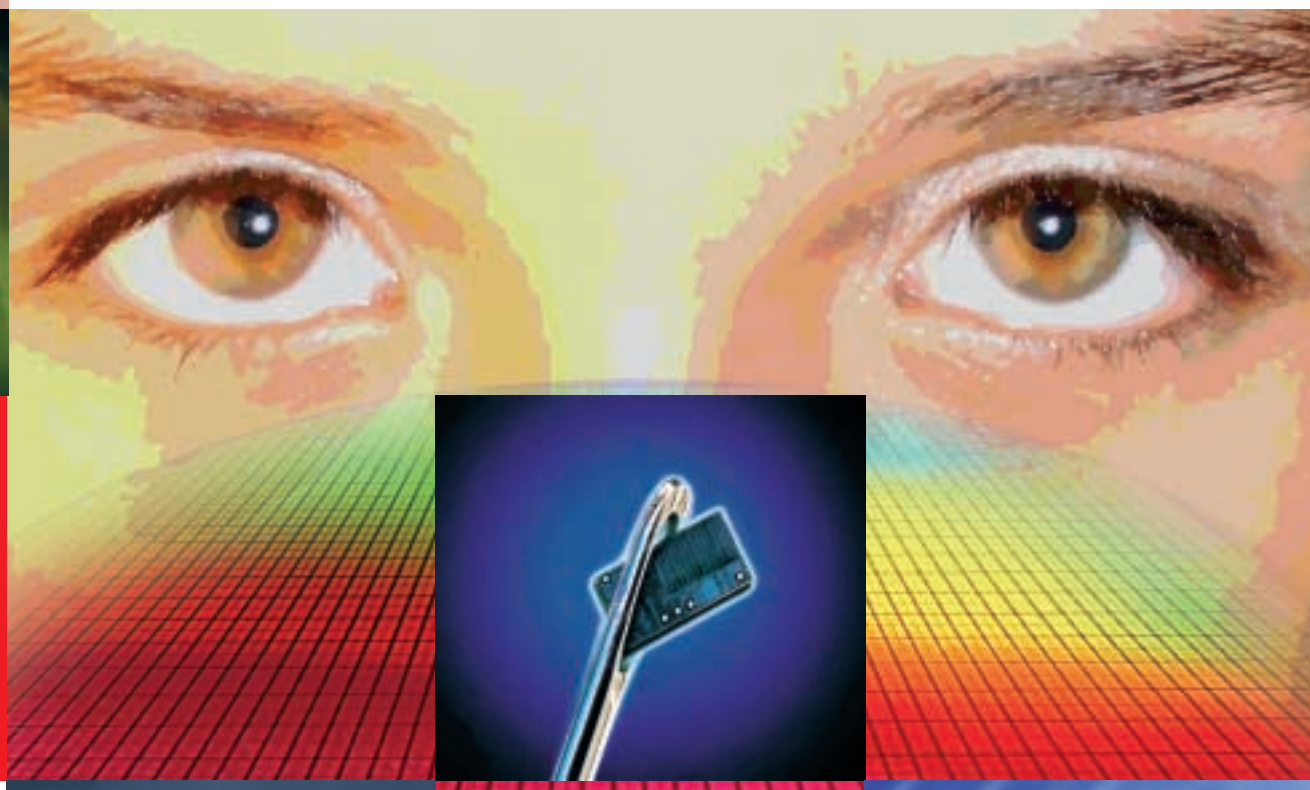
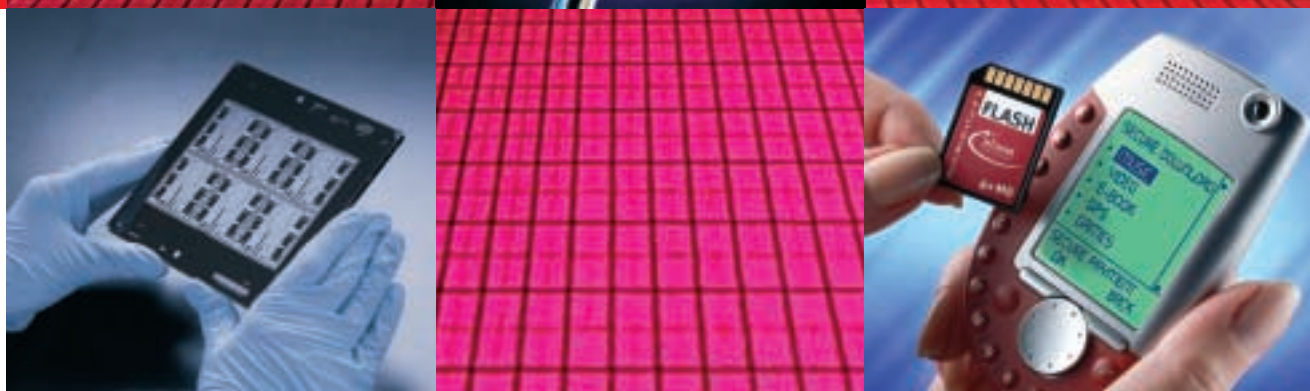
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Nanoelektronik für den Menschen

Vom Transistor zum Maskenzentrum Dresden

BMBF PROGRAMM





BMBF PROGRAMM

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Öffentlichkeitsarbeit
53170 Bonn

Bestellungen
Schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn
oder telefonisch unter der
Rufnummer 01805-BMBF02 bzw. 01805-262302
Fax:01805-BMBF03 bzw. 01805-262303
0,12 Euro/Min.
E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: http://www.bmbf.de

Koordination
VDI-Technologiezentrum Düsseldorf
Dr. Jochen Dreßen, Dr. Ralf Fellenberg

Autor
Dr. Mathias Schulenburg, Köln

Gestaltung
Suzy Coppens, Köln
www.bergerhof-studios.de

Druckerei
Druckhaus Locher GmbH, Köln

Stand
September 2003

Gedruckt auf Recyclingpapier

Bildnachweis Titelseite

Von oben nach unten:

1.: Designstudie eines UMTS-Mobiltelefons; Quelle: Siemens AG, München

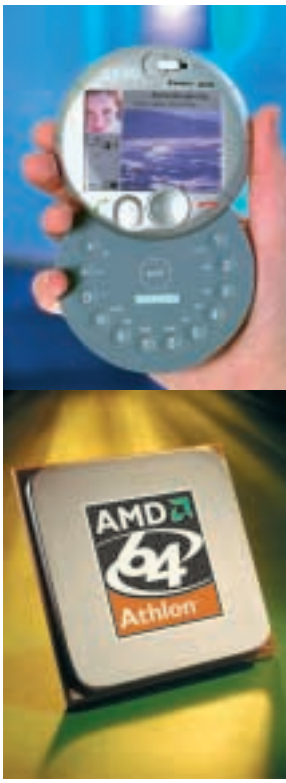
2. links: 64bit Prozessor für Desktop- und Notebook-PC mit simultaner Unterstützung von 32- und 64bit Anwendungen; Quelle: Advanced Micro Devices - AMD
2. rechts: Montage; Suzy Coppens, BergerhofStudios, Köln

3.: Mikrochip im Nadelöhr; Quelle: Philips GmbH, Hamburg

4. links: Photolithographiemaske zur Herstellung von Mikrochips; Quelle: Leica Microsystems AG, Wetzlar
4. rechts: 64 MB Flash-Speicherkarte für mobile Anwendungen; Quelle: Infineon Technologies AG, München

Nanoelektronik für den Menschen

Vom Transistor zum Maskenzentrum Dresden



Inhalt

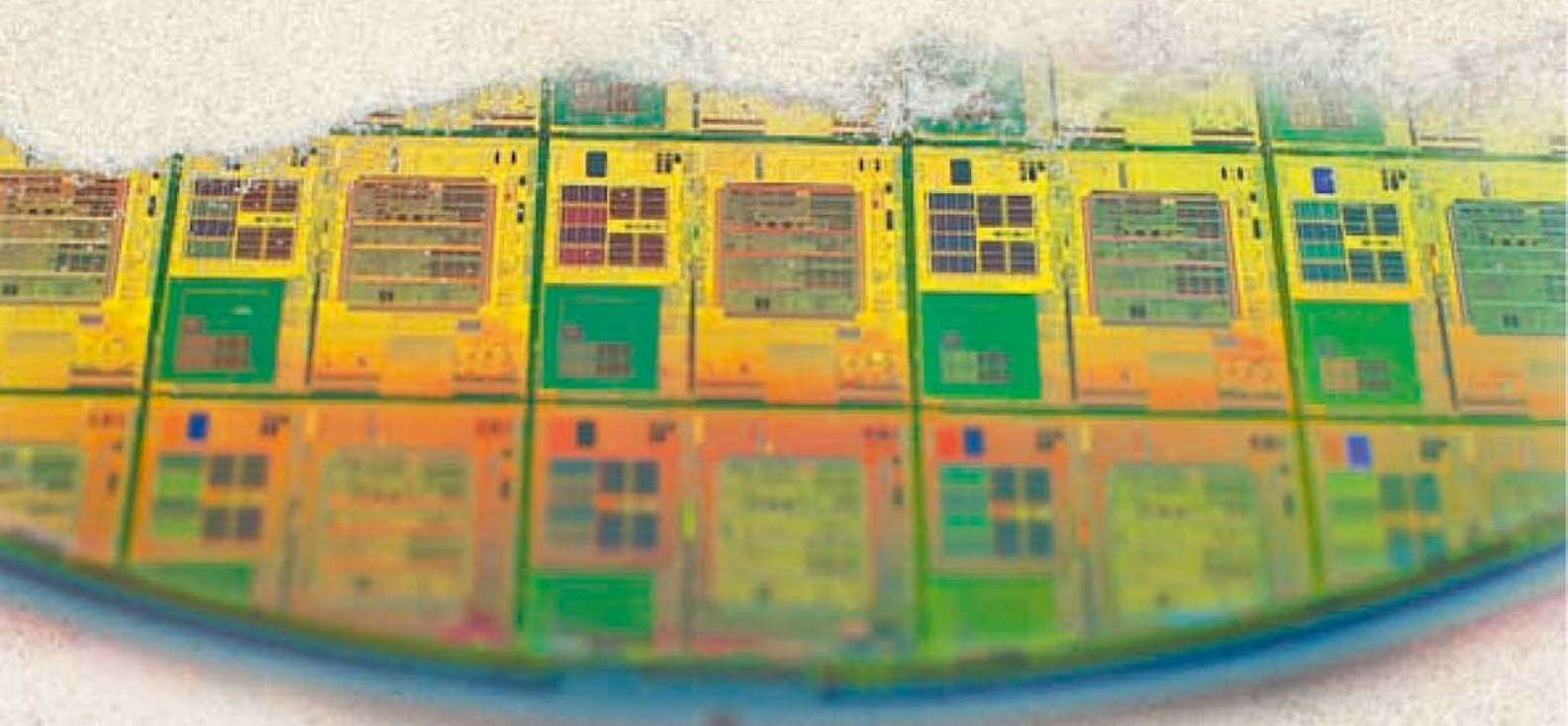
4-5 Inhalt

6-7 Nanoelektronik geht alle an

8-11 Nanoelektronik – ein Füllhorn schöner Möglichkeiten

12-13 Wie die Integrierte Schaltung in die Welt kam

14 Moore‘s Law



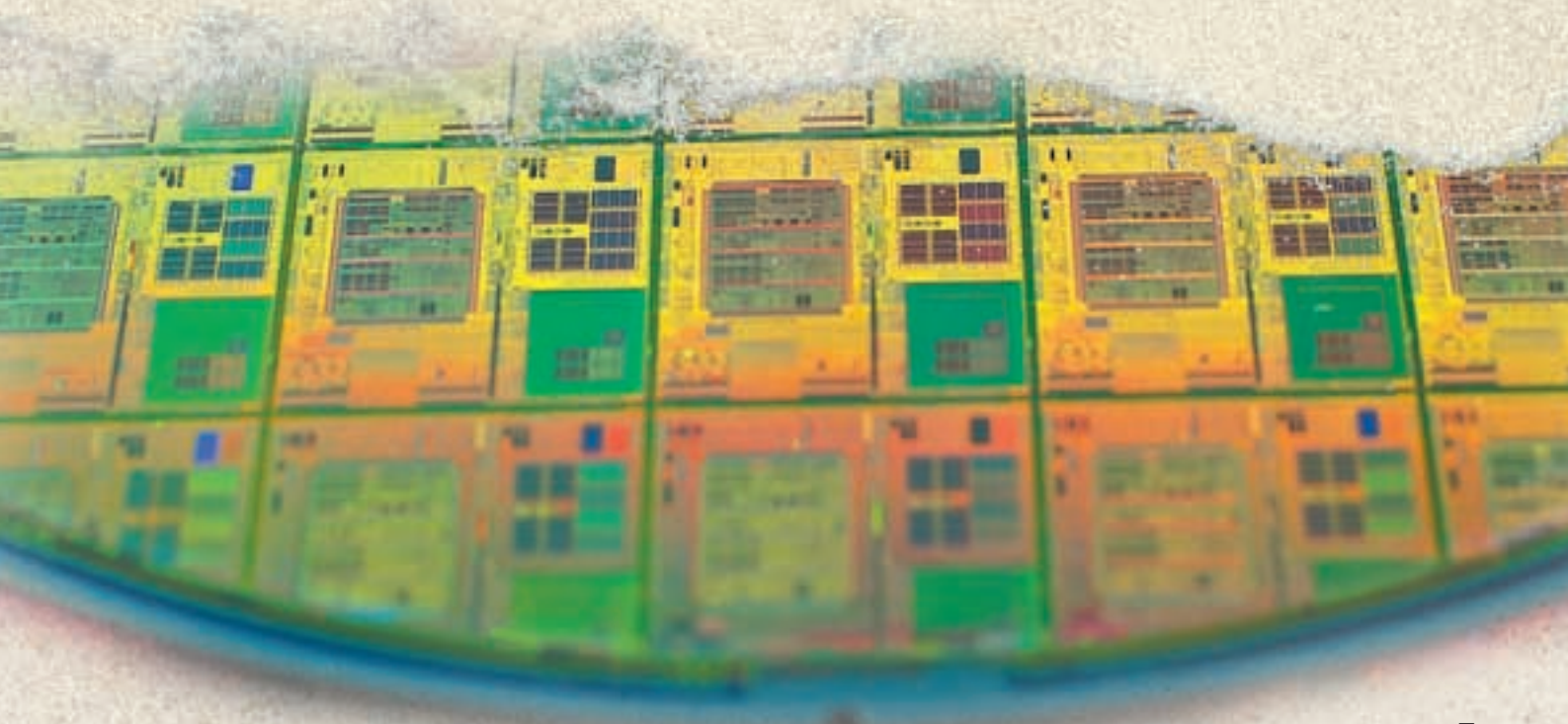
15 Analoge Wunder

16-17 Silizium – Treibstoff der Hochtechnologie

18-21 Lithographie – vom Fettstift zum Laser

22-23 Das Maskentechnologiezentrum – Portrait eines außergewöhnlichen Unternehmens

24 Bildnachweis



Nanoelektronik geht alle an

Der Innovationsmotor Nanoelektronik liefert einen fundamentalen Beitrag zur nachhaltigen, wirtschaftlichen und staatlichen Leistungsfähigkeit Deutschlands.

Der Markt für elektronische Bauteile beträgt allein in Deutschland rund 20 Mrd. €, mit über 70.000 unmittelbar in der Bauelementeindustrie Beschäftigten. Die aus den Bauelementen gefertigten Systeme haben einen Marktwert von etwa 100 Mrd. €. Weltweit hat die Elektronikindustrie einen Umsatz von 800 Mrd. €, ist bereits führend unter den produzierenden Industrien und hat hier sogar die Automobilindustrie überholt. Kein anderer Industriezweig bewirkt eine so hohe Wertschöpfung wie die Elektronik, hinzu kommt eine enorme Breitenwirksamkeit, von der nahezu alle Technologiebranchen profitieren. So hängen 80% aller Innovationen in der Automobilindustrie von der Elektronik ab. Dies zeichnet ihre besondere Bedeutung auch in volkswirtschaftlicher Hinsicht aus.

Ein Land wie Deutschland, das sich mit innovativen technologischen Produkten führend am Weltmarkt positionieren will, muss die Elektronik als einen unverzichtbaren Bestandteil der Wertschöpfungskette begreifen, dessen Bedeutung in Zukunft noch zunehmen wird. Weltweit wird um die Ansiedlung von Forschungs- und Produktionsstätten dieser global agierenden Industrie geworben. Der Forschungsförderung kommt hier eine zentrale Rolle zu, sie hilft, die Attraktivität des Standortes Deutschland zu sichern.

Die Förderung industrieller Forschung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung ist dort besonders sinnvoll, wo Technologien mit hohem Wertschöpfungspotenzial entwickelt werden, wie beispielsweise bei der Nanoelektronik. Das staatliche Engagement muss sich lohnen: Die zu erwartenden zusätzlichen Beiträge zum Bruttoinlandsprodukt als Folge der Entwicklung innovativer Technologien müssen die staatlichen Investitionen für die Förderung dieser Technologien deutlich übersteigen.

Beispiele für Fördermaßnahmen, bei denen als Folge der Erforschung neuer Technologien für die Elektronik Produktionsstandorte entstanden, sind die 300mm-Chipfertigung in Dresden, die Fabrik der Carl Zeiss Semiconductor-Manufacturing Technologies AG Oberkochen oder die Waferfabrik von Wacker in Freiberg.

Allein aus den Aktivitäten in der Region Dresden sind etwa 16.000 Arbeitsplätze mit hoher Innovationsbreitenwirkung für die gesamte deutsche Wirtschaft hervorgegangen. In die Forschung zur 300mm-Technologie wurden beispielsweise 143 Mio. € investiert.

Standorte der Elektronik-Industrie in Deutschland (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

In BMBF-geförderten Projekten haben 44 Partner aus Industrie und staatlichen Forschungseinrichtungen, darunter 21 mittelständische Unternehmen, den 300mm-Standard entwickelt und sich damit an die Spitze einer weltweiten technologischen Innovation gesetzt.

Die volkswirtschaftliche Wirkung der Förderung der 300mm-Technologie wurde vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW, 2002) untersucht. Nach dessen Modellrechnung übersteigen bereits heute die staatlichen Einnahmen die staatlichen Fördermittel um 60%. Bei Berücksichtigung der Rückflüsse in die sozialen Sicherungssysteme sieht diese Erfolgsbilanz sogar noch erheblich besser aus. Die Investitionen haben sich also sowohl für die Wirtschaft als auch für die Gesellschaft gerechnet.

Mit dem neuen Maskentechnologiezentrum in Dresden wird eine weitere Ausbaustufe für den Elektronikstandort Deutschland erreicht und das erste europäische High-End Forschungs- und Produktionszentrum dieser Art aufgebaut. Ein Grund für die Entscheidung amerikanischer Investoren, nach Deutschland zu kommen, sind auch die attraktiven Rahmenbedingungen für Forschung in Deutschland.

Das BMBF wird die Erforschung der Maskentechnologie und der Lithographie bundesweit weiter fördern. Es werden 20 Unternehmen, darunter 7 klein- und mittelständische Unternehmen sowie 13 Forschungsinstitute, gemeinsam die zukünftigen Herstell-Technologien für nanoelektronische Bauelemente untersuchen. Von der Förderung erwartet das BMBF, dass erneut ein erheblicher Nutzen für den Standort Deutschland entsteht.

Nanoelektronik - ein Füllhorn schöner Möglichkeiten

Die Produkte einer fortgeschrittenen Zivilisation sind für weniger avancierte Gesellschaften nicht von Zauberei zu unterscheiden.

Arthur C. Clarke

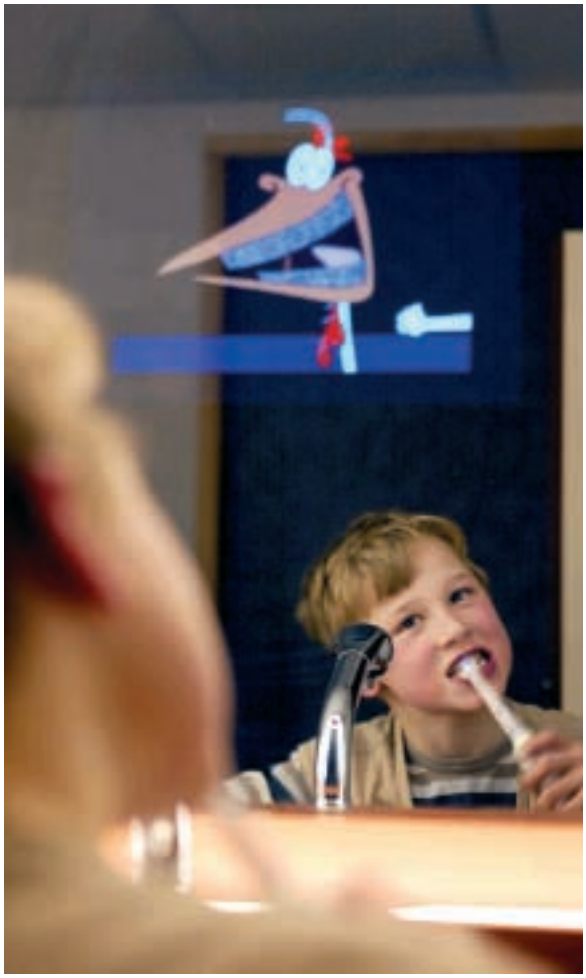
Es gibt im Deutschen Museum in München einen Standort, von dem aus sowohl das Landegestell eines Airbus als auch die eigentümliche Konstruktion, mit der sich Otto Lilienthal im Gleitflug von einem Lichterfelder Kunsthügel stürzte, zu sehen sind. Das eine ist ein trotz seiner Größe filigran wirkendes Konglomerat von Metall-Legierungen und Kunststoffen, elektrischen und hydraulischen Leitungen und Stellgliedern, Elektromotoren, Sensoren und Signalleuchten, das andere ein mit imprägniertem Hemdstoff bespanntes Lattengerüst. Zwischen den beiden Ausstellungsstücken liegen keine hundert Jahre.

War die Entwicklung der Luftfahrt schon rasant, die Entwicklung der Mikroelektronik sollte sie noch in den Schatten stellen, denn in ihr steckt eine „positive Rückkopplung“: Mit Computern kann man Schaltungen für bessere Computer entwerfen. In der Folge beginnt der Fortschritt auf diesem Gebiet einem Rennen mit der Roten Königin in „Alice im Spiegelland“ zu ähneln, bei dem eine gleichbleibende Geschwindigkeit Stillstand bedeutet. Derzeit befindet sich die Mikroelektronik im Übergang zur Nanoelektronik, der einen technologischen Phasensprung ähnlich dem darstellt, der von Lilienthals Hemdstoffflügel zum Airbus geführt hat. Unter den vielen Ungewissheiten dieser Transformation steckt eine Gewissheit: Der Übergang darf von einer Industrienation nicht verschlafen werden.

AMD hält mit seiner Produktion an Mikroprozessoren derzeit einen Anteil von ca. 20 Prozent am Weltmarkt. Mittlerweile werden alle Prozessoren ausschließlich in Dresden gefertigt. Dieser von AMD erkannte Standortvorteil in Dresden kann auch auf die bisherige Forschungsförderung des BMBF zurückgeführt werden.

Nanoelektronik im Alltag - eine Vision

Wenn Leona Lenssen (fiktiv, aber nicht weit in der Zukunft) endlich ihre MediCare-Collection in der Münchener Maximilianstraße abgegeben hat, wird ihr Nanoelektronik in einem Maße zur Hand gegangen sein, das sie womöglich irritiert hätte - wäre ihr das Ganze



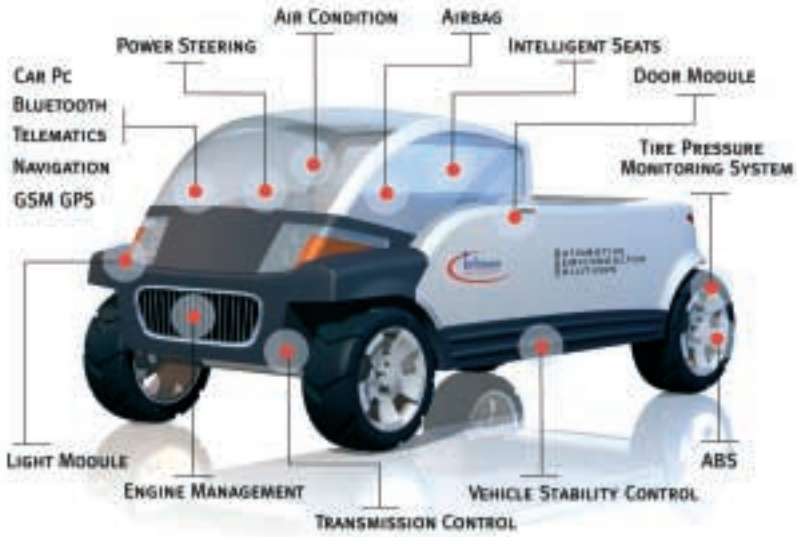
bewusst geworden. So aber hat sie wie üblich die Presseschau auf ihrem Badezimmerspiegel überflogen und mit ihm geredet - „Du denkst an deinen Münchener Termin?“, „Red’ nicht lang, bestell mir ’n Taxi.“ -; sie hat sich von ihrer Sonnenbrille mit Head-up-Display durch das Gewusel am Dresdener Flughafen leiten lassen und mit

Bildtelefon im Taschenformat: Designstudie eines UMTS-Mobiltelefons

Neben schon bekannten Sicherheitssystemen wie Airbag, ABS und ESP wird die Nanoelektronik Systeme zur Unfallvermeidung möglich machen. Das Fahrzeug wird uneinsehbare Verkehrshindernisse z.B. in Kurven oder bei Nacht erkennen und reagieren, bevor der Fahrer das tun kann. Die Robert Bosch GmbH ist weltweit zweitgrößter Anbieter von Kraftfahrzeugtechnik. Zum Kerngeschäft in diesem Bereich gehören elektronische Systeme für aktive und passive Sicherheit. Die Infineon Technologies AG ist die Nr.1 in Europa und weltweit die Nr. 2 bei der Automobilelektronik.

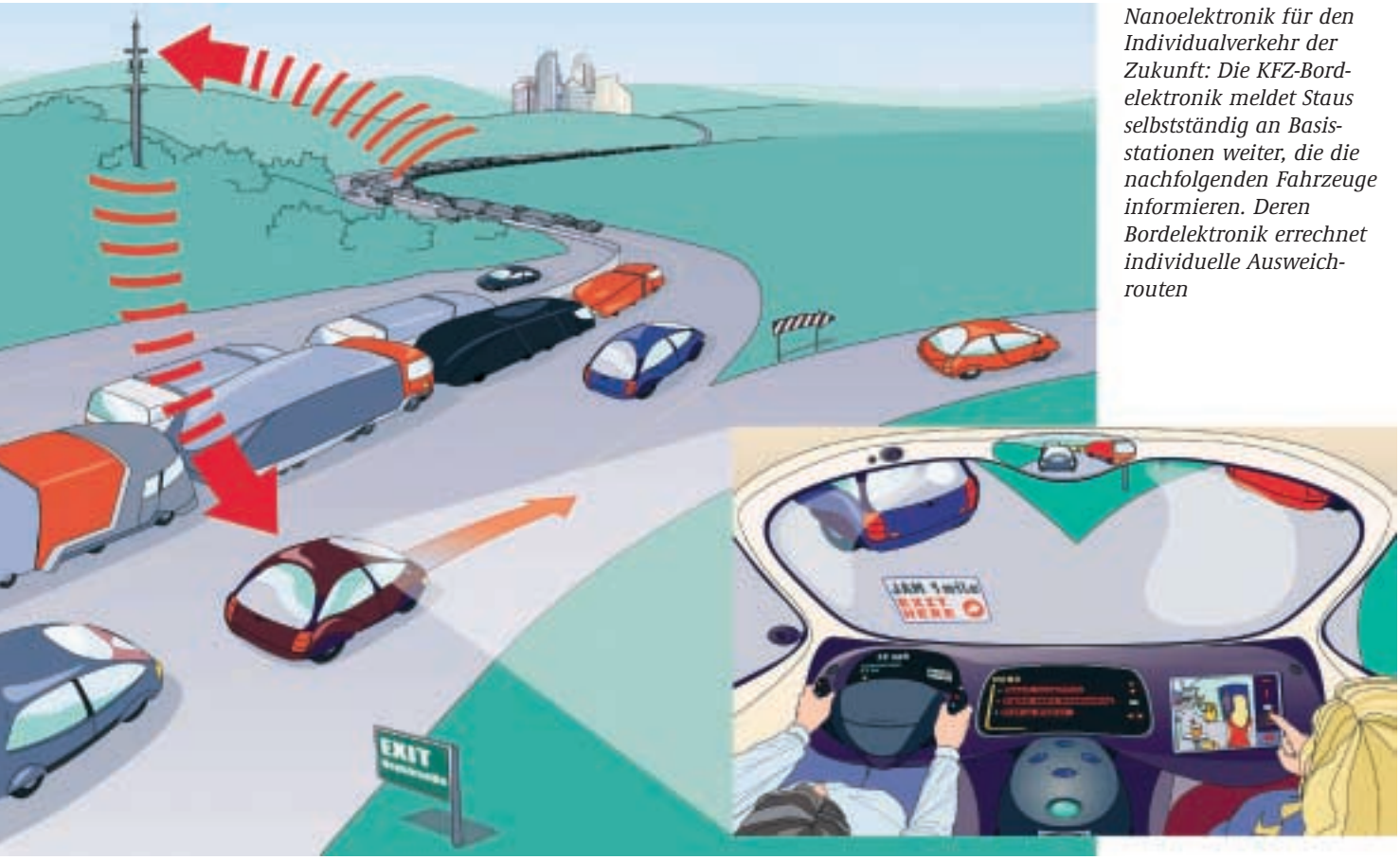
Intelligente Umgebung – der mit Nanoelektronik smart gemachte Spiegel erteilt Zahnputz-Unterricht

ihrem Handy ein Touristen-Pickup bestellt; sie hat in einem Flugzeug gesessen, das Defekte in seiner Aluminiumhaut elektronisch wahrgenommen und gemeldet hätte und ansonsten Nanoelektronik noch im letzten Winkel transportierte und und und.



Der Pickup hatte Siliziumintelligenz in genügender Menge an Bord, um sich vollautomatisch in eine Schlange Richtung Münchener Innenstadt einzufädeln und Leona in der City privilegierte Touristenrouten entlang zu führen, die freilich Geld kosten, das sich das Fahrzeug aber automatisch von Leonas elektronischem Reiseticket holte ...

Nanoelektronik



Nanoelektronik für den Individualverkehr der Zukunft: Die KFZ-Bordelektronik meldet Staus selbstständig an Basisstationen weiter, die die nachfolgenden Fahrzeuge informieren. Deren Bordelektronik errechnet individuelle Ausweichrouten

Lange wird man nicht mehr auf Leonas Münchener Reise warten müssen, mit der kommenden Nanoelektronik sind bezahlbare Techniken von bestechender Eleganz möglich. Bald wird vielleicht ein neuartiger PDA (Personal Digital Assistent) mit der Fläche einer Kreditkarte erscheinen (nicht, dass es nicht kleiner ginge, aber Menschenhände brauchen etwas Handhabbares).

Das Gerät könnte schwarz, ohne von außen erkennbare Strukturen sein, die Schwärze sammelt Sonnenlicht und wandelt es in Strom um; es wäre kratzfest mit einer hauchdünnen Diamantschicht überzogen, hätte darunter eine dünne Piezokeramikschicht, die Schall in Spannung wandelt und umgekehrt, so dass eine sprachliche Verständigung möglich ist. Natürlich würde es auch den Datentransfer über Licht und Funk beherrschen.

Heutige elektronische Sicherheitssysteme wie ABS oder ESP greifen bei kritischen Fahrsituationen ein, künftige Systeme weichen Gefahren automatisch aus

Der PDA könnte mit einem flachen Objektiv und einem höchstauflösenden Bildwandlerchip auch sehen, würde auf Wunsch als Display aufleuchten und wäre so Kamera, Video- und Tonrekorder, TV, Handy und, via GPS, Orientierungshilfe in einem, würde auf eine Bitte hin in einem netten Mont-Martre-Café die Speisekarte lesen, übersetzen, erläutern und den Menüwunsch in freundlichem Französisch weitergeben und die Rechnung bezahlen. Dass es nebenher die Enzyklopädien Britannica, Larousse und Brockhaus enthält, ist kaum mehr der Rede wert. Wenn Leona damit etwas schreiben will, wird ihr ein Laser eine Tastatur auf den Cafétisch projizieren.

Virtuelle Tastatur:
Die Berührung eines projizierten Tastaturelementes wird vom System erkannt und als Tastendruck gewertet

Wenn sich Leona krank fühlt, wird sie eines der anspruchsvollsten nanoelektronischen Gebilde in Anspruch nehmen, das Lab-on-a-Chip. Auf einem solchen Chip-Labor werden sich Nanoelektronik, Nanotechnologie, Biotechnologie und Mikrosystemtechnik versammeln, um einen großen Teil des technischen Inventars eines heutigen molekularbiologischen Instituts im Format einer Briefmarke nachzubilden. Ein virtueller Landeanflug auf ein solches Lab-on-a-Chip würde vielleicht aussehen wie der auf eine akkurat geplante Metropole, mit zahllosen Kanälen, winzigen Pumpwerken, Kränen, Greifern, Sensoren, Lichtspendern und –empfängern, Informationssträngen, Datenverarbeitungsanlagen, Bibliotheken, Vorratsbehältern etc., zusammen nur so groß wie ein Daumennagel, ein *Doktor Pille* wie in der Science Fiction, der mit dem nanoelektronisch verwalteten Wissen der Welt etwa ein winziges Tröpfchen Blut analysiert und dann ein ganz persönliches Medikament anfordert.

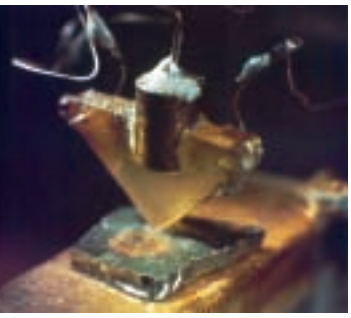
Wenn Leona eine ernsthafte Erkrankung hätte, würde sie sich aus ihrer MediCare-Collection bedienen können; die – durchaus elegante - FirstAid-Jacke ist sehr dezent mit unsichtbarer Nanoelektronik bestückt, überwacht mit allerlei Sensoren den aktuellen Gesundheitszustand ihrer Trägerin und würde bei bedenklichen Werten drahtlos den nächsten medizinischen Dienst benachrichtigen. Der wüsste auch, wo sie zu finden ist, ein eingenähtes GPS-Modul weiß stets über ihren Standort Bescheid.

Alles das wurde oder wird möglich durch die beispiellose Erfolgsstory der Siliziumelektronik - die sehr bescheiden angefangen hat.

Intelligente Kleidung: Integrierte Elektronik macht mit MP3 Musik, führt durch die Stadt und überwacht den Puls - auf der Haut erlebbarer Mehrwert

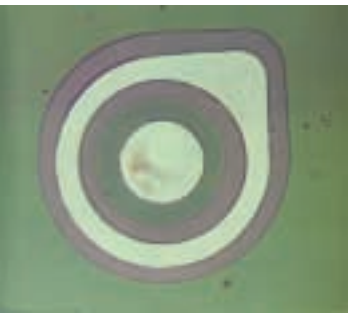
Wie die IntegrierteSchaltung in die Welt kam

Der erste Punktkontakt-Transistor, 1947

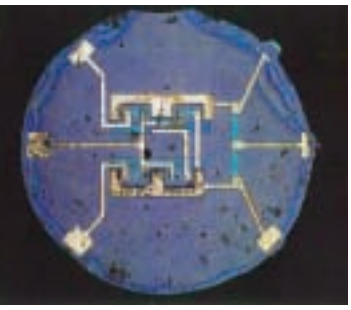


Die erste Integrierte Schaltung, 1958

Der erste mit einem Planarprozess gefertigte Transistor, 1959



Die erste mit dem Planarprozess gefertigte Integrierte Schaltung, 1961

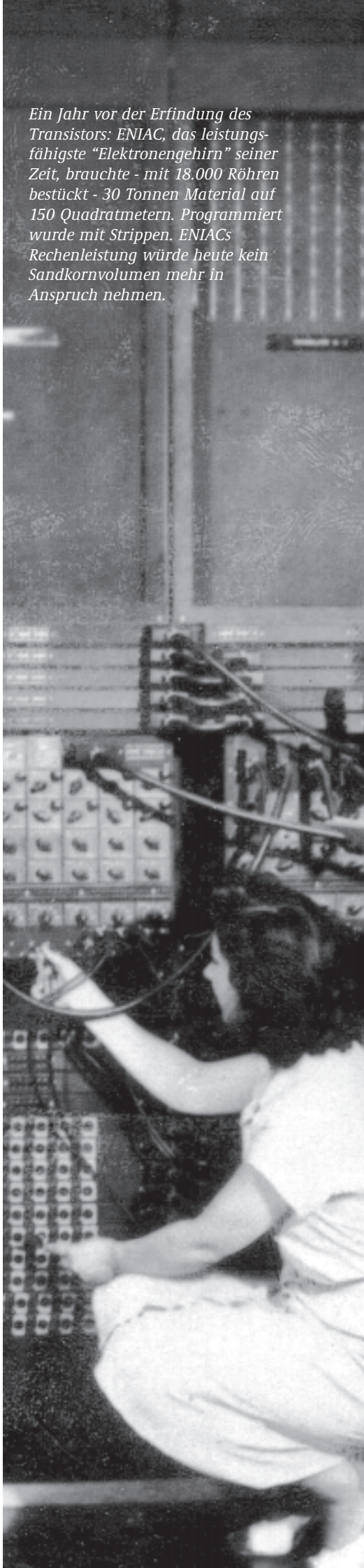


Mitte Dezember 1947, der Weihnachtsrummel war im vollen Gange, gingen bei den Bell-Telephone-Laboratories, 463 West Street, New York City, unscheinbar anmutende Experimente einem Höhepunkt entgegen; Experimente, die denen, die sie machten - William Shockley, John Bardeen und Walter Brattain - neun Jahre später den Nobelpreis für Physik einbringen und die Welt der Technik auf den Kopf stellen sollten. Da wurden Halbleiterkristalle, die Strom besser als Porzellan und schlechter als Kupfer leiten, und Metalle zusammengebracht, mit ätzenden Flüssigkeiten begossen, beleuchtet, abgekühlt; Spannungen gemessen, Ströme protokolliert; Theorien gewälzt.

Eine Woche vor Heiligabend kündigte sich der Durchbruch an: Man brachte einen Tropfen Wasser auf einen Metallkontakt auf einem Siliziumplättchen - Silizium, wie es sich in ordinärem Quarzsand findet - und legte eine elektrische Spannung hier an, maß den Strom dort, und sah: Das Gebilde war ein Verstärker. Wenn von hier nach da ein Strom floss, floss von dort nach da ein noch größerer, und wenn man den ersten Stromfluss verdoppelte, verdoppelte der zweite sich auch, und alles das schnell genug, um Musik zu verstärken.

Ein nasser Verstärker aber war nicht eben das, was die Wissenschaftler haben wollten; sie wollten einen reinen Festkörpereffekt, und am 23. Dezember schließlich war es so weit: Walter Brattain beklebte ein Plastikdreieck mit einer dünnen Goldfolie, machte mit einer Rasierklinge einen Schlitz quer über die Dreiecksspitze und presste die geschlitzte Spitze mittels einer verbogenen Büroklammer auf einen Germaniumblock. Der „trockene“ Transistor war erfunden.

Das Ergebnis schien der Arbeitsgruppe so bemerkenswert, dass sie das Militär zu Rate zog, ob das nicht geheim zu halten sei. Das Militär



Ein Jahr vor der Erfindung des Transistors: ENIAC, das leistungsfähigste “Elektronengehirn” seiner Zeit, brauchte - mit 18.000 Röhren bestückt - 30 Tonnen Material auf 150 Quadratmetern. Programmiert wurde mit Strippen. ENIACs Rechenleistung würde heute kein Sandkornvolumen mehr in Anspruch nehmen.

verneinte nach einem kurzen Blick auf die Erfindung und die Bell Laboratories stellten den Transistor am 30. Juni 1948 der Öffentlichkeit vor.

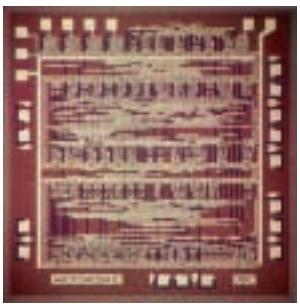
Die Massenfertigung von Bauelementen aus Silizium begann um 1960 herum, als es gelungen war, Silizium hochrein zu präparieren. Das Element wurde schnell zum Material der Wahl, weil es, zum einen - als Siliziumdioxid, SiO_2, in gewöhnlichem Quarzsand steckend - sehr viel häufiger und damit billiger als Germanium ist. Zum anderen bildet Silizium an seiner Oberfläche einen sehr stabilen, fest haftenden, bestens isolierenden Oxidfilm aus, wenn es bei Sauerstoffpräsenz hoch erhitzt wird. Der Film lässt sich fotolithographisch zu einer filigranen Maske ätzen, durch deren Aussparungen Fremdatome so in das Silizium einwandern, dass kleine Transistoren und andere elektronische Komponenten im Silizium entstehen. Silizium machte mithin „Integrierte Schaltungen“ möglich, in der viele Transistoren, Dioden, Widerstände etc. auf einem Siliziumkristallstück, Chip, arrangiert und sinnvoll miteinander verbunden sind.

Integrierte Schaltungen wurden unabhängig voneinander von Jack St. Clair Kilby bei Texas Instruments, 1958, und Jean Hoerni und Robert N. Noyce bei Fairchild Semiconductor, 1959, realisiert. Jetzt kam das Rennen voll in Gang. 1971 erschien der erste Mikroprozessor; die Belichtungsmaske für das aus heutiger Sicht nur mäßig komplexe Rechenelement war noch vorwiegend Handarbeit. Die Strukturen heutiger Prozessorchips dagegen können von Menschen nicht mehr direkt nachvollzogen werden; der menschliche Beitrag beschränkt sich im Wesentlichen auf strukturelle Überlegungen zur Architektur und das Ausdenken von Verfahren, mit denen Computer die Schwierigkeiten beim Entwurf der nächsten Computergeneration bewältigen können.

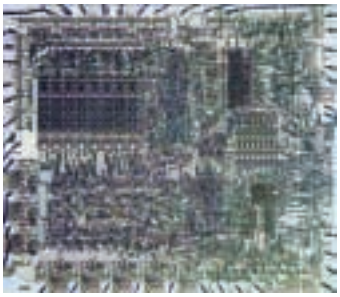
Heute kommen auf jeden Menschen mehr als 100 Millionen Transistoren, die Zahl wird sich nach den üblichen Regeln der Branche in fünf Jahren verzehnfacht haben. Mehr als 100 Millionen Transistoren sind es mittlerweile auch, die modernen Prozessoren wie AMDs Opteron zu Höchstleistungen verhelfen – die Milliarde wird 2007 erwartet.

Das stürmische Wachstum ist nicht regellos, es folgt einem Gesetz: Moore‘s Law.

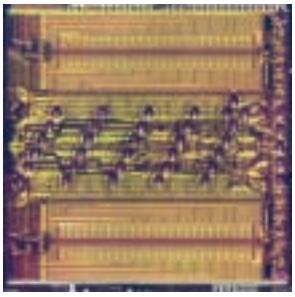
Das erste mit Computer Aided Design hergestellte IC, 1967



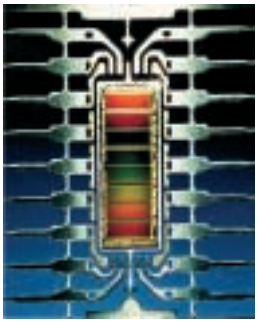
Der erste Mikroprozessor, 4004, 1971



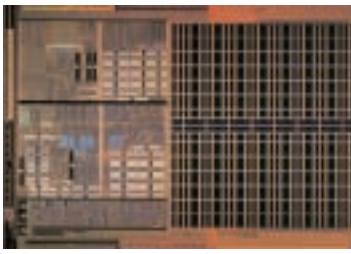
Das erste 64K Dynamic RAM, 1977



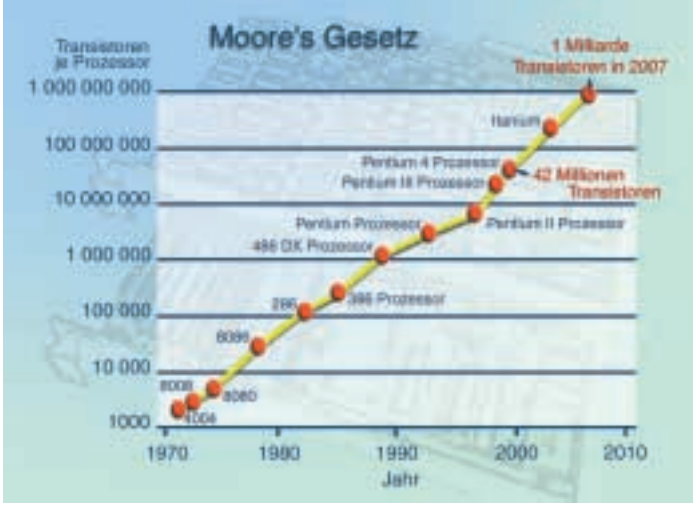
1 Mbit Memory Chip, 1988



64bit-Prozessor für PC-Anwendungen mit 106 Mio. Transistoren in 130 nm-Technologie



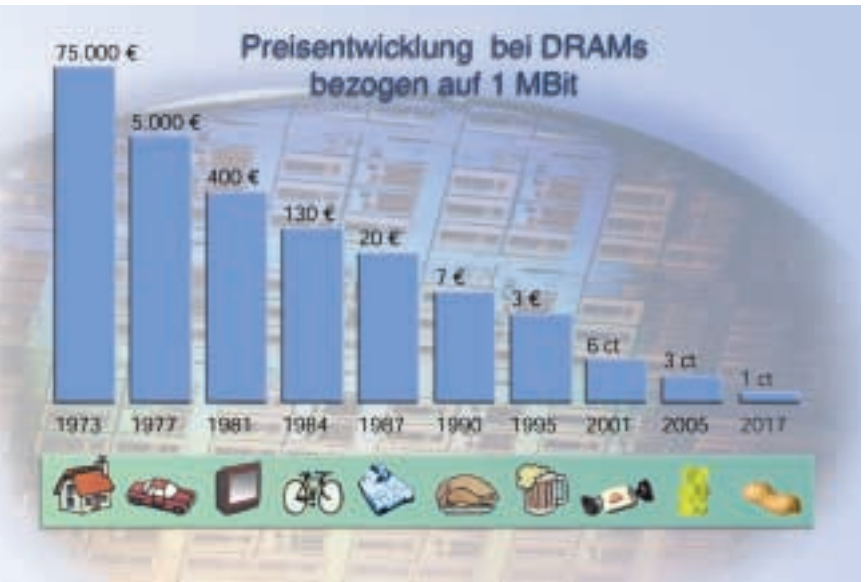
Moore's Law



Moore's Gesetz: Ungefähr alle 18 Monate verdoppelt sich die Zahl der Transistoren pro Chip

Schon 1965 fand Gordon Moore, späterer Mitbegründer der Firma INTEL, beim Studium von Fertigungsdaten einen Zusammenhang, der ihm bleibenden Ruhm und der Chipindustrie etwas Planungssicherheit verschaffen sollte: Moore's Law, nach dem sich die Kapazität von Mikrochips etwa alle 18 Monate verdoppelt, während sich zugleich die Fertigungskosten halbieren. Dieses „Gesetz" dient der Chipindustrie seither als Leitstern, an dem sich die in der International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS, niedergelegten detaillierten Planungen für den mikro- bzw. nanoelektronischen Fortschritt orientieren. Moore's Law ließ sich lange durchhalten, weil die Chipstrukturen durch immer neue Produktionsraffinessen stetig schrumpfen konnten; dem Trend sind allerdings Grenzen gesetzt, die sich unter anderem in exponentiell steigenden Kosten für die Lithographie-Masken niederschlagen, den Schlüsselkomponenten für die lichttechnische Strukturierung der Computerchips.

Dem von Moore's Law beschriebenen exponentiellen Wachstum, das aus einem Transistor erst 1000, dann hunderte Millionen gemacht hat, liegt nicht der Spieltrieb von Technokraten zugrunde, es folgt vielmehr inneren, vor allem wirtschaftlichen Zwängen, die aber etwas Positives hervorbringen: Es gibt immer mehr elektronische Intelligenz für immer weniger Geld.



Auf dieses erschwingliche Mehr an elektronischer Intelligenz warten unter anderem zahllose Anwendungen, die mit dem Sensorium des Menschen allein nicht bedient werden könnten, wie intelligente Flugzeugsteuerungen, die ökonomisch vorteilhafte, aerodynamisch aber unstabile Flugzeugkonstruktionen sicher in der Luft halten. Auf dem automobilen Sektor wird die Elektronik mehr und mehr sicherheitsrelevante Steuerungsfunktionen übernehmen, etwa in einer Pre-Crash-Sensorik oder der Rundum-Erfassung des Verkehrsgeschehens.

Die Wissenschaft wird das stete Mehr an Elektronik ohne Mühe absorbieren, das Verständnis komplexer Phänomene wie etwa des Klimageschehens braucht ständig steigende Rechenleistung. Moore's Law ist für die Steuerung der turbulenten Zukunft das richtige Gesetz zur rechten Zeit.

Moore's Law im Märchen:

Also hier musst Du jedenfalls so schnell laufen, wie du kannst, um am selben Ort zu bleiben. Wenn du woanders hinwillst, musst du mindestens zweimal so schnell sein.

Lewis Carrol, Alice im Spiegelland

Analoge Wunder

Informationsverarbeitung ist kein Wert an sich, sie muss sich in Aktionen in der realen Welt niederschlagen, die vom Menschen gewünscht werden. Die reale Welt aber stellt sich großenteils analog dar, mit fließenden Werten von Kräften, Schall, Licht etc. Um diese Größen berechenbar zu machen, sind Analog-/Digitalwandler nötig, so setzt auch die Digitalkamera das Bild in Zahlen um. Digital-/Analogwandler lassen die Zahlen wieder als Bild erscheinen.

Mit dem Digital/Analog-Wandler wäre es in der Mini-Anlage nicht getan, die Lautsprecher brauchen einige Ampère Strom, der von einem analogen Verstärker geliefert wird. Auf dem Sektor der analogen Schaltungstechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten ebenfalls eine – wenn auch weniger stürmische - Revolution ereignet, die unter anderem feinste klassische Klänge für jedermann erschwinglich gemacht hat, in der Regel aber noch ausgeprägter im Verborgenen arbeitet als die digitale Technik. Meist wird diese Technik nur als Komfort erfahren; wenn etwa der ICE ruckfrei beschleunigt, sind Leistungshalbleiter im Spiel, die die Mikrowatt der Computersignale weitaus effizienter als elektromechanische Schalter und Relais in Megawatt-Aktionen umsetzen.

Ob digital oder analog - Silizium, der Treibstoff der Hochtechnologie, hat für beide Welten hervorragende Eigenschaften.

Leistungselektronik ermöglicht das komfortable, ruckfreie und schnelle Beschleunigen im ICE-Bahnzeitalter

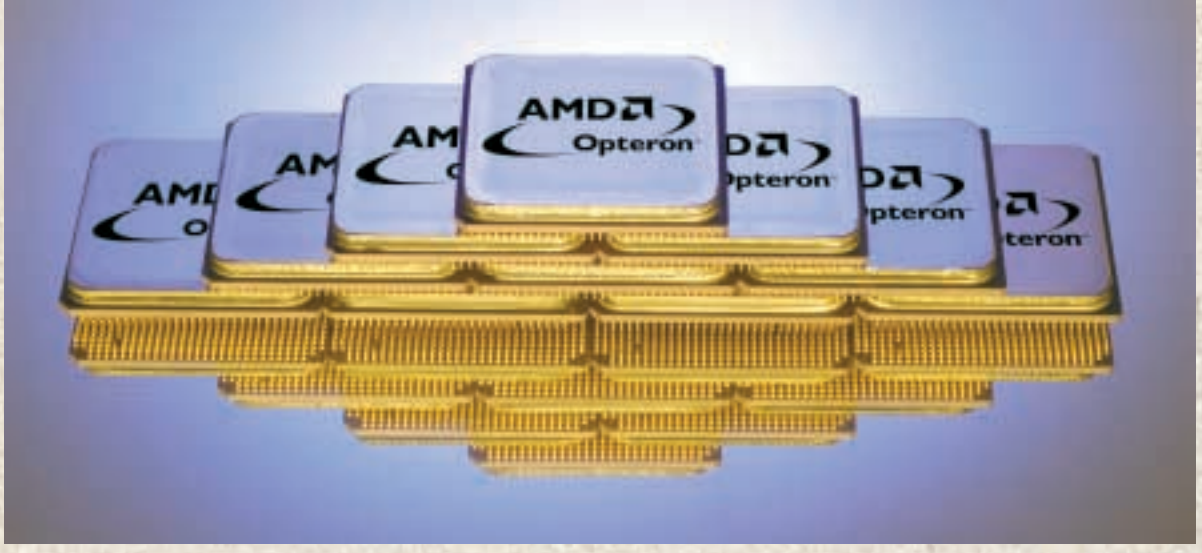
Silizium - Treibstoff der Hochtechnologie

Der Stoff, dem die moderne Welt so viel verdankt, scheint auf den ersten Blick nicht von Adel und wird wieder und wieder mit Füßen getreten, denn Silizium ist – nach Sauerstoff - das zweithäufigste Element der Erdkruste.

Es ist nicht einfach, diesem Element auszuweichen, es steckt als mineralische Verbindung in den meisten Böden, im Beton, im Fensterglas, und schön ist es von Natur aus eigentlich nur im Opal und verschiedenen Halbedelsteinen wie Mondstein und Tigerauge.

Silizium tritt in der natürlichen Welt nicht isoliert auf sondern nur im Verbund mit Sauerstoff – dann als Quarz in verschiedenen Varianten - oder mit Sauerstoff und anderen Elementen wie Natrium, Magnesium, Aluminium etc., als Silikat.

Die hübschesten Formen hat Silizium in der Gestalt von Panzern aus Kieselsäure für Diatomeen und Radiolarien realisiert. Diese Millimeter kleinen Einzeller bevölkern die Meere in so riesigen Mengen, dass die absinkenden Gehäuse regelrechte Berge bilden können. Sie haben in der Form ihrer DNA einige Gigabyte ROM an Bord; eine Information, die die Vorschrift für den Bau ihrer Panzer und der eigentlichen Zelle mit ihren Organellen enthält, wozu die von Licht gespeisten winzigen Apparate gehören, die die Nahrung synthetisieren. Diatomeen und Radiolarien sind das erste Glied in der Nahrungskette des Meereslebens.



Erster 64bit-Prozessor für Server und Workstations, der kompatibel zur x86-Technologie ist und auch 32bit-Applikationen unterstützt

Reines elementares Silizium ist hart und spröde, von grauer Farbe mit einem metallischen Glanz, seine Atome sind in einem Gitter ähnlich dem des Diamanten aufgereiht. Die beispiellose technische Karriere des Siliziums begann 1954, als Texas Instruments den ersten Transistor auf Siliziumbasis ankündigte. Bis dahin war Germanium das Transistormaterial der Wahl gewesen, Silizium aber konnte bei wesentlich höheren Temperaturen arbeiten, also auch größere elektrische Ströme vertragen.

Feldeffekt-Transistoren kamen auf, die – wie die gute alte Vakuumröhre – eine Stromfluss-Steuerung mit elektrischen Spannungen ermöglichen, ohne dass hierfür nennenswerte Leistungen nötig wären. Die Steuerungselektrode war vom eigentlichen Stromkanal durch eine isolierende Schicht aus Siliziumdioxid getrennt – ein weiteres Plus des Elementes, sein Oxid ist ein hervorragender Isolator. Dieses Plus machte Silizium auch zum besten Material für Integrierte Schaltungen. Die ersten Generationen nutzten nicht den Feldeffekt und hatten einen hohen Energieverbrauch.

Dann kam die elektronische Armbanduhr und mit ihr die Notwendigkeit, Schaltkreise mit geringerem Stromverbrauch zu entwickeln. Der erfolgreiche Prozess hieß CMOS und verwandte zwei unterschiedliche Typen von Silizium-Feldeffekttransistoren. Die Technik hatte zu Beginn Nachteile, entwickelte sich aber zu *dem* Prozess für hochintegrierte Schaltungen schlechthin, mit dem heute viele Millionen Transistoren und andere Elemente auf einem Quadratzentimeter Silizium untergebracht werden können.

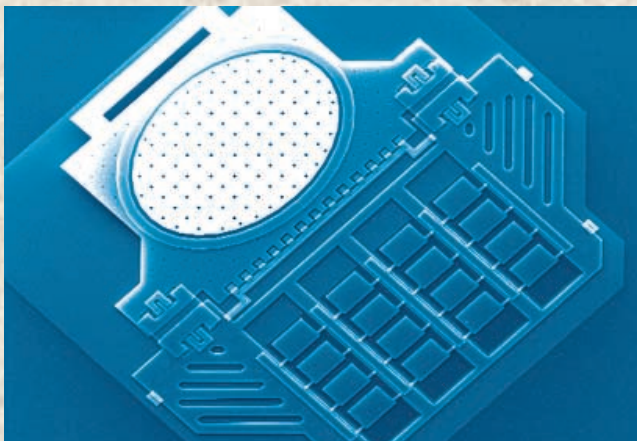
Aus Silizium werden heute Einkristalle – Kristalle durchgehend gleicher innerer Struktur und Qualität – von über 200 Liter Volumen gezogen und in dünne Scheiben (Wafer) von 30 Zentimeter Durchmesser zersägt, auf denen schließlich die Computerchips – Prozessoren, Speicher - entstehen. Eine optimierte Fabrik verarbeitet heute 350.000 Wafer pro Jahr, die jeweils bis zu 500 Chips ergeben.

Silizium ist überdies nicht nur für Computer gut. Weil das Material so eingehend erforscht wurde, hat es auch in der Mikromechanik Karriere gemacht. So lassen sich mit Techniken ähnlich denen, die für die Chipherstellung entwickelt wurden, mechanisch aktive oder aktivierbare Schwingbalken, Schwinggabeln, lenkbare Nadelfelder, Leitkanäle für Flüssigkeiten mitsamt elektrostatisch angetriebenen Pumpen realisieren, etwa für das *Lab-on-a-Chip*. Am weitesten sind Licht lenkende Siliziumspiegel-Arrays gediehen, die bereits in digitalen Video-Projektoren im Einsatz sind.

Nanoelektronik hat Folgen. Zu ihrer komplexen Struktur verhilft ihr ausgerechnet ein Verfahren, das einmal als Wäscheliste angefangen hat.

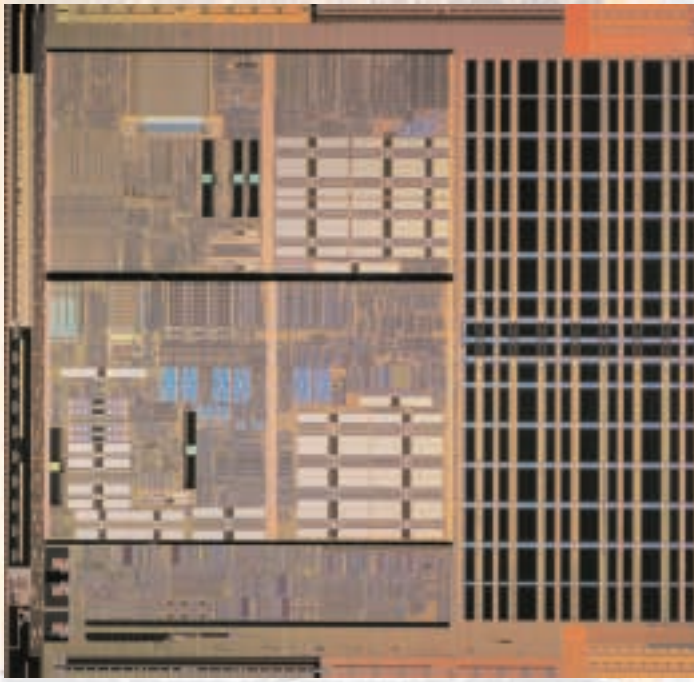
Spiegel-Chip: Nicht nur elektronische Chips werden aus Silizium hergestellt, zunehmend auch mikromechanische Bauteile wie diese verstellbaren Spiegel für Fasereroptik-Ansteuerungen

Spitzentechnologie: Die perfekten Silizium-Einkristalle (Mitte, Hintergrund) werden in dünne Scheiben, Wafer, zersägt (links), aus denen schließlich die Chips entstehen



Lithographie - vom Fettstift zum Laser

Alois Senefelder, Künstler und Erfinder



Lithographie mit Nanometern: Innenleben eines 64bit-Mikroprozessors mit Strukturgrößen bis hinunter zu 130 nm

Schreiben in Stein

Johann Nepomuk Franz Alois Senefelder (1771-1834) war der mittellose Sohn eines Schauspielers – doch das vorweg, die Geschichte endet versöhnlich, mit einer ordentlichen Pension des bayerischen Königs. Senefelder hatte Ambitionen, was das Verfertigen von Kunst angeht, fand aber den Vervielfältigungsprozess, insbesondere das Gravieren in Metall, unbezahlbar und versuchte sich daher im Erfinden von etwas Billigerem. Erfolglos, bis ihm eines Tages eine mit Fettstift geschriebene Wäscheliste auf einen bayerischen Sandstein fiel, was ihn auf die Idee brachte, den Stein mit Säure anzuätzen. Wo die Wäscheliste ihre Spuren hinterlassen hatte, blieb der Stein, vom Fett geschützt, stehen, bildete Muster, die sich selektiv anfärben ließen und so fort – der Lithographieprozess, die „Steinschrift-Technik", war erfunden. 1850 begann die erste mechanisierte Lithographiepresse zu arbeiten.

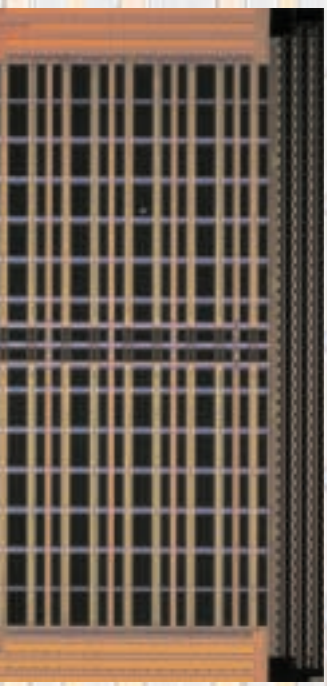
Lithographie einhundertfünfzig Jahre später

Die Lithographie Alois Senefelders bereicherte nicht nur die schönen Künste, sondern gab auch der Technik den Namen, die den Fortschritt der Gegenwart prägt, der Strukturierung von Computerchips mit Hilfe von Licht. Dabei überzieht man die hochpolierte Scheibe eines Halbleitermaterials, einen Wafer, mit einem lichtempfindlichen Schutzlack, auf dem das Bild einer Struktur abgebildet wird. Die „Entwicklung" des Schutzlacks gibt die belichteten (oder unbelichteten) Stellen des Wafers frei, die dann durch Struktur erzeugende Prozesse wie Ätzen, Implantation von Fremdatomen und Abscheidung die gewünschten elektrischen Eigenschaften bekommen. Die Wiederholung des Prozesses mit immer neuen Strukturbildern, Masken, lässt schließlich die komplexesten Gebilde entstehen, die Menschen je hervorgebracht haben: Höchstintegrierte Schaltungen, Chips.

Mikrochip im Nadelöhr

Mittlerweile haben die Transistordichten so zugenommen, dass unter eine Bleistiftspitze eine halbe Million und mehr Transistoren zu liegen kämen. Über 100 Millionen Transistoren sind in fortgeschrittenen Prozessoren tätig, und alle müssen miteinander verbunden werden, kreuzungsfrei natürlich, was nur über

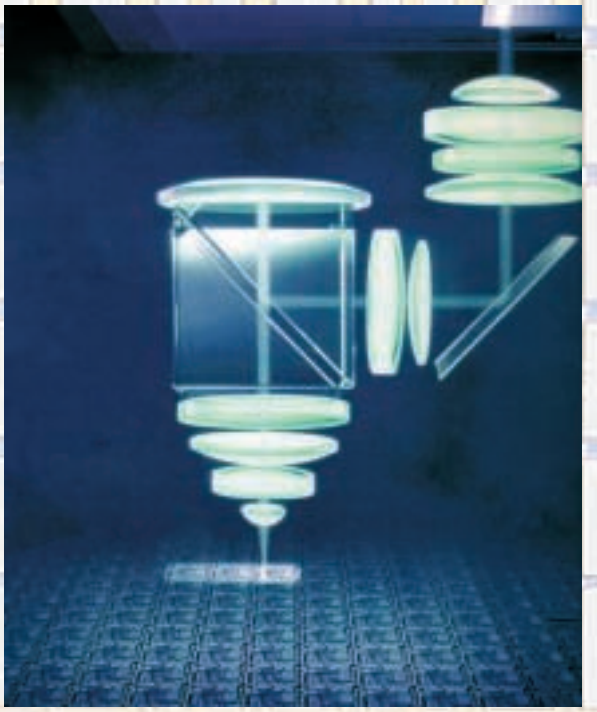
mehrere Leiterbahnebenen geht; auch dürfen Leitungen für ausgehende Signale nicht dicht an solchen für eingehende Signale liegen, sonst würde „kapazitives Übersprechen“, Geisterstimmen wie bei den alten analogen Telefonleitungen, für Verwirrung im Signalfluss sorgen.



Von „Hand“, respektive mit Menschengeist, kann ein Chip-Layout unter diesen Umständen nicht mehr bewerkstelligt werden. Computerchips können nur noch mit - von Menschen geführten - Computern entworfen werden. Verwendet werden dazu unter anderem mathematische Methoden wie sie etwa beim „traveling salesman“-Problem benutzt werden: Wie kann man die Reiseroute für einen Vertreter so optimieren, dass das Verhältnis von Aufwand und Ertrag möglichst hoch ist? Vor zehn Jahren noch war diese Mathematik lediglich eine willkommene Hilfe; jetzt, an der Schwelle zur Nanoelektronik, ist sie unentbehrlich geworden. Während Anfang der Neunziger bei lediglich einer Million Transistoren pro Chip vornehmlich nur die Lage der Chipelemente und deren Verbindung untereinander zu optimieren war, spielt heute bereits die Form eines einzelnen Transistors - früher ein Standardelement - eine Rolle. Der Widerstand der Leitungen beginnt wichtig zu werden, ihre Kapazität gegeneinander und gegenüber dem „Substrat“, dem Chipmaterial. Leiterbahnen werden in Zehntel-Nanometereinheiten getrimmt, damit die Clock-Signale zur gleichen Zeit an den vielen Zwischenspeichern, den „Latches“, eintreffen. Alles das muss für Millionen Verbindungen, berechnet werden - neue Computerchips sind ohne Computer nicht mehr möglich.

Zerodur-Spiegelträger mit geringster Wärmeausdehnung

Calciumfluorid-Optiken



Prinzip einer Waferbelichtung durch ein optisches Linsensystem

Unten links: Prototyp einer EUV-Waferstepper-Anlage für die Produktion zukünftiger Chip-Generationen

Lithographie

Eigentlich ist mit der Maske der alte Wunsch der Magier Wirklichkeit geworden, die Natur durch bloße Zeichen zu beherrschen, richtiger: bloßes *Zeichnen,* Lithographie.

Die Maske

Dem Wunsch nach mehr Computerleistung für weniger Geld wird derzeit mit immer kleineren Chipstrukturen Rechnung getragen, die immer höhere Transistor-Dichten und Taktraten möglich machen. Dadurch ist der Lithographiemaske eine Schlüsselstellung zugekommen, denn die Gesetze der Optik setzen einer steten Verkleinerung Grenzen, die nur mit immer kurzwelligeren Belichtungsquellen und aufwendigeren Masken umgangen werden können.

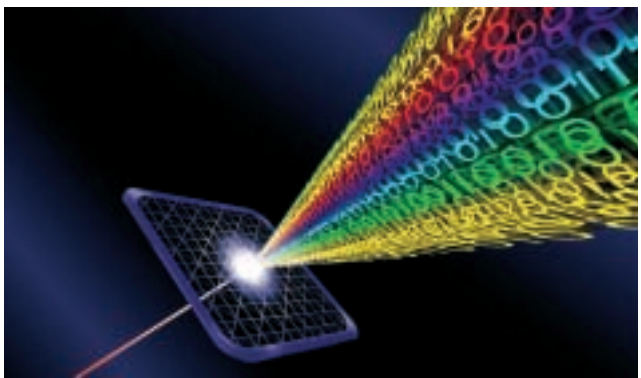
Moderne Chips haben Strukturen, die kleiner sind als die Wellenlänge des Lithographie-Lichtes, so werden Kryptonfluorid-Laser mit einer Wellenlänge von 193 Nanometer benutzt, um Strukturbreiten von 130 und demnächst 90 Nanometer zu realisieren, was mit einer Reihe subtiler optischer Tricks wie „Optical Proximity Correction“ und „Phase Shifting“ möglich ist. Derzeit werden die Grundlagen für die Lithographie mit extremem Ultraviolett gelegt, die EUV-Lithographie, die Lichtwellenlängen von 13 Nanometer benutzt und schließlich Strukturen von nur mehr 35 Nanometer Breite in Silizium bringen soll. Die Anforderungen an das Maskenmaterial sind extrem, so darf sich eine zehn Zentimeter lange Platte bei einer Erwärmung um ein Grad Celsius nur um wenige Zehntel Nanometer ausdehnen, also nur um wenige Atomdurchmesser. Auch die geforderte Ebenheit von wenigen Atomdurchmessern liegt an der Grenze des prinzipiell Machbaren.

Twinscan AT 1200 B
Belichtungsanlage

Die Herstellungsbedingungen für die Nanoelektronik werden also extrem, nicht nur auf der Ebene der Maske. Entsprechend extrem geraten auch die Kosten. Dennoch wird sich das Preis-/Leistungsverhältnis handelsüblicher Computerchips noch lange Zeit im gewohnten Takt verbessern, denn der Herstellungsprozess für Chips ist universell. Mit ein- und denselben Gerätschaften, nur verschiedenen Masken, werden so pro Jahr und Fabrik Milliardenstückzahlen für unterschiedliche Produkte wie z.B. Prozessoren oder Datenspeicher möglich.

Eigentlich ist mit der Maske der alte Wunsch der Magier Wirklichkeit geworden, die Natur durch bloße Zeichen zu beherrschen, richtiger: bloßes *Zeichnen* , Lithographie. Nur hätte kein Magier das Vorstellungsvermögen gehabt, die hinter dem Zeichen stehende technische Infrastruktur auch nur zu erahnen.

Auch ist die Maske nur ein zu Materie gewordener Teil des *Designs* eines Chips, des Plans der Verschaltung seiner funktionellen Einheiten. Hier ist die – von Computern gestützte - Kreativität des Menschen gefragt, das eigentliche Pfund, mit dem sich wuchern lässt. Das anwendungsbezogene Design-Know-how und die Umsetzungsfähigkeit in Maskentechnologie sind für eine Industrienation von strategischer Bedeutung. Dieses Wissen im Lande zu haben und zu halten, ist mithin eine wichtige Aufgabe der Politik.



Lithographieprozess:
Ein Chip ist ein dreidimensionales Gebilde, bei dem sich alle Schaltelemente in einzelnen Ebenen anordnen. Für einen modernen Hochleistungschip werden 25 bis 30 solcher Ebenen benötigt, die jeweils eine eigene Lithographiemaske erfordern. Die Strukturen der Maske werden durch das Licht und das Linsensystem des Wafersteppers, ähnlich einem Diaprojektor, auf dem Wafer abgebildet. Jede neue Maske eines Maskensatzes bringt neue Funktionalitäten auf den Chip und erhöht dessen Komplexität.

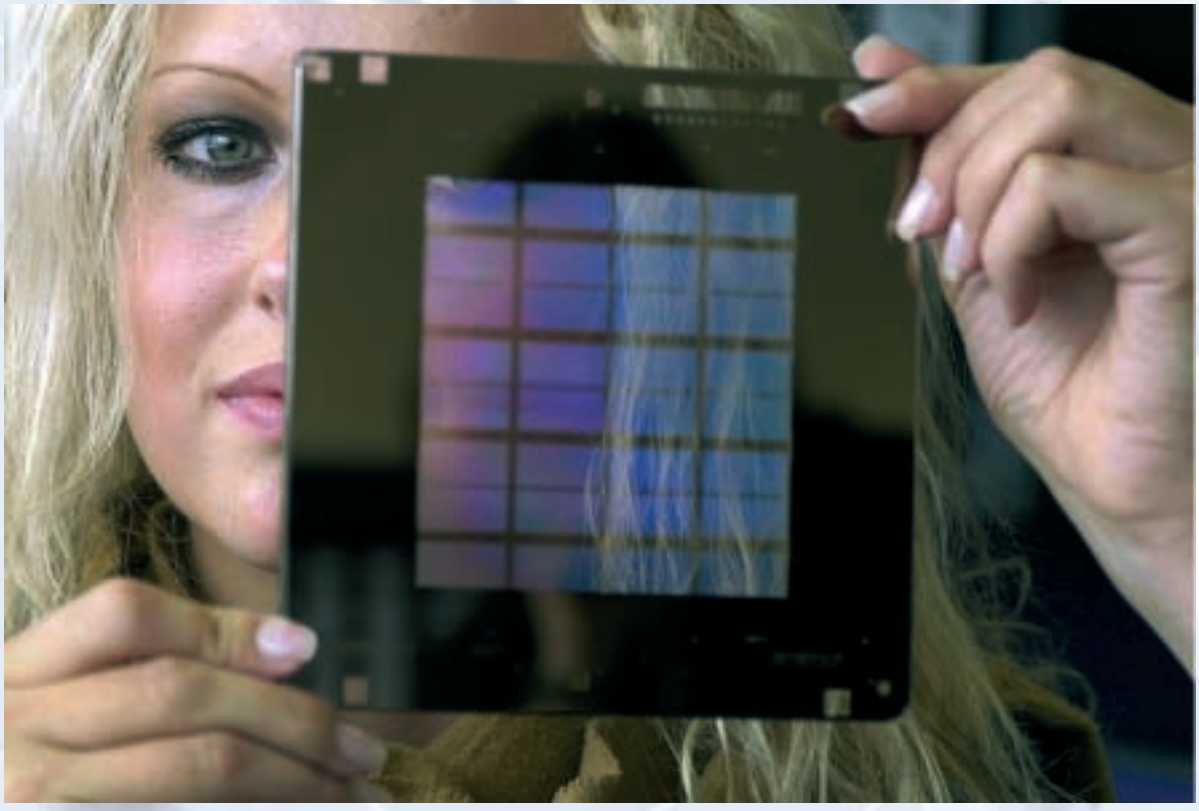
Das Maskentechnologiezentrum - Portrait eines außergewöhnlichen Unternehmens

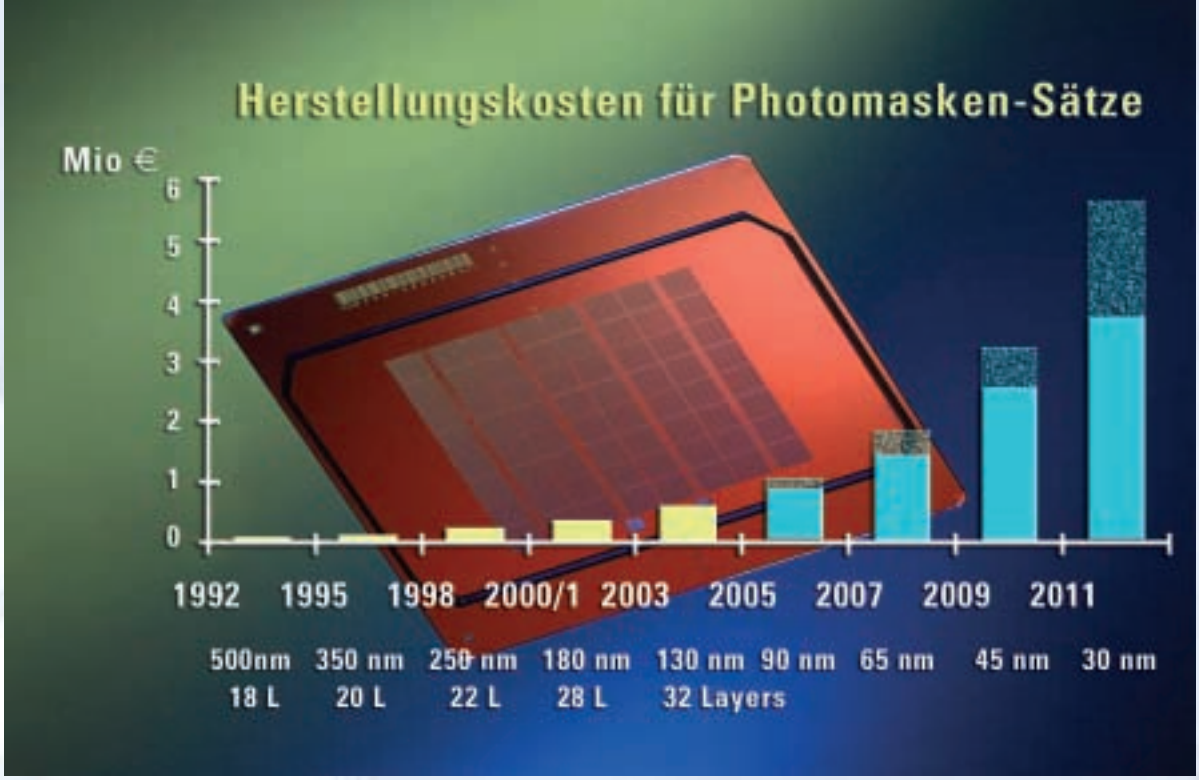
Advanced Mask Technology Center (AMTC) Dresden

Die eigentliche Herausforderung in der Zusammenarbeit zwischen Chiphersteller und Maskenhersteller ist die geschickte Aufarbeitung der auf dem Chip zu erzeugenden Strukturen, damit diese auf eine effiziente Art und Weise in Strukturen auf der Maske umgesetzt und wieder fotolithographisch abgebildet werden können. Je kleiner die Strukturen auf dem Chip sein sollen, desto größer sind die zur Herstellung der Maske benötigten Datenmengen und desto wichtiger werden die physikalischen Prozesse des optischen Abbildungsprozesses. Die heute üblichen Strukturbreiten für High-End-Masken liegen im Bereich von nur 90 nm - ein menschliches Haar hat einen Durchmesser von ca. 50.000 nm. Das bei den Chipherstellern zur Belichtung verwendete Licht ist nicht ohne weiteres in der Lage, so feine Strukturen mit der notwendigen Präzision abzubilden. Quasi unsichtbare Zusatzstrukturen auf der Maske müssen durch den Maskenhersteller berechnet und dann auf der Maske erzeugt werden, um den optischen Abbildungsprozess so zu manipulieren, dass die geforderte Genauigkeit erreicht wird.

Bei jedem weiteren Verkleinerungsschritt werden die Anforderungen an den Maskenherstellungsprozess extremer, selbst Einflüsse in der Änderung des Erdmagnetfeldes, wie sie etwa durch das Öffnen einer Metalltür oder die Nutzung eines Handys in der Nähe des Maskenschreibers entstehen, müssen berücksichtigt werden.

Durchsichtige Photolithographiemaske: Durch hauchdünne nur 90 nm breite Linien aus Chrom auf einer Scheibe aus Spezialglas enthält die Maske alle Informationen für den Chip in konzentrierter Form

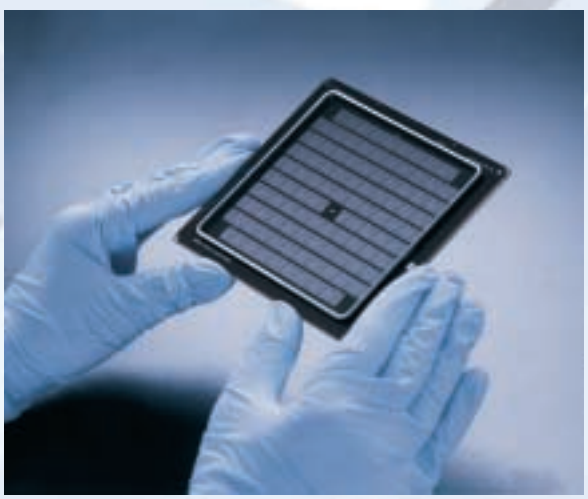




Schon die gegenwärtig gefertigten Chips sind so komplex, dass die Maskenkosten einen erheblichen Teil des Fertigungsaufwandes ausmachen. Fehler haben immer größere Mehrkosten zur Folge. Die Ausbeuten bei der Produktion fehlerfreier Masken sinken. Der Trend wird sich mit der Einführung von Lithographietechniken mit kürzeren Lichtwellenlängen fortsetzen.

Um alle mit der Herstellung von Masken ungelösten Detailfragen zu beantworten, haben sich drei führende Unternehmen der Halbleiterindustrie zusammen getan und eines der anspruchsvollsten Maskentechnologiezentren der Welt geschaffen, das „Advanced Mask Technology Center (AMTC)“ in Dresden. Mütter dieses Joint Ventures sind DuPont Photomask (DPI), Advanced Micro Devices (AMD) und Infineon Technologies. Sie decken die Bereiche Speicherbausteine, Logikbausteine und Volumenproduktion für High-End-Masken ab. Der Gebäudekomplex des Maskentechnologiezentrums liegt in unmittelbarer Nähe zu Infineons und AMDs Fabrikationsstätten, den modernsten der Welt, und verfügt über eine Nutzfläche von 17.500 Quadratmetern.

Auf dieser Nutzfläche befinden sich zum einen die Reinräume des AMTC, in denen die eigentlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Maskentechnologie durchgeführt werden, auf der anderen Seite sind die Reinräume der Firma DPI untergebracht, in denen die Volumenproduktion für die High-End-Masken stattfindet. Durch die enge Verzahnung der Partner ist sichergestellt, dass die aus der Forschungsarbeit entstehenden Resultate schnellstmöglich in die Fertigungspraxis umgesetzt werden können.



Für die kommenden Jahre hat sich das Maskentechnologiezentrum viel vorgenommen. So soll zunächst die Technologie der Masken zur Erzeugung von Strukturen mit Breiten um die 90 nm, später 65 nm erarbeitet werden, bevor man sich auf die zur Zeit aussichtsreichste Technologie für noch kleinere Strukturen konzentriert. Hier wird mit der Nutzung des Lichtes im extrem ultravioletten Bereich (EUV) ein technologisch völlig neuartiges Terrain betreten. Statt der üblichen Durchleuchtung der Masken muss in diesem Wellenlängenbereich mit reflektiven Masken und Spiegelsystemen gearbeitet werden. Das Licht selber wird in Luft absorbiert, so dass die Bearbeitung der Masken sowie die Belichtung der Siliziumscheiben im Vakuum erfolgen müssen. Viele der technologischen Fragen sind noch ungelöst. Das BMBF wird deshalb die Erforschung der Maskentechnologie und der Lithographie bundesweit weiter fördern. Es werden inklusive des Maskentechnologiezentrums 20 Unternehmen, darunter 7 klein- und mittelständische Unternehmen sowie 13 Forschungsinstitute, gemeinsam die zukünftigen Herstellungstechnologien für nanoelektronische Bauelemente untersuchen.

THE BEST IS STILL TO COME !

Bildnachweis

Seite 4, 5: Advanced Micro Devices - AMD; BergerhofStudios, Köln

Seite 6, 7: VDI Technologiezentrum, Düsseldorf

Seite 8: BergerhofStudios, Köln

Seite 9, links Mitte: Philips GmbH, Hamburg

Seite 9, links unten: Siemens AG, München

Seite 9, rechts: Infineon Technologies AG, München

Seite 10, oben: Siemens AG, München

Seite 10, unten links: Robert-Bosch GmbH, Stuttgart

Seite 10, unten rechts: Infineon Technologies AG, München

Seite 11, links: Siemens AG, München

Seite 11, unten rechts: Infineon Technologies AG, München

Seite 12, linke Spalte: National Museum of American History, Smithsonian Institution

Seite 12, 13 Mitte: U.S. Army Materiel Command Historical Office

Seite 13, rechts, von oben nach unten:
1.-3. National Museum of American History, Smithsonian Institution;
4. Siemens/Infineon Technologies AG, München;
5. Advanced Micro Devices - AMD

Seite 14: Grafik: BergerhofStudios, Köln

Seite 14, rechts unten: Sir John Tenniel, “Through the Looking Glass”

Seite 15, oben und mitte : Sony Corporation

Seite 15, unten: Deutsche Bahn AG

Seite 16: BergerhofStudios, Köln, unter Verwendung einer Vorlage von Martin Mach

Seite 17, oben: Advanced Micro Devices - AMD

Seite17, unten links: Infineon Technologies AG, München

Seite 17, unten rechts: Wacker Siltronic Tima Laboratory, Grenoble

Seite 18, oben links: Team Mainz Gutenberg 2000

Seite 18, oben rechts: Advanced Micro Devices - AMD

Seite 18, unten: Philips GmbH, Hamburg

Seite 19, oben rechts, Mitte rechts: Schott Lithotec AG, Jena

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

Seite 19, unten rechts: Lambda Physik AG, Göttingen

Seite 20: IBM Corporation

Seite 21: Carl-Zeiss SMT AG, Oberkochen

Seite 21, unten links: Schott Lithotec AG, Jena

Seite 22: Advanced Mask Technology Center - AMTC, Dresden

Seite 23, oben: DuPont Photomask (DPI)/ BergerhofStudios, Köln

Seite 23, unten: Leica Microsystems AG, Wetzlar

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

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 Wahlbewerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke 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 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.

BMBF PROGRAMM