sternatmosphären und darüber hinaus gebracht, meist aber in einer gewaltigen Supernova-Explosion in den Raum zwischen den Sternen gefegt.

Dort findet es sich, mit anderen Elementen, zu neuen Sonnen und Sonnensystemen zusammen. Planeten, auch die Erde, beginnen als heiße, flüssige Riesentropfen solchen Materials, in denen sich die Elemente entmischen: Schweres, wie Eisen, sinkt ab, Leichtes, darunter Siliziumverbindungen, steigt auf. So wurde Silizium das zweithäufigste Element in der Erdkruste. Wenn flüssiges Erdkrustenmaterial erstarrt, entstehen in ihm zahllose feine Kristalle aus Quarz, Siliziumdioxid. Quarz ist sehr verwitterungsbeständig, und wenn der Zahn der Zeit das Gestein zerfallen lässt, bleiben Quarzkörner übrig. Die können von Wind und Wasser zu einer Lagerstätte zusammengetragen werden. Wird die auch noch von saurem Wasser durchzogen, etwa dem eines mit Humussäuren gesättigten Moores, löst sich mit der Zeit, viel Zeit, fast alles auf, was nicht aus Quarz ist. Das Silizium im Sand ist nun bereit für ganz erstaunliche Karrieren. Gute Quarzsand-Lagerstätten sind überdies gar nicht selten. Streift um Silizium kann es mithin nie geben, es hat also strategische Bedeutung, ohne ein strategischer Rohstoff zu sein.

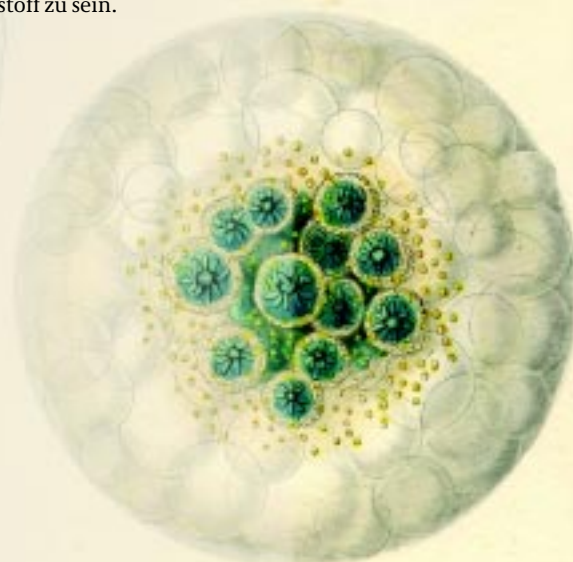
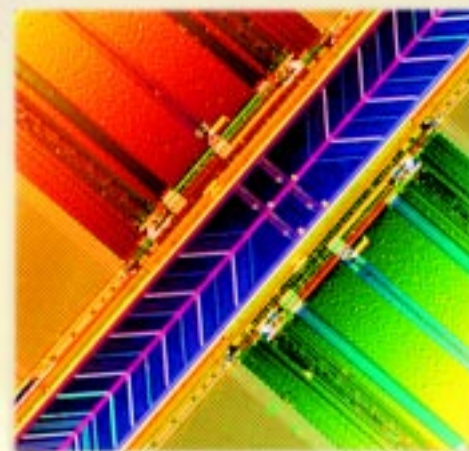
Mitte rechts: Speicherchip, Detail. Chips sind die komplexesten Gebilde, die je von Menschen gemacht wurden. Sie sind beinahe ebenso filigran wie die Werke der Natur.

Chips von Mutter Natur: Radiolarien, Einzeller mit Kieselsäurepanzer, in der berühmten Darstellung von Ernst Haeckel. Die ersten erschienen vor fünfhundert Millionen Jahren. Verdichtete Ablagerungen bilden den Feuerstein, das erste industrielle Silizium(dioxid)-Werkzeug.

### Silizium – ein Steckbrief

Silizium, Si, ist ein chemisches Element in der Gruppe 14 (früher: IVA) des Periodensystems. Es ist mit 27,7% Anteil das zweithäufigste Element der Erdkruste (das häufigste ist Sauerstoff). Silizium wurde erstmals von Jöns Jacob Berzelius isoliert, einem schwedischen Chemiker. Silizium kommt in der Natur nur zusammen mit Sauerstoff als Siliziumdioxid,  $\text{SiO}_2$ , oder mit Sauerstoff und anderen Elementen wie Aluminium, Magnesium, Kalzium, Natrium, Kalium oder Eisen, dann als Silikat, vor. Silizium ist allgegenwärtig.

Reines Silizium ist hart, und dunkelgrau, mit einem metallischen Glanz. Es kristallisiert in der gleichen Gitterstruktur wie Diamant. Was Silizium für die Elektronikindustrie so wichtig macht: Es ist ein Halbleiter, dessen elektrische Eigenschaften durch die Zugabe winziger Mengen anderer Elemente (Dotierung) genau eingestellt werden können. Die Herstellung fein strukturierter Transistoren gelingt auch deshalb so gut, weil das leicht präparierbare Siliziumoxid ein hervorragender Isolator ist.



# Vom Sand zum Supercomputer

*Rohsilizium über Quarzsand,  $\text{SiO}_2$ , aus dem es mit thermischen Prozessen gewonnen wird.*

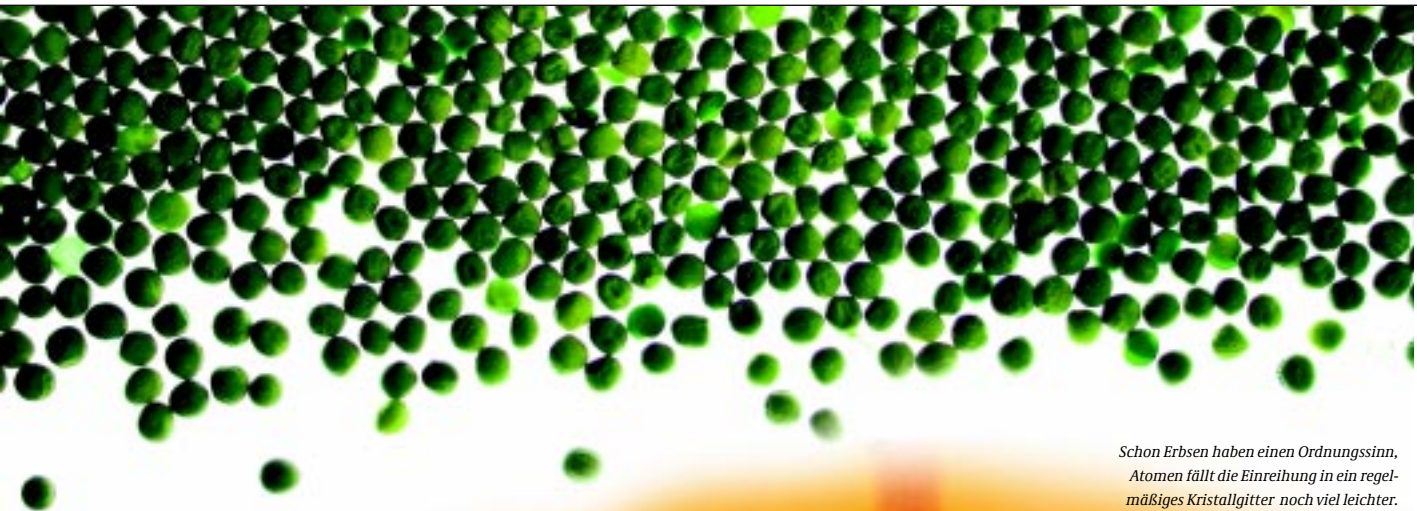
## Vom Quarzsand zum Silizium

Wer reines Silizium haben will, muss dem Quarzsand,  $\text{SiO}_2$ , den Sauerstoff nehmen. Das geht mit Koks, Kohlenstoff, weil aber Silizium und Sauerstoff sehr fest miteinander verbunden sind, finden Kohlenstoff und der Sauerstoff des Siliziums erst bei Temperaturen um 1800 Grad Celsius zu Kohlendioxid zusammen, das abgeleitet wird. Silizium bleibt zurück. Der Prozess muss mit viel elektrischer Energie unterhalten werden, pro Kilogramm Rohsilizium sind 14 Kilowattstunden nötig. Das so gewonnene Rohsilizium enthält noch circa ein Prozent an Verunreinigungen, notwendig sind weniger als 1 ppb, was bedeutet, dass sich unter 1.000.000.000 Siliziumatomen, einer Milliarde, maximal ein Fremdatom aufhalten darf. Müsste der Äquator der Erde so genau vermessen werden, wären 4 Zentimeter der maximale Fehlbetrag.

Das Rohsilizium also ist für Computerzwecke gänzlich ungeeignet, deshalb wird es mit reiner Salzsäure zu Trichlorsilan umgesetzt, einer bei 31,8 Grad siedenden Flüssigkeit, die in großen, über 30 Meter hohen Anlagen destilliert wird. Das Destillat, der „Siliziumbrand“, enthält nur noch Verunreinigungen unter 1 ppb. Die Rückführung in festes Silizium gelingt über eine Reaktion des Trichlorsilans mit hochreinem Wasserstoff. Dazu wird ein Gemisch

der Gase in Kontakt mit „Dünnstäben“ aus – wieder hochreinem - Silizium gebracht, an denen sich neues Silizium in kleinen, ungeordneten Kristallen als Polysilizium – kurz für polykristallines Silizium - abscheidet. Die Dünnstäbe werden dabei dick. Bei ca. 180mm Durchmesser wird der Prozess beendet und der Stab zerkleinert. Der Stoff, der die Hightech-Zivilisation in Bewegung hält, ist fertig. Allein, es fehlt ihm noch an innerer Ordnung. Die bekommt er auf eine im Prinzip erstaunlich simple Art.





*Schon Erbsen haben einen Ordnungssinn, Atomen fällt die Einreihung in ein regelmäßiges Kristallgitter noch viel leichter.*

## Vom Polysilizium zum Kristall

Die elektronischen Effekte, die einen Computerchip zur Arbeit befähigen, kommen so recht erst zum Tragen wenn sich die Siliziumatome in ein strenges, regelmäßiges Gitter eingefügt haben. Das klingt, als sei Nanotechnologie gefordert, die Sache ist aber wesentlich einfacher. Wenn es geht, strebt Materie von Natur aus einen Zustand niedrigster Energie an, dem Störungen nur noch wenig anhaben können. Im Fall fester Körper ist der stabile Endzustand tatsächlich der kristalline, in dem die Atome ein geometrisch wohl geordnetes Gitter besetzen. Wer Erbsen auf einem Kuchenblech rüttelt, kann die Neigung kugeliges Gebilde zu geometrischer Strenge schon erkennen, und Atomen geht es nicht anders. Und die Ordnungsliebe steckt im Mikrokosmos an: Vorsichtig über ein „Erbsengitter“ gestreute neue Erbsen arrangieren sich ebenfalls in Reihen und Glied, indem sie einfach in die Zwickel der ersten Erbsenschicht rutschen, und so fort. Die Fachwelt nennt dieses geordnete Aufwachsen „Epitaxie“. Für Silizium, das in Computern enden soll, bedeutet das: Das reine, polykristalline Silizium wird in Quarzbehälter vom Format einer halben Regentonne gegeben und aufgeschmolzen. Dann wird ein bleistiftdünner Impfkristall in die Schmelze abgesenkt, an dessen atomaren Ebenen die Siliziumatome der wohltemperierten Schmelze streng nach Vorgabe geordnet, *epitaktisch*, andocken. Der Impfkristall wird in Drehung versetzt und langsam hochgezogen. Ein zentnerschwerer Koloss wächst heran, ein Siliziumeinkristall. Der hat spezielle Eigenschaften, dank eines – hier bislang ausgelassenen – Prozesses, der Dotierung. Das so mühsam gereinigte Material hat vor dem Wachstum des Riesenkristalls Besuch von fremden Elementen bekommen.

*Polysilizium wird bei über 1400° C eingeschmolzen. An einem in die Schmelze eingetauchten Impfkristall wächst der Einkristall mit gleicher kristallographischer Orientierung.*



## Reinheit ist nicht alles

Silizium pur ist als Material nicht uninteressant, aber auch nicht aufregend. Reines Silizium ist ein elektrischer Isolator. Die elektronischen Eigenschaften, die es im Computer brillieren, elektrische Spannungen und Ströme steuern, Ladungen verschieben lassen, bekommt es erst durch die Zugabe von Fremdstoffen. Sehr reinen Fremdstoffen natürlich, in sorgfältiger Dosierung. „Dotierung“ heißt der Vorgang, und gemessen an seiner Bedeutung ist er ganz undramatisch: Ein Mensch schüttet vor dem Aufschmelzen des Polysiliziums das entsprechende Dotiermaterial – eine sehr kleine Portion - in den Schmelztiegel. In der Schmelze verteilt es sich dann gleichmäßig.



### Perfekte Kristalle

Je kleiner die elektronischen Strukturen werden, desto sauberer müssen die Atome im Kristall angeordnet sein. Der Grund ist klar: In großen Strukturen fallen kleine Unregelmäßigkeiten nicht ins Gewicht, wenn aber die Struktur so klein wird wie die Unregelmäßigkeit in ihr, ist auch die Struktur unregelmäßig und kann nicht funktionieren. Kurzum: Siliziumkristalle für Wafer müssen künftig noch perfekter sein. Es gibt im Wesentlichen zwei Baufehler im Gitter eines Kristalls, die sich zu störenden Defekten auswachsen können: Atome, die fehlen oder sich am falschen Platz zwischen richtig angeordnete Atome gezwängt haben. Beide Fehlerarten sind von der Wachstumsgeschwindigkeit des Kristalls abhängig. Dieser Prozess kann heute so genau kontrolliert werden, dass Kristalldefekte mit den verfügbaren Instrumenten kaum noch nachzuweisen sind.

### Vom Kristall zum Wafer

Die nach Kundenspezifikationen dotierten Kristalle müssen schließlich zu Scheiben, Wafern, zerlegt werden. Hierfür wird der Kristall zunächst zu einem perfekten Zylinder zurecht geschliffen. Mechanische Markierungen – Kerben, Anschliffe – halten die Kristallorientierung fest. Dann zerlegen Innenloch- oder Drahtsägen den Kristall in Scheiben. Bei Drahtsägen fährt eine Vielzahl von parallelen, hoch belastbaren Metalldrähten eine Aufschlämmung (slurry) von sehr kleinen, harten Siliziumcarbid-Kristalle über den Siliziumstab und zerteilt ihn so in einem Arbeitsgang in bis zu 300 ca. 0,8mm dünne Scheiben.

*Nach der „Züchtung“: Der zentnerschwere Silizium-Einkristall hängt an seiner bleistiftdünnen „Nabelschnur“.*



Zersägen eines Einkristalls mit einer Drahtsäge

Silizium ist ein zwar hartes, aber auch sehr sprödes Material. Um mechanische Beschädigungen der Kanten bei den folgenden Handhabungsprozessen zu vermeiden, werden zunächst die Kanten der Wafer rund geschliffen. Anschließend werden die Wafer durch Schleifen, Läppen oder eine Kombination von beidem planparallel gemacht.

Diese mechanischen Prozesse haben den atomaren Aufbau des einkristallinen Siliziums bis zu einer Tiefe von einigen Mikrometern gestört. Nicht perfekt geordnetes Silizium ist für bestimmte Ätzmittel anfälliger als perfektes und kann so, mit Ätzen, abgetragen werden. Zurück bleibt eine raue, kristallographisch aber fehlerfreie Oberfläche.

Die Rauigkeiten müssen durch Polieren wieder ausgeglichen werden, dazu werden die Wafer auf einen Polierteller aufgekittet und „mit dem Gesicht nach unten“ auf einen rotierenden Polierteller gepresst. Bei der Politur sind vornehmlich chemische Prozesse wirksam, die den kristallinen Aufbau des Wafers nicht stören.

Nach dem Polieren werden die Wafer in speziellen Automaten von Kittresten und Poliermittel befreit. Jedes Partikelchen auf der Oberfläche würde bei der späteren Lithographie als Streuzentrum wirken und den Prozess stören, deshalb rastern Laserscanner den Wafer ab, die noch 0,1 Mikrometer kleine Partikel entdecken können.

Die Sorgfalt wäre vergeblich, wenn aus der Verpackung wieder Partikel auf den Wafer gelangen könnten. Deshalb werden auch die Verpackungen extrem sauber

Polieranlage, ein ganz wesentlicher Teil des Wafer-Knowhows



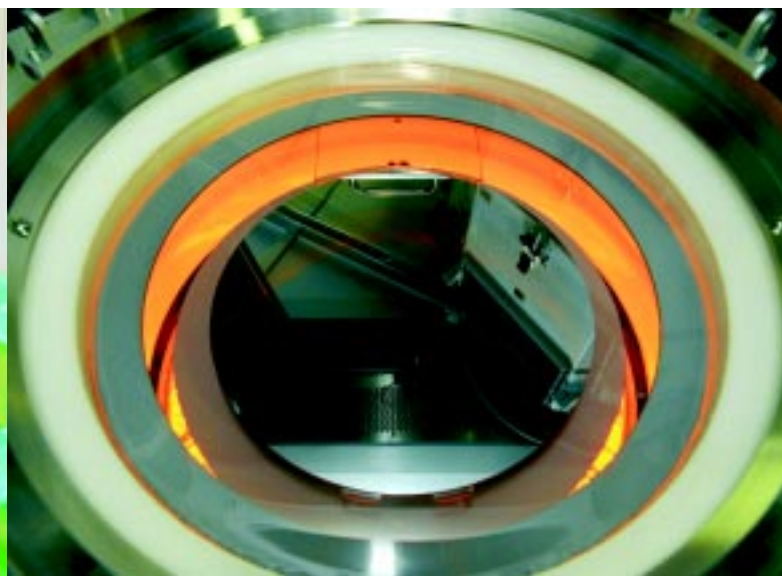
„Spiegelblanke“ 200mm-Wafer in ihrer Spezialverpackung auf dem Weg zum Kunden.

gehalten. So verpackte Wafer können beim Kunden ohne weitere Vorbehandlung zur Herstellung höchstintegrierter Schaltungen verwendet werden.

### Wafer à la carte

Wafer sind mittlerweile weit mehr als bloßes Trägermaterial, sie enthalten immer mehr an technischem Feinschliff, der ihre spätere Funktion vorbereitet. Art und Umfang der Dotierung variieren, abhängig vom gewünschten Einsatz. Auch die Wahl des Kristallzuchtverfahrens wird von der späteren Anwendung bestimmt. Manche Bauteile erfordern Silizium, das an der Waferoberfläche einen tausendfach höheren spezifischen elektrischen Widerstand aufweist als im Waferinneren. Hier hilft das gleiche Verfahren, das bei der Züchtung eines Siliziumeinkristalls verwendet wird: Epitaxie. Die Oberfläche eines polierten Wafers wird einem Gasgemisch aus Trichlorsilan, Wasserstoff und Dotiermittel ausgesetzt. Dann wachsen – wie bei der Reinsiliziumgewinnung – neue Siliziumschichten auf, unter Bedingungen, die ein sehr langsames Aufwachsen bewirken. Dann haben die neuen Schichten exakt die gleiche geometrische Anordnung wie der darunter liegende Wafer. Der Prozess ist sehr empfindlich, was Partikelkontamination betrifft, erfordert Reinraumbedingungen erster Güte und größte Sorgfalt beim Be- und Entladen der Wafer.

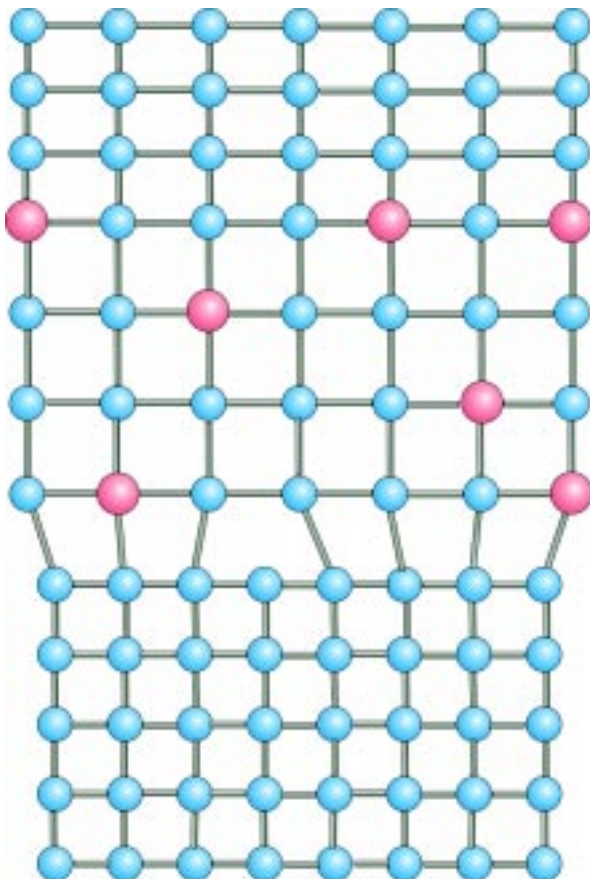
Einzelwafer-Epitaxiereaktor



## Silizium im Stress

Um etwa neue Kommunikationskanäle mit höheren Frequenzen zu erschließen, benötigt die Kommunikationstechnik immer schnellere und – für mobile Anwendungen – sparsamere Integrierte Schaltungen. Die erforderliche Leistungssteigerung gelingt unter anderem durch trickreiche Variationen des Materials, auf das ein Chip zu liegen kommt, des sogenannten Substrats. Bei SOI-Wafern (Silicon-on-Insulator) werden die Chips in einer hauchdünnen Siliziumeinkristallschicht realisiert (Größenordnung ein Zehntausendstel Millimeter), die von einer Siliziumoxid-schicht vom eigentlichen Wafer getrennt ist. Das mindert die sogenannte kapazitive Kopplung zwischen Chip und Wafer, die eine Verlangsamung der Schaltzeiten zur Folge hat, also wird der Chip schneller. Zugleich sinkt die Leistungsaufnahme. Und: Auch die „vergrabene“ Siliziumoxid-schicht kann strukturiert werden, so dass sich robuste und kostengünstige Sensoren für Druck und Beschleunigung herstellen lassen, die unmittelbar mit einer Auswerteelektronik gekoppelt werden können.

*Gestresstes Silizium: Germaniumatome (rot) weiten das Siliziumgitter (blau) auf. Wenn eine sehr dünne Siliziumschicht (oben) die Silizium-Germanium-Pufferschicht (Mitte) überwächst, behält sie die Gitteraufweitung bei. Unten: Das unverspannte Silizium des Wafers.*



Ein anderer Trick besteht darin, Silizium mechanisch zu verspannen, unter Stress zu setzen. Das gelingt mit einer Silizium-Germanium-Pufferschicht (mit einem Germaniumanteil bis 25%), auf die reines Silizium epitaktisch aufwächst. Epitaxie heißt, dass das aufwachsende Material das Kristallgitter der Unterlage annimmt. Die Atome der Silizium-Germanium-Pufferschicht sind aber luftiger gepackt als die eines Siliziumeinkristalls. Folglich weitet sich das Gitter des Siliziums auf und verändert dabei seine elektronischen Eigenschaften zum Vorteilhaften: Die Ladungsträger (Elektronen und Löcher) können fast doppelt so schnell durch das Transistorgebiet fließen, die mögliche Schaltfrequenz steigt und die Leistungsaufnahme sinkt.

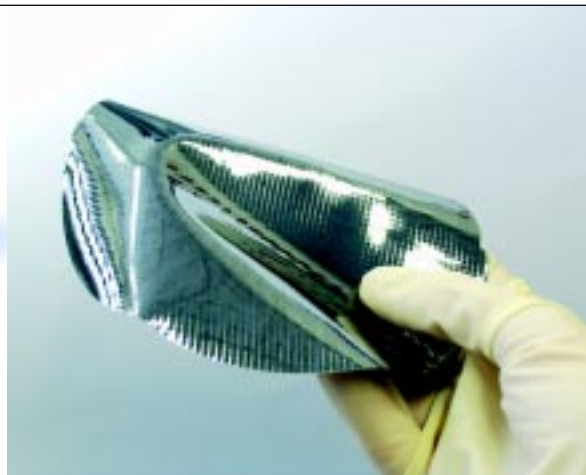
Einige Halbleiterhersteller versuchen bereits, SOI- und „Strained Silicon“-Techniken miteinander zu verbinden, also auf eine isolierende Unterlage eine verspannte Siliziumschicht zu übertragen, was zu einer erheblichen Leistungssteigerung der darin realisierten Schaltungen führen würde.

## Vom Wafer zum Chip

Computerchips – gleich, ob Prozessoren oder Speicher – werden fotolithografisch gefertigt. Der Prozess kann im Einzelnen ganz unterschiedlich sein, im Prinzip geht er so: Wenn auf dem Wafer etwa eine Verdrahtungsebene für die einzelnen Chips einzurichten wäre, würde der ganze Wafer mit einem hauchdünnen Metallüberzug versehen werden. Der würde dann mit einem lichtempfindlichen Schutzlack überzogen und der mit dem Abbild einer „Maske“ belichtet, einer Art Dia. Moderne Technologien benötigen über 20 Masken, ein Maskensatz kostet weit über 100.000 Euro. Die Maske enthält das Muster des Verdrahtungsplans für einen Chip in zigfacher Ausfertigung, bei 300mm-Wafern entstehen in einem Arbeitsgang hunderte von Prozessoren oder Speicherchips zugleich. Dann würde der Schutzlack „entwickelt“, so dass er an den belichteten (oder unbelichteten) Stellen mit einem Lösungsmittel entfernt werden kann. Die ungeschützten Flächen der Metallschicht werden dann mit einem Ätzmittel entfernt, übrig bleibt ein Leiterbahnengeflecht nach dem Muster der Maske. Die anderen Strukturen der Chips entstehen auf eine ähnliche Weise, in einem sehr kunstvollen Prozess von Geben (Aufdampfen von Material etwa, Einbringen von Dotierungen) und Nehmen (Wegätzen, Absputtern, Polieren). Schließlich, wenn es ein Prozessor werden soll, wächst mit über 100 Fertigungsschritten pro Wafer in mehreren Etagen das kunstvollste, komplizierteste Gebilde heran, das die Technik des Menschen je hervorgebracht hat.

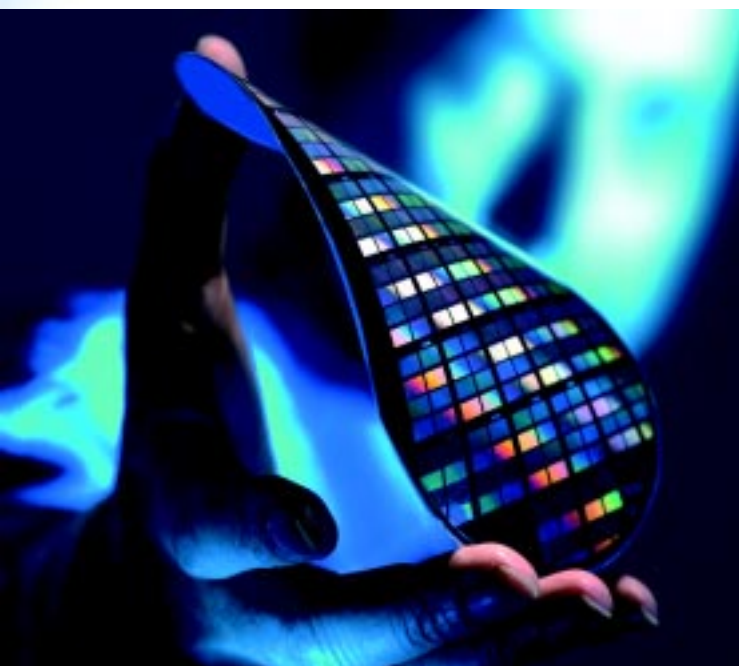


Der Lithographie-Prozess



Dünne Wafer werden biegsam und können in Kreditkarten wie Kleidung integriert werden

Auch und gerade technisch bewanderten Menschen sagt die Intuition, dass Komplexität auch Empfindlichkeit bedeuten sollte. Mikro-, nanoelektronische Strukturen sind aber bislang immer robuster geworden. Die Zuverlässigkeit und Lebensdauer von modernen Halbleitern ist verblüffend, erst recht erstaunt die Ausbeute, der Anteil funktionstüchtiger Chips auf einem Wafer. Eingefahrene Chipfabriken kommen an hundert Prozent heran. Bei sehr anspruchsvollen Produkten wie CPUs ist die Ausbeute selten höher als 85% – geschätzt, die wahren Werte sind ein Betriebsgeheimnis.



### Superdünne Wafer

Chips aus superdünnen Wafern sind biegsam und können in Kunststofffolien oder Papier eingebettet werden, und das mindeste, was man von ihnen erwarten darf, sind Bibliotheken auf einem einzigen elektronischen „Blatt“, aus solchen Chips und leuchtenden Polymeren, die auch bewegte Bilder zeigen.

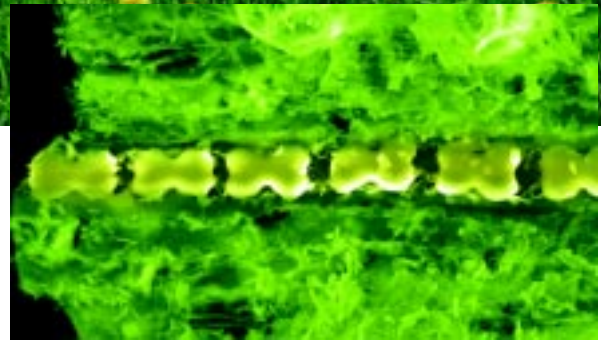
Profaner, aber praktisch, wäre eine Geldbörse/ Kreditkarte mit Benutzererkennung, die etwa Fingerabdrücke und Stimme ihres Besitzers erkennt und nur ein von ihm gesprochenes Passwort akzeptiert – etwas Ähnliches ist in der Entwicklung. Fachlich wird diese Art Elektronik mit „local awareness“ und „ambient intelligence“ betitelt, ihr attraktivster Wesenszug wird sein, dass sie vornehmlich durch Dienstleistungen in Erscheinung tritt, ihr elektronischer Kern aber kaum mehr wahrzunehmen ist. Bei superdünnen Chips kommt eine alltagstaugliche Robustheit dazu, man wird sich auf die elektronische Börse setzen können, ohne daß sie oder die elektronische Kreditkarte darin Schaden nimmt.

Die „Intelligenz“ dünner Chips wird zwischen der von Prozessoren und der von Polymerelektronik liegen und zahllose Annehmlichkeiten möglich machen, wie den Reisebegleiter im Format einer Postkarte, der seine Besitzerin mit gesprochenem Wort und Bildern durch die Stadt führt. Über die Satellitensysteme GPS oder das europäische Pendant *Galileo* weiß die Postkarte über ihren Standort Bescheid, sagt bei Gelegenheit etwas zu den Sehenswürdigkeiten oder zu Restaurants in der Nähe, deren Angebot dem Geschmack der Reisenden entgegen kommt. Im Restaurant erklärt der Reisebegleiter Eigenheiten der Speisekarte und weist, über WLAN informiert, darauf hin, dass doch noch ein Platz auf der Sonnenterasse frei geworden ist.

Derzeit beginnen Texte, Töne, Videos, Informationen aller Art sich von ihren materialien Trägern zu lösen und Eingang in eine Art elektronischen Nebels zu finden, aus dem sie bald mit Geräten herausgefischt werden können, die so einfach zu handhaben sind wie – eine Postkarte.



*In einer Wiese arbeiten Kohlenstoff und Silizium harmonisch zusammen. Die Trockensubstanz des Grases besteht weitgehend aus Kohlenstoff, das es sich aus der Luft geholt hat. Das Silizium steckt als Siliziumdioxid in sogenannten Opalphytolithen, einer Art Quarzkörnchen, die unter anderem die Halmränder scharf machen und damit den Grasfressern das Leben schwer. In manchen Pflanzenteilen wie Reishülsen sind Silizium und Kohlenstoff so gut proportioniert, dass beim Verkoken fädige Keramikkrystalle aus Siliziumcarbid entstehen, mit denen Leichtmetalle für Luft- und Raumfahrt verstärkt werden können.*

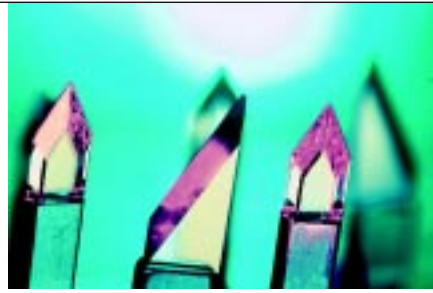
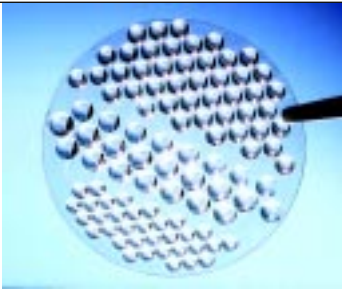


# Silizium und Kohlenstoff

Als sich zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Chemie von einer Kunst zur Wissenschaft wandelte und geheime Rezepturen wie das Porzellan-Arkanum von Patenten abgelöst wurden, trat eine Fülle von Erkenntnissen über die chemischen Elemente und ihre Verbindungen ans Licht, die nach der Einordnung in ein System riefen.

1817 entdeckte der deutsche Chemiker Johann Wolfgang Döbereiner, dass sich die Elemente Calcium, Strontium und Barium von ihren Eigenschaften her zu einer Dreiergruppe, einer Triade zusammen fassen ließen, er fand Ähnliches für Chlor, Brom und Jod und dann auch für Lithium, Natrium und Kalium. 1871 entwarfen Dmitri Iwanowitsch Mendelejew und Lothar Meyer geniale Schemata der Elemente, die sogar Schlüsse auf die Eigenschaften noch unentdeckter Elemente zuließen, die bei deren schließlicher Entdeckung hilfreich waren.

Das moderne „Periodensystem der Elemente“ unterteilt die Stoffe, aus denen Wiesen und Wälder, Mann und Maus, Luft und Bergkristall gemacht sind, in Gruppen. Silizium findet sich in Gruppe 14 und hat dort, über sich, einen bemerkenswerten Nachbarn: Kohlenstoff. Kohlenstoff ist für die belebte Welt, was Silizium für die technische ist: Ein wahrhaft universelles Element. Die Verbindungen des Kohlenstoffs sind so zahlreich, dass ihnen ein großer eigener Zweig der Chemie gewidmet ist, die Organische Chemie. Die Bezeichnung „organisch“ kommt nicht von ungefähr,



*Diamantlinsen, Diamantskalpelle, Diamant-Unruh.*

*Aus Silizium lassen sich noch komplexere Elemente formen, da seine Eigenschaften bestens erforscht sind.*

die Organische Chemie befasst sich auch mit Lebensvorgängen und kann, tatsächlich und schon lange, mit einfachen Mitteln Schweißgestank in Blumenduft verwandeln.

Die am wenigsten organische Verbindung des Kohlenstoffs ist – kalt und glitzernd – der Diamant. Dass Diamant nichts weiter ist als Kohlenstoff, bewies der geniale französische Chemiker Lavoisier 1772, indem er den Edelstein in einem geschlossenen Glasgefäß verbrannte. Es blieb nichts übrig als ein Gas, Kohlendioxid. Eine besonders beeindruckende Diamantsynthese gelang im Dezember 1955, als Robert Wentdorf bei General Electric Diamanten aus seiner Lieblingserdnussbutter machte, wenn auch nur sehr kleine. Erdnussbutter besteht zu einem großen Teil aus Kohlenstoff, wie Brot.

Diamant hat imposante Eigenschaften, die ihn für die Technik allgemein und für die Elektronik speziell interessant machen. Er ist nicht nur die härteste bislang bekannte Verbindung, er leitet Wärme auch fünfmal besser als Kupfer und könnte als Material für elektronische Schaltungen dienen, die noch bei sechshundert, siebenhundert Grad voll funktionieren. Und eine Diamantelektronik wäre auch sehr strahlungsfest, was etwa im Weltraum wichtig ist. Erwächst Silizium also ein ernsthafter Konkurrent? Vorerst nicht, denn wie viele Stars ist auch Diamant zickig, er lässt sich weitaus schwerer als Silizium zu einem perfekten Einkristall heranziehen. Die größten kommerziell verfügbaren synthetischen Schmuckdiamanten sind gerade einmal 2,5 Karat schwer, ein halbes Gramm, und ihre Qualität ist für eine Elektronik zu bescheiden. Aus einer Gasphase abgetrennte Diamantschichten sind ebenfalls noch nicht

*Silizium versus Diamant, kristalliner Kohlenstoff–*

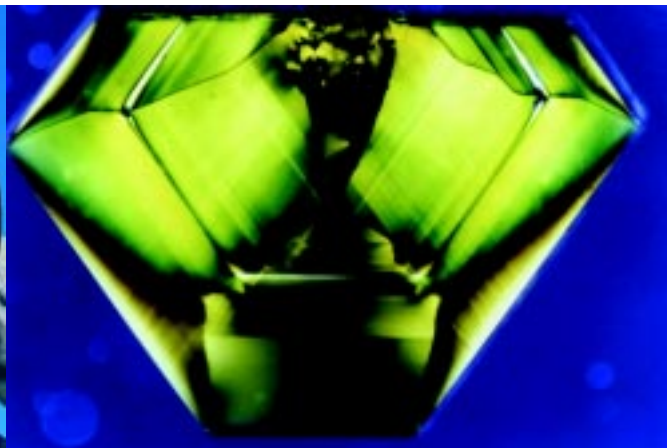
*nur Silizium (Wafer mit DRAM-Memorychips) lässt sich willig mit Intelligenz bepacken*

perfekt genug. Siliziumeinkristalle dagegen werden im Maßstab hunderter Kilogramm geerntet und sind fehlerfrei.

Mikroskopisch kleine Diamanten sind wiederum leicht zu erzeugen, sie finden sich im Ruß jeder Kerze. Mittlerweile lassen sich routinemäßig diamantartige, aus Mikrokristallen zusammen gesetzte Schichten machen, die Werkzeuge vor Verschleiß schützen, Festplattenleseköpfe vor dem Crash und CD-Rücken vor dem Zerkratzen.

Und Kohlenstoff und Silizium kommen gut miteinander zurecht, etwa in der Gestalt von Siliziumcarbid, SiC. Die Substanz ist fast so hart wie Diamant und glitzert, deutlich als kristallin erkennbar, auf Schleifpapier. Sie ist ein guter Kandidat für Hochtemperatur-Halbleiter. Beschichtungen aus Siliziumcarbid-Keramik schützen metallische Turbinenschaufeln vor zerstörerischen Temperaturen oder kleiden Raketendüsen aus. Und Siliziumcarbid verstärkt Metalle wie Aluminium, dann in der Gestalt von „Whiskern“, kleinen, fädigen Kristallen. Deren Entstehung ist wieder ein Beispiel dafür, wie sich mit Intelligenz ganz ordinäre Materialien „vergoldet“ lassen: Siliziumcarbid-Whisker werden u.a. durch die Verkokelung - Pyrolyse – von Reishülsen gewonnen, einem eher lästigen Abfall. Die Reishülsen enthalten die Elemente Kohlenstoff und Silizium im genau richtigen Verhältnis.

Schließlich hilft Siliziumcarbid dem Silizium noch, zum Computerchip zu werden: Die Drahtsägen, die einen Silizium-Einkristall in Wafer zerlegen, verwenden eine Aufschlammung von harten Siliziumcarbid-Kriställchen als Trennmittel.





# Wafer made in Germany

In Freiberg sind früher schon bemerkenswerte Innovationen gelungen, so die Entdeckung des Elementes Germanium, 1886, das als erstes Halbleitermaterial weltweit industriell genutzt wurde und so die Entwicklung der modernen Elektronik in Gang setzte.



Zu DDR-Zeiten entwickelte sich Freiberg mit seiner engen Verbindung zu den wissenschaftlichen Lehr- und Forschungseinrichtungen Sachsens zum Zentrum der Halbleitermaterialentwicklung und -fertigung im Osten. Nach anfänglicher Konzentration auf Germanium – Germanium-Dioden etwa, mit denen sich „Detektor“-Radios bauen ließen, sind in guter Erinnerung – folgte auch die DDR-Industrie in den sechziger Jahren dem Trend zum Silizium. 1986 wurde ein nach dem damaligen Stand hochmodernes Werk für Silizium-Einkristalle und Silizium-Wafer in Betrieb genommen.

Die Fab 300-2, die im Juni 2004 in Betrieb geht, wird eine Reihe von Superlativen vorzuweisen haben. Die Kapazität der Anlage beträgt im Endausbau 150.000 Wafer pro Monat, gefertigt von 630 Mitarbeitern, genug Substanz für mehr als dreißig Millionen Chips, pro Monat. Die Waferfabrik erstreckt sich über eine Gesamtfläche (technologische Haupt- und Nebenflächen) von mehr als 30.000 Quadratmeter, davon alleine rund 4.500 Quadratmeter in Reinräumen, in denen pro Stunde eineinhalb Millionen Kubikmeter Luft umgewälzt werden. Die Gesamtinvestitionskosten betragen 430 Millionen Euro. Der Energieverbrauch ist eher bescheiden: rund 30 Megawatt.

Seit es einen Halbleitermarkt gibt, ist dieser tückisch. Das liegt unter anderem an der hohen Innovationsrate der Branche, die das Wirtschaftlichkeitsbarometer heftiger ausschlagen lässt als anderenorts. Dass die Branche insgesamt aber wächst, ist unbestritten. 2002 wurden Wafer mit einer Gesamtfläche von 500 Fußballfeldern produziert. Die Wachstumstendenz liegt bei 20% pro Jahr, da werden aus



*Vom Kristall zum Wafer - die Formen lassen den Aufwand, der zu ihrer Entstehung nötig ist, kaum erkennen.*



*Kristallzucht im großen Stil: Identische Anlagen veredeln Silizium im Tonnenmaßstab zu dem Stoff, aus dem die Computerträume sind.*

500 Fußballfeldern in zwanzig Jahren zwanzigtausend. Um unter solchen Umständen mitzuhalten, brauchen Firmen einen langen Atem und eine begrenzte, aber wirkungsvolle staatliche Unterstützung, wie sie das BMBF bereit gestellt hat. Wafer sind ein strategisches Gut, obwohl sie aus einem Allerweltselement gemacht sind: Silizium.

300mm-Wafer sind natürlich nicht das Ende der Entwicklung, 450mm werden bereits angedacht und voraussichtlich um 2010 realisiert. Selbst wenn die Gesetze der Physik einem weiteren Schrumpfen der Halbleiterstrukturen ein Ende setzen, wird die Leistung der Computerchips ungebrochen weiter steigen, nun durch Verbesserungen der Chiparchitektur, der Materialien und die zahllosen Tricks, die den Forschern noch einfallen mögen.

# Bildnachweis

Seiten 4-5: Siltronic AG, München

Seite 7: Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln, Grafik nach einer Vorlage von VLSI Research, Rose Associates

Seite 8-9: Siltronic AG, München

Seite 10: Gruppe Professor Köhler, RUB, Bochum

Seite 11, oben: Grafik VDI-TZ, Düsseldorf/ BergerhofStudios, Köln

Seite 11, Hintergrund: Montage, BergerhofStudios, Köln;

Chip, AMD- Advanced Micro Devices, Dresden

Seite 12, oben: Staatliche Porzellan-Manufaktur, Meissen

Seite 12, unten: AMD- Advanced Micro Devices, Dresden

Seite 13, oben: NASA

Seite 13, Hintergrund: Max-Planck-Institut für Züchtungs-  
forschung, Köln

Seite 13, Insert: Siltronic AG, München

Seiten 14-15: Siltronic AG, München / Montage

BergerhofStudios, Köln

Seite 16-17: Siltronic AG, München

Seite 18: Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und

Mikrointegration (FhG- IZM), München

Seite 19, oben links: Carl-Zeiss SMT AG, Oberkochen

Seite 19, oben rechts, unten: Fraunhofer-Institut für Zuver-

lässigkeit und Mikrointegration (FhG- IZM), München

Seite 20: Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln

Seite 20: Insert, Bearbeitung einer Vorlage von Christian

Mulder, Universität Utrecht, Niederlande

Seite 21, oben links, rechts: Fraunhofer IAF, Freiburg

Seite 21, oben Mitte: Element Six B.V.

Seite 21, unten links: Infineon Technologies AG, München

Seiten 22-23: Siltronic AG, München

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

