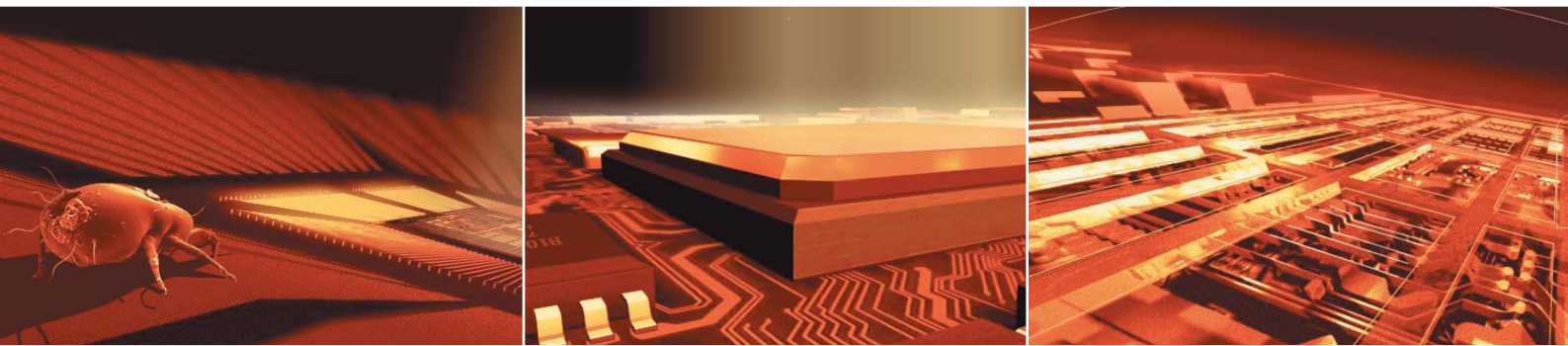










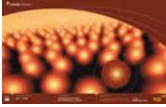
Route »Bit-Land«

Reiseführer-Infos zu den Etappen der virtuellen Erlebnisreise
in den Mikro- und Nanokosmos www.nanoreisen.de



Inhalt der Route Bit-Land

Hinweis zur Benutzung: Über das Inhaltsverzeichnis können Sie zu den einzelnen Kapiteln springen und durch Klicken auf das Nanoreisen-Logo gelangen Sie zurück zur Übersicht.

Vorschau		Reisegröße	Etappe	Seite
	10^{-1} m	10 cm Zentimeter	Open-Air im Tastenpark	3
	10^{-2} m	1 cm Zentimeter	Über den Dächern der Platinenstadt	8
	10^{-3} m	1 mm Millimeter	Ausblick auf das Giga-Hertz	13
	10^{-4} m	0,1 mm Millimeter	Schichtwechsel im Byte-Archiv	16
	10^{-5} m	10 μ m Mikrometer	Rangieren im Bit-Stellwerk	18
	10^{-6} m	1 μ m Mikrometer	Zwischenstopp an der Elektronen-Ampel	21
	10^{-7} m	0,1 μ m Mikrometer	Halbleiter-Canyoning	22
	10^{-8} m	10 nm Nanometer	Gegenverkehr auf dem Hochplateau	24
	10^{-9} m	1 nm Nanometer	Sonnenaufgang im Kristall-Feld	26

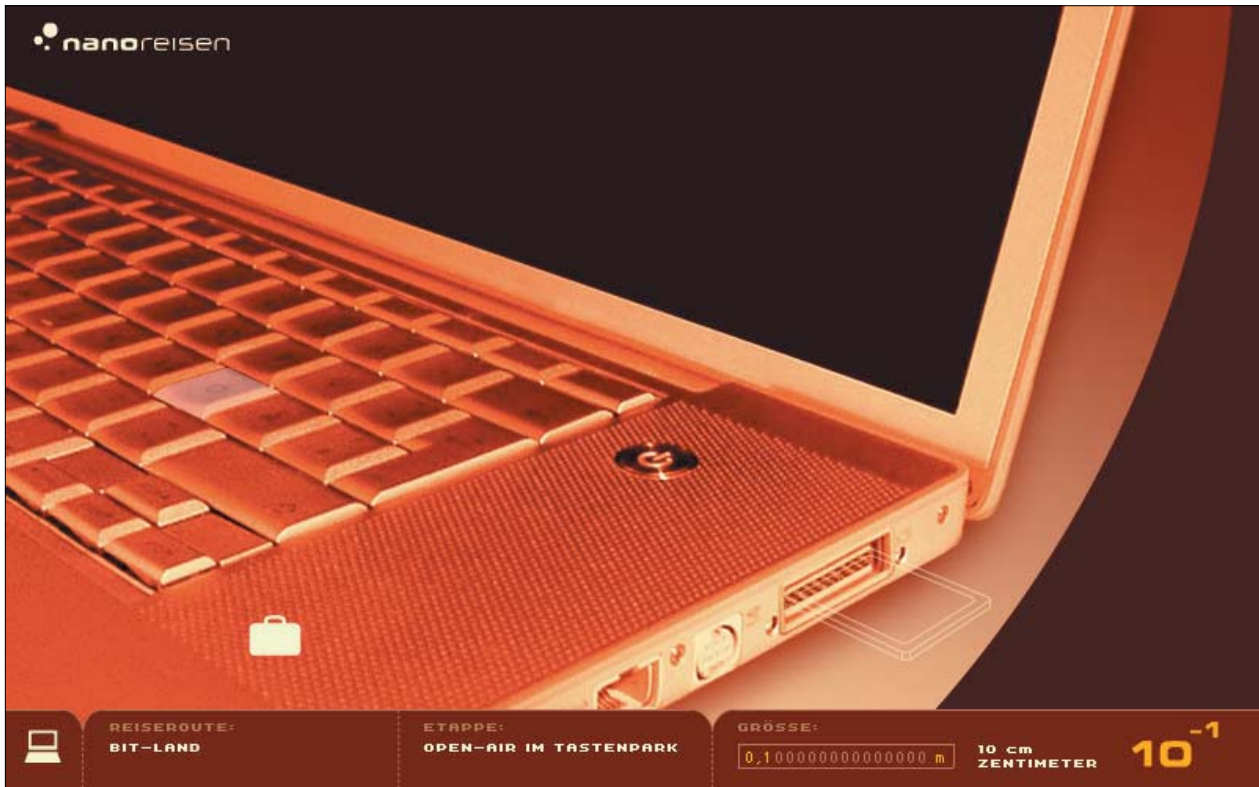
weiter geht es in der Route Ego-Trip (von Angström bis Femtometer)

Impressum | Bildnachweis

28

Route: **Bit-Land**

Etappe: **Open-Air im Tastenpark**



Größenvergleich:

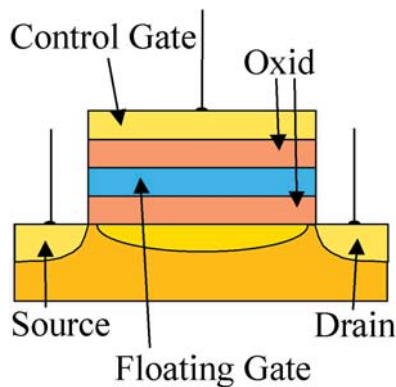
1m : 10 cm

Ø Erde : Länge Deutschlands

Memory Sticks und Flash-Speicherkarten



Flash-Speicher haben die gute alte Diskette als transportablen Datenspeicher abgelöst. Flash-Speicher, kaum größer als ein Päckchen Kaugummi, können mittlerweile **mehrere Gigabyte Daten** speichern. Ein Gigabyte Daten entspricht etwa einem Kleinlaster voller Bücher. Wie der Hauptspeicher von Computern (DRAM) haben auch Flash-Speicher keine beweglichen Teile. Sie bestehen im wesentlichen aus dem Halbleitermaterial Silizium. Wie beim DRAM werden auch im Flash-Speicher die Daten in Form von elektrischer Ladung gespeichert. Im Gegensatz zum DRAM behält ein Flash-Speicher seine Daten auch ohne Stromversorgung. Dafür ist er allerdings wesentlich langsamer und nicht so haltbar wie ein DRAM.



Flash-Speicher speichert elektrische Ladungen in dem blau dargestellten Bereich (floating gate).

Flash-Speicher schematisch

In ihrem Aufbau ähneln sie einem Feldeffekttransistor (FET), der durch ein zusätzliches, elektrisch isoliertes »Gate« (floating-gate) ergänzt wurde. Dieses **floating-gate** dient der Informationsspeicherung. Elektronen können durch Anlegen einer hohen Spannung auf das floating-gate injiziert werden und ändern damit die I-U-Charakteristik bzw. den Widerstand und ermöglichen so ein Auslesen bei geringer Spannung. Durch eine isolierende Oxidschicht wird verhindert, dass die gespeicherten Ladungen verloren gehen. Allerdings lässt sich ein Flashspeicher **nicht beliebig häufig wiederbeschreiben (ca. 1 Mio. mal)**, da die isolierende Barriere durch die hohen Schreibspannungen dünner wird. Andere zukünftige, nichtflüchtige Datenspeicher beruhen auf der Polarisation ferroelektrischer Dielektrika (FRAM) und auf magnetoresistiven Bauelementen (MRAM).

TFT-Bildschirme



Das Bild wird aus »Pixeln« aufgebaut.

Monitore sind heute extrem flach, sehr lichtstark und gestatten große Betrachtungswinkel von bis zu 178 Grad. Der Weg von der Braun'schen Röhre zu den modernen LCD-Monitoren (**LCD: liquid crystal display**) war weit. Dazu musste vor allem die Verarbeitungstechnik perfektioniert werden: ein heutiger 17" oder 19" Flachbildschirm besteht aus 1280 x 1024 Bildpunkten, also rund 1,3 Mio Pixel. Diese bestehen wiederum aus jeweils drei LCD-Zellen, um eine farbige Darstellung zu ermöglichen. Damit sind es bereits **fast 4 Millionen einzeln ansteuerbare Zellen**, deren Intensität durch das Anlegen einer Spannung steuerbar ist. Man unterscheidet zwischen aktiven und **passiven Displays, genauer Passivmatrix- oder Aktivmatrixdisplays**.

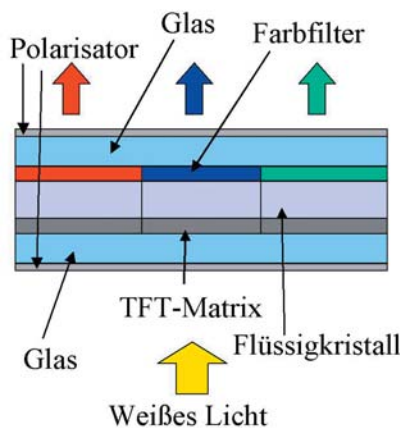
Die passiven sind allerdings veraltet, da sie konstruktionsbedingt zu **Geisterspuren** neigten. Die Aktivmatrixdisplays (**TFT: Thin Film Transistor**) haben für jeden Bildpunkt einen einzeln ansteuerbaren Transistor, was eine kurze Reaktionszeit möglich machte. Damit wird bereits klar, warum es eine Weile gedauert hat, solche Displays herzustellen. Die Grenze von 4 Mio Transistoren wurde vom Pentium I zum Pentium II überschritten. Das größte Problem lag darin, so viele Pixel fehlerfrei (bzw. fehlerarm) und zu einem günstigen Preis herzustellen.

TFT Displays werden **von hinten durchleuchtet**, wobei die Farbe durch das Mischen der drei Grundfarben (rot, grün und blau) entsteht. Dazu muss die Intensität des die einzelnen Pixel durchscheinenden Lichtes regelbar sein. Dies erreicht man, indem man das Licht **durch zwei Polarisatoren** schickt. Hierin lag auch eine weitere große Schwäche anfänglicher LCD-Displays. Da sie eine Lochstruktur durchleuchten müssen, ergibt sich eine **deutliche**

Abhängigkeit der zu beobachtenden Helligkeit und Farbe vom Betrachtungswinkel. Dieses Problem wurde durch immer dünner werdende Displays behoben, wodurch das Pixel fast selbst zur Lampe wird. In diesem Punkt sind nur die **OLED-Displays** (Organic Light Emitting Diode) besser. Sie verfügen über selbstleuchtende Pixel mit einer **enormen Farbbrillanz**.

Die pixelabhängige Intensitätsregelung wird nun wie folgt erreicht: zwei zueinander gekreuzte Polarisationsfilter lassen kein Licht durch, sind also schwarz. Dreht man die Polarisation des Lichtes zwischen den beiden Polarisationsfiltern, so hellt sich das Pixel auf. Die Drehung der Polarisationsrichtung wird durch sog. Flüssigkristalle erreicht. **Flüssigkristalle (LC: liquid crystals)** lassen sich in einem elektrischen Feld ausrichten und **drehen die Polarisation des Lichtes**. Die LCs in den einzelnen Zellen werden durch die Transistoren angesteuert, so dass sich eine Matrix aus aktiv steuerbaren, dreifarbigen Punkten ergibt: der **TFT-LCD**.

Der Flüssigkristall in einem LCD



*Funktionsschema eines TFT-Bildschirms:
Ein »schaltbarer« Flüssigkristall wird von hinten beleuchtet.*

Ein Kristall hat eine regelmäßige Anordnung seiner Atome. Eine Flüssigkeit hingegen ist isotrop, besitzt also keinerlei Ordnung bzw. Richtungsabhängigkeit. Nun gibt es einige Materialien, die beim Schmelzen nicht direkt in den flüssigen Zustand übergehen, sondern verschiedene **flüssigkristalline Phasen** durchlaufen und das versteht man wie folgt:

Diese **Flüssigkristalle (LC: liquid crystal)** bestehen aus stäbchenförmigen Molekülen, die eine Richtungsfernordnung ermöglichen, d. h. eine Korrelation der Orientierung benachbarter Moleküle. Beim Schmelzen wird zwar das starre Gitter aufgegeben, aber die Orientierung bleibt erhalten. **LCs sind somit bzgl. des Gitters eher eine Flüssigkeit aber bzgl. der Orientierung ein Kristall.** Daher ihr ambivalenter Name.

LCs haben die Eigenschaft, die Polarisation des Lichtes zu drehen. Man nennt solche Stoffe **optisch aktiv**. Außerdem lassen sich LCs in elektrischen Feldern orientieren (wegen ihres Dipolmoments), so dass ihre Lichtdurchlässigkeit elektronisch geschaltet werden kann.

Was für's Auge – die Grafikkarte

Die Grafikkarte besteht aus einer speziellen CPU und einem speziellen Datenspeicher. Grafik-CPU, genannt **GPU (Graphics Processing Unit)**, und Grafik-Datenspeicher sind auf die schnelle Verarbeitung und Speicherung von graphischen Daten (Bildern,



Die GPU, das Herz der Grafikkarte

Videos) spezialisiert. Die Grafikkarte berechnet aus den Daten vom Hauptprozessor und dem Speicher das aktuelle Bild, das auf dem Monitor angezeigt wird.

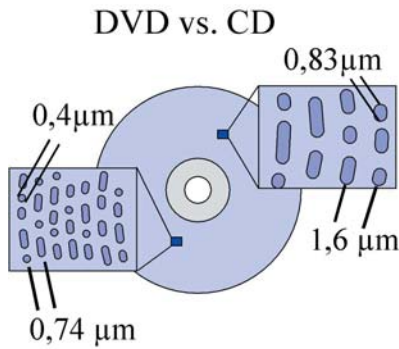
Moderne Grafikkarten sind dabei äußerst leistungsfähig geworden. Die Dichte der Transistoren der heutigen GPUs liegt weit über denen einer modernen CPU. Die Geforce 6800 verfügt über großzügige 222 Millionen Transistoren auf dem »die« (Chip), während ein Pentium 4 Prescott nur mit 125 Millionen auskommen muss (Stand 2004). Ihre Anzahl ist nahezu berechenbar: Sie folgt dem **Moore'schen Gesetz**, welches eine **Verdoppelung alle 18 Monate** vorsieht.

CD/DVD – Speichern mit Licht

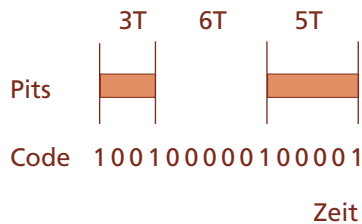
Kurze Zeit nach dem Siegeszug der CD-Player über die alten Vinyl-Plattenspieler wurden CD-Laufwerke und mittlerweile DVD-Laufwerke auch im Computer selbstverständlich. Die **Speicherkapazität von 800MB bei CD und 4,7GB (bzw. 8,58GB) bei DVD** sowie die preisgünstigen Rohlinge waren dabei ausschlaggebend. Die Daten auf CD-ROM und DVD-ROM sind in Form von kleinen Vertiefungen, sogenannten Pits, gespeichert. Normalerweise wird der die CD/DVD abtastende Laserstrahl von der CD/DVD-Oberfläche reflektiert, im Bereich der Pits jedoch nicht. Diese Abfolge von »Licht an« und »Licht aus« wird von der Elektronik in **digitale Daten (»0« und »1«) umgesetzt**, die für den Computer verständlich sind.

Der Unterschied zwischen CD und DVD liegt in der Größe der Pits und in der Wellenlänge des abtastenden Laserstrahl. CDs haben eine Pitgröße von 0,834 Mikrometer, DVDs nur 0,4 Mikrometer. Aufgrund der kleineren Pitgröße passen auch mehr Daten auf eine DVD.

Beschreibbare CDs und DVDs sind **zunächst völlig glatt und reflektierend**, d. h. sie besitzen keine Pits und somit auch keine Daten. Stellt man den Laser nun auf eine höhere Leistung als zum Lesen notwendig ist, kann man diese **Beschichtung gezielt aufschmelzen und damit die Reflektivität verändern**. Man brennt so Pits in die Beschichtung, welche anschließend die Daten repräsentieren. Je nach Beschichtung kann man diesen Vorgang durch Verändern der Laserleistung auch wieder rückgängig machen, in diesem Fall hat man eine wiederbeschreibbare CD/DVD d.h. CD-RW bzw. DVD+-RW vor sich, im ersten Fall nur eine CD-R bzw. DVD-R.



Vergleich DVD und CD mit minimaler Pitlänge und Spurbreite



Schematische Darstellung der Datenspeicherung. »Einsen« bedeuten einen Wechsel von Pit/Land oder Land/Pit, ansonsten werden »Nullen« gelesen – aber mindestens zwei und höchstens 10 am Stück (EFM-Modulation).

So einfach ist es dann doch nicht

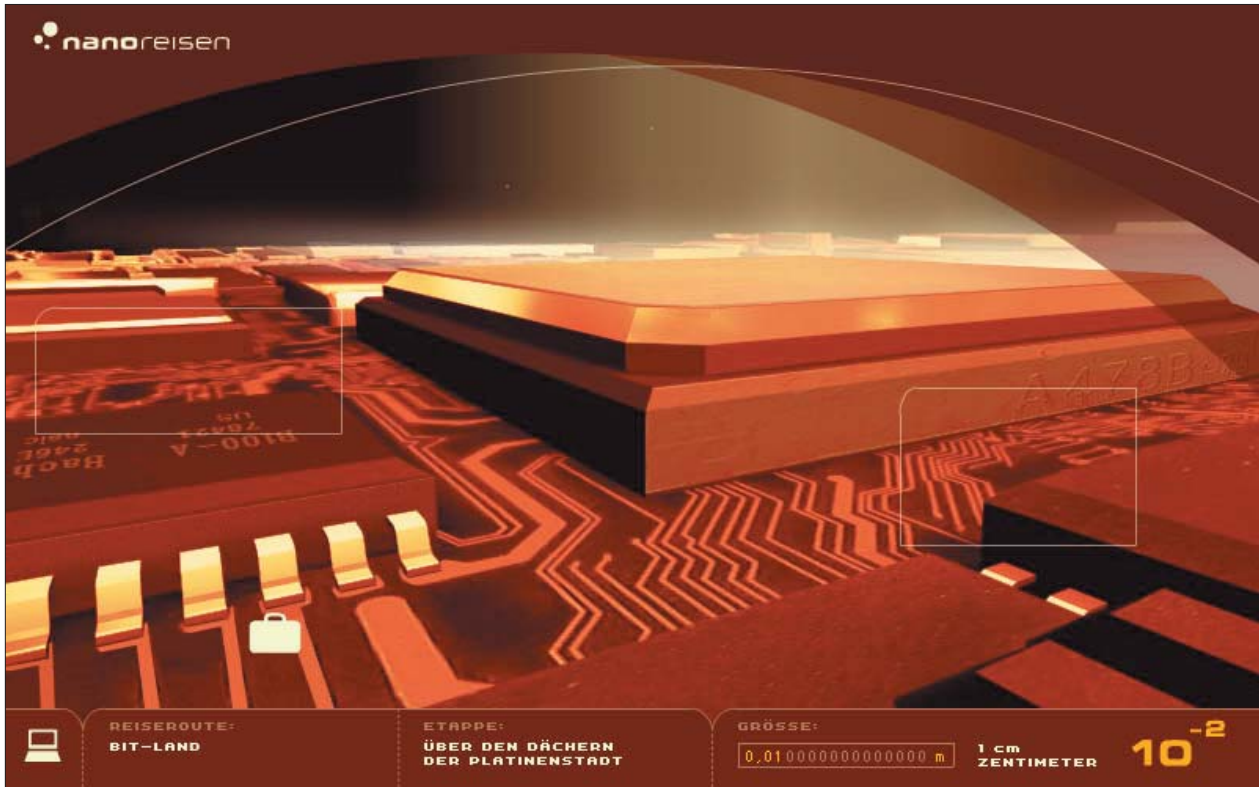
Betrachtet man eine CD oder DVD genauer, so stellt man fest, dass die »Pits« und die dazwischen liegenden Flächen, die sog. »Lands«, unterschiedlich lang sind. Der Grund liegt in der Form der Datenspeicherung und in der Form der Fehlerkorrektur. Die Daten sind in den Übergängen zwischen Pits und Lands derart gespeichert, dass nur dann eine 1 verzeichnet wird, wenn die Reflektivität sich ändert, also beim Übergang von Pit zu Land und umgekehrt.

Dazwischen werden Nullen eingefügt, welche dem Plateau vom Pit oder Land entsprechen. Die Breite der Pits ist festgelegt und hängt von der Wellenlänge des Lasers ab. Ihre Länge hingegen variiert nach einer festen Zeitvorgabe. Sie ist ein ganzzahliges Vielfaches von $T = 231,4 \text{ ns}$. Dies ist ebenfalls in der räumlichen Ausdehnung des Laserflecks begründet. Die minimale Pitlänge ist $3T$, die maximale $11T$. Durch diese Restriktion kann die Fehlerrate reduziert werden (EFM Codierung). Man minimiert die Anzahl der Nulldurchgänge, indem man die minimale Anzahl der Nullen auf zwei und die maximale Anzahl auf 10 beschränkt.

Da eine herkömmliche 8-Bit Kodierung diese Anforderungen nicht erfüllen kann, wird eine 14-bit Modulation eingeführt. Daher der Name »EFM: Eight-to-Fourteen-Modulation«. Hierin liegt der Grund, warum die Länge der Pits zwischen $0,833$ und $3,054 \mu\text{m}$ ($3T-11T$) variiert (nur CD). Bei einer DVD beträgt die minimale Pitlänge hingegen $0,4 \mu\text{m}$. Die Speicherdichte einer CD beträgt ca. $0,39 \text{ Gbit/inch}^2$, die einer DVD $2,77 \text{ Gbit/inch}$. Genau wie bei Festplatten bezieht man sich auf das Längenmaß »Inch« = Zoll anstelle von Zentimeter ($1 \text{ inch} = 2,54 \text{ cm}$). In der Entwicklung ist die sog. **Blu-Ray Disk**. Sie verwendet eine kleinere Lichtwellenlänge von 405 nm (blau) und dementsprechend einen kleineren Spurbestand und kleinere Pits und Lands (Spurbestand: $0,32 \mu\text{m}$, min. Pitlänge $0,138 \mu\text{m}$). Die Speicherdichte steigt auf $15,9 \text{ Gbit/inch}$. Damit kann man in einer Schicht der Blu-Ray Disk bis zu **27 GB** speichern.

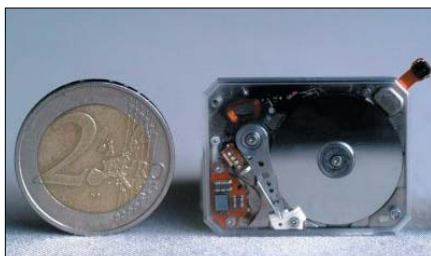
Route: **Bit-Land**

Etappe: **Über den Dächern der Platinenstadt**



Größenvergleich:

1m : 1 cm
 Ø Erde : Länge Korsikas



Die Abbildung zeigt eine 0,85" 4GB Festplatte von Toshiba im Vergleich zu einer 2 Euro Münze. Herkömmliche Festplatten sind allerdings viel größer, die von Desktop Computern 3,5" und die von Laptops 2,5".

Die Festplatte – Das Langzeitgedächtnis

Die Festplatte (**HD: Hard Disk**) ist das Langzeitgedächtnis des PCs. Hunderte Gigabyte von Daten können auf ihr gespeichert werden. Im Gegensatz zum Arbeitsspeicher des PCs behält die Festplatte die Daten auch **ohne ständige Stromversorgung**. Aber die Festplatte hat auch Nachteile – sie ist **vergleichsweise langsam**. Deshalb werden nur Daten, die man momentan nicht direkt benötigt, auf ihr gespeichert. Die Festplatte ist ein mechanisches Wunderwerk. Auf kleinstem Raum dreht sich eine winzige Scheibe **mit mehreren tausend Umdrehungen pro Minute**, welche die Daten magnetisch speichert. Der über der Scheibe in nur wenigen nm-Höhe fliegende **Lesekopf** sucht auf der Platte die gewünsch-

ten Daten und übersetzt sie in computerlesbare Signale bzw. schreibt die Daten, die gespeichert werden sollen, **durch Stromstöße** auf die Scheibe.

Die Innovation moderner HDs liegt im Kopf, mit dem die Daten gelesen und geschrieben werden. Dort sind nanometerdünne Schichten, die in der Lage sind die winzigen Magnetfelder der gespeicherten Daten auf der Platte auszuwerten. Diese bestehen aus einem **Schichtstapel**, der je nach anwesendem Magnetfeld seinen elektrischen Widerstand ändert. Die Widerstandsänderung wird dann in »0« und »1« umgesetzt. Diesen Effekt nennt man **Riesenmagnetwiderstand oder GMR (Giant Magneto Resistance)**. Durch die GMR-Technologie sind die heutigen Gigabyte-Platten erst möglich geworden.

Die Daten werden in Form von winzigen magnetischen Bereichen auf der Platte gespeichert. **Jedes Bit kann man sich dabei als winzigen Magnet vorstellen**. Die Bits bzw. die kleinen Magnete liegen in konzentrischen Kreisen auf der Platte.

Festplatten-Lesekopf im Präzisions-Tiefflug

Über der Platte »fliegt« im Abstand von wenigen Nanometern der Lesekopf und misst das Magnetfeld der Bits. Die HD-Elektronik rechnet die gemessenen Magnetfelder **in eine Folge von »0« und »1«** und damit in digitale Daten um. Geschrieben werden die Daten, indem man mit der sehr dünnen Verlängerung (Joch) einer Spule die magnetischen Bits ummagnetisiert. Nanotechnologisch ist auch die Beschichtung der Platten. **Der HD-Kopf »fliegt« nicht nur, sondern hat in 50 % der Zeit auch direkten Kontakt zur Platte (Taubelbewegung)**. Ohne eine Schutzschicht würden somit die Daten zerstört.

Die Schutzschicht muss dabei sehr stabil sein und nur wenige nm dünn, damit der Lesekopf möglichst nah an die magnetisierbare Schicht darunter kommt. Nur bei sehr kleinem Abstand von Kopf und Platte lassen sich die heutigen Gigabyte realisieren. Die **Flughöhe** des Schreib/Lesekopfes beträgt dabei **ca. 15–20 nm**. Die nur wenige nm dünne Schutzschicht besteht aus einer Mischung aus Graphit und Nanometerdiamanten. Der Graphit sorgt für »Schmierung«, falls der Kopf die Platte berührt, der Diamant sorgt für die notwendige Härte, um Plattenbeschädigungen zu vermeiden. Moderne Festplatten erreichen **Speicherdichten von ca. 100 Gbit/inch²**. Bereits in naher Zukunft wird dieser Wert weit überschritten, man wird in den Bereich von Terabit pro Quadratinch vorstoßen.

Festplatten variieren heute stark in ihrer Größe. Je nach Anforderung können ultrakompakte Festplatten für z. B. digitale Kameras gebaut werden, mit geringerer Kapazität als ihre großen Brüder.

Arbeitsspeicher-DRAM: das Kurzzeitgedächtnis

Der DRAM (Dynamik Random Access Memory) ist das **schnelle Kurzzeitgedächtnis** des PC. Daten aus dem DRAM können in wenigen Nanosekunden zum Prozessor geschickt, dort verarbeitet und wieder im DRAM gespeichert werden. Moderne PCs haben einige hundert Megabyte bis zu einigen Gigabyte als DRAM-Arbeitsspeicher. **1 Megabyte kann man sich als 500 vollgeschriebene Seiten A4-Papier vorstellen.** Der DRAM ist **zwar schnell, vergisst aber seine Daten ohne ständige Stromversorgung.** Deswegen muss man einen PC booten. Beim Booten werden die notwendigen Daten von der Festplatte in den DRAM geladen.

Beim »Herunterfahren« werden die **DRAM-Daten auf die Festplatte gespeichert.** Ein DRAM hat keine beweglichen Teile und besteht zum größten Teil aus dem Halbleitermaterial Silizium sowie Kupfer für die Verdrahtung. **Die Datenspeicherung erfolgt rein elektronisch,** indem elektrische Ladung in einem Kondensator gespeichert wird. Ein Datenbit entspricht dabei einer bestimmten elektrischen Ladungsmenge. Einen **Kondensator** kann man sich als Behälter für elektrische Ladung vorstellen, den man über die Kupferleitungen füllen oder entleeren kann.

Genauer besteht die Speicherzelle eines DRAM aus einem **Transistor (= Schalter)** und einem Speicher für elektrische **Ladung (= Kondensator).** Der Ladezustand des Kondensators ist die gespeicherte Information. Zum Schreiben wird der Kondensator aufgeladen (Spannung wird angelegt und der Transistor auf Durchlass geschaltet), zum Lesen wird der Transistor auf Durchlass geschaltet und gemessen, ob ein Strom fließt, d. h. nach jedem Lesen müssen die Daten neu eingeschrieben werden (**Refresh**). Das kostet Zeit und Energie.

Moderne DRAM werden wie CPUs in 90nm-Technologie produziert. Daneben gibt es noch den statischen Speicher **SRAM (StaticRandom Access Memory).** Dieser ist schneller als der DRAM, welcher als Arbeitsspeicher genutzt wird, aber auch sehr viel teurer. Aus diesem Grund wird der SRAM nur als Cache, also zum schnellen Zwischenspeichern eingesetzt.

Speicher der Zukunft

Schnelle Speicher, die nichts vergessen: **Nichtflüchtige Datenspeicher** garantieren, dass gespeicherte Informationen auch ohne Stromversorgung erhalten bleiben. Sie stellen damit einen zentralen Beitrag zu einer **energiesparenden und transportablen Elektronik** dar. Das mobile Internet und die zunehmende Vernetzung der Welt werden den Bedarf an nichtflüchtigen Speichern steigen lassen. Die nächste Generation nichtflüchtiger Datenspei-

cher wird wesentlich schneller sein als derzeitige Flash-Speicher und Festplatten. Dies wird ein wesentlich breiteres Einsatzspektrum bis in Bereiche, die derzeit von DRAM bzw. SRAM abgedeckt werden, ermöglichen. Die Aussicht, dass ein mit nichtflüchtigem Arbeitsspeicher ausgerüsteter Computer nach dem Einschalten ohne langwieriges Booten des Betriebssystems sofort verfügbar ist (**instant on**) und ohne zeitraubendes Herunterfahren ausgeschaltet werden kann (**instant off**), macht nichtflüchtige Datenspeicher sowohl für mobile als auch stationäre Geräte attraktiv.

Kandidaten für die zukünftigen, nichtflüchtigen Speicher sind:

MRAM – Magneto Resistive Random Access Memory

FRAM – Ferroelectric Random Access Memory

PC-RAM – Phase Change Random Access Memory

Ein MRAM beruht auf der spinabhängigen Wechselwirkung der Elektronen in einem Sandwich aus zwei magnetischen und einer dazwischen liegenden, nichtmagnetischen Schicht. Der Spin kann vereinfacht als Eigendrehimpuls bzw. Rotation der Elektronen aufgefasst werden (auch wenn dies nicht ganz richtig ist). Aus diesem Grund wird eine solche Elektronik, die sich den Spin der Teilchen zu nutze macht, auch Spintronik genannt. Der physikalische Effekt wird **Tunneling Magneto Resistance (TMR)** genannt. Er ist sehr ähnlich wie der in Festplatten verwendete **Giant Magneto Resistance (GMR)**.

Der Prozessor – das Gehirn des PC

Die CPU (**Central Processing Unit**) ist das Gehirn des Computers. Alle Daten aus dem DRAM und Befehle der Software bzw. des Benutzers werden hier verarbeitet. Eine CPU besteht aus **hundertten Millionen von Schaltern (= Transistoren)**. Je nachdem wie die Transistoren geschaltet sind, werden die Daten addiert, subtrahiert, multipliziert, dividiert oder komplizierteren Befehlen ausgesetzt. Die Verschaltung der Transistoren (= Programmierung) wird durch die Software oder den Benutzer vorgegeben. Dadurch ist eine CPU universell einsetzbar. Je nach Programmierung kann der PC z. B. eine Schreibmaschine, ein Spielzeug, ein Fernseher, oder ein Lexikon sein.



Eine moderne CPU von AMD

CPU oder Kochplatte?

Die Rechenleistung heutiger CPUs lässt nur in wenigen Fällen zu wünschen übrig, wohl aber deren Verlustleistung. Die **Verlustleistung** ist die elektrische Leistung, welche die CPU zwar aufnimmt, aber nicht sinnvoll in Rechenleistung umsetzen kann. Die Verlustleistung heizt die CPU auf und würde sie ohne Kühlung zerstören. Moderne CPUs erfordern daher **Kühlkörper**, die auf die CPU gesteckt werden und Ventilatoren. Beim gezielten Übertakten der CPUs (overclocking) kommen sogar Wasser- und Kältekompressoren wie im Kühlschrank zum Einsatz.

Moderne CPUs erreichen mehr als 100W Verlustleistung, mit steigender Tendenz, und geben damit bezogen auf die Fläche mehr Wärme ab als eine Kochplatte. Der Grund dafür liegt in den immer kleineren Strukturen in den Chips, die es dem elektrischen Strom immer leichter machen, sich »nichtgewollte« Wege zu suchen. Dieser unkontrollierte Stromfluss, z. B. durch den Wafer anstatt durch den Transistor, heizt den Chip auf.

Route: **Bit-Land**

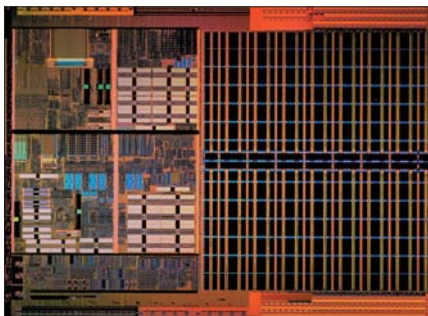
Etappe: **Ausblick auf das Giga-Hertz**



Größenvergleich:

1m : 1 mm
 Ø Erde : Höhe Mount Everest

Der »die« – das eigentliche Zentrum

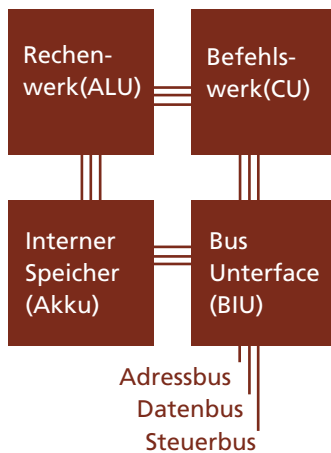


Kern (»die«) der Athlon64 CPU

Inmitten der CPU liegt der eigentliche Chip, der die Recheneinheiten und den Cache trägt. Dieser Bereich wird »die« genannt (»dai« gesprochen). Dieser meist etwas erhabene Bereich der CPU entwickelt die Wärme. Aus diesem Grund liegt der zumeist große, metallene Kühlkörper genau auf dem »die«. Eine Wärmeleitpaste stellt einen optimalen Wärmekontakt her.

Die fertige CPU, d. h. der Chip, enthält genau einen »die«, der aus einem Wafer ausgesägt wurde. Dieses Bild ist also ein Blick in die CPU. Man sieht auf der linken Seite des Bildes die Einheiten, die wirklich rechnen und auf der rechten Seite den internen, sehr schnellen Arbeitsspeicher des Prozessors, welcher Cache genannt wird und aus SRAM-Speicher besteht.

Aufbau einer CPU



Schematischer Aufbau eines »Rechners« bzw. einer CPU.

Eine CPU besteht aus folgenden Unterkomponenten: Dem **Rechenwerk** mit der arithmetisch-logischen Einheit, der sog. ALU (Arithmetic Logical Unit), und dem **Steuerwerk** oder Leitwerk (CU Control Unit). Daneben gibt es **verschiedene Register** zum Zwischenspeichern der Daten. Dazu kommt ein Taktgeber, der die einzelnen Arbeitsschritte synchronisiert und die Geschwindigkeit bestimmt.

Rechenwerk – (ALU) Arithmetic Logic Unit

Die **ALU** ist der eigentliche Rechner. In ihr werden die arithmetischen (addieren, subtrahieren) und logischen Funktionen (AND, OR, EXOR) und Berechnungen ausgeführt. Zur ALU gehören auch der **Akku** (Speicher) und die **Flags** (Ereignisspeicher). Befehls

Befehlswerk – (CU) Control Unit

Die CU ist die **Kommandozentrale** der CPU. Sie steuert alle Abläufe im Innern des Prozessors sowie seine Kommunikation nach außen. In der Control Unit befindet sich das **Befehlsregister**, das alle Befehle enthält, die der Mikroprozessor ausführen kann. Hier werden auch die **Befehle aus dem Speicher dekodiert**. Dann gibt es noch eine zeitliche und logische Steuerung, die auf die ALU bei Rechenoperationen zugreift. Von hier werden auch der Steuerbus, die Interrupts und die serielle Ein- und Ausgabe gesteuert. Die CU holt sich Befehle aus dem Arbeitsspeicher oder dem Level1-Cache.

Speicherwerk – (Cache)

Der Level1-Cache ist ein **schneller Zwischenspeicher**, um den Zugriff auf häufig benutzte Daten zu beschleunigen. Der Level1-Cache ist auf dem Prozessor-»die« integriert. Häufig gibt es noch einen Level2-Cache auf dem »die«. »Level3-Cache« ist deutlich seltener anzutreffen.

Interner Speicher – (Akku)

Zum internen Speicher gehören wichtige Register, die als Zwischenspeicher dienen und der **Befehlszähler**, in dem steht, aus welcher Speicherzelle der nächste Befehl geladen wird.

Bus Interface Unit – (BIU)

Die Busschnittstelle **verbindet die internen Busse des Prozessors mit der Außenwelt**. Sie enthält Puffer zur Zwischenspeicherung von Adressen, Daten und Steuersignalen.

Hungrige Milben auf dem Chip?



Ein Reinraum bei AMD in Dresden.

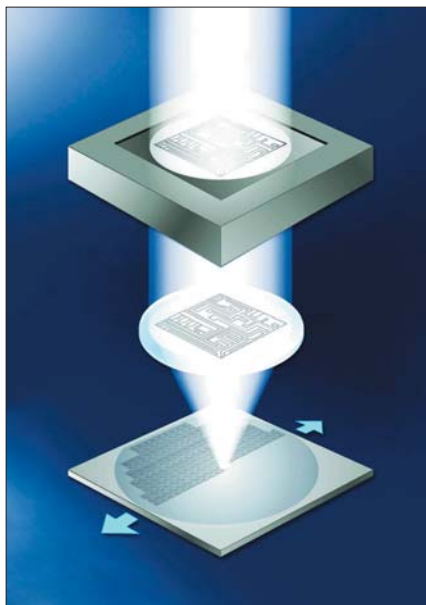
Eine Milbe hat hier natürlich nichts zu suchen und würde sich sicherlich auch nicht wohl fühlen, da es hier kaum noch »Dreck« gibt. Die Chipproduktion erfolgt unter extrem sauberen Bedingungen in sogenannten **Reinräumen**, die speziellen Anforderungen an Luftverhältnisse und Temperaturen genügen. Diese Sauberkeit ist notwendig, da die **elektronischen Bauteile** eines Chips mittlerweile um ein **Vielfaches kleiner als Staubpartikel** sind. Staubpartikel auf oder in Leiterbahnen sind damit so unerwünscht wie Felsbrocken auf der Straße.

Der Reinraum, in welchem der abgebildete Prozessor produziert wurde, enthielt **nur noch 3.500 Staubpartikel in der Größe von 500 nm pro Kubikmeter** Luft und ca. 100.000 Partikel in der Größe von 100 nm. Innerhalb der Transportbehälter, in denen die Chips im Werk computergesteuert über ein Schienensystem an der Decke zu den verschiedenen Bearbeitungsstellen transportiert werden, und innerhalb der Maschinen ist die Anzahl der Partikel sogar noch 100x kleiner.

In »normaler« Luft sind dagegen **10 – 50 Millionen Staubpartikel pro Kubikmeter**. Um die Luft im Reinraum zu säubern, wird diese ständig gefiltert. Die Filteranlage säubert dabei alle 15 sek das gesamte Luftvolumen des 20.000 qm großen Reinraums (AMD, Dresden). Damit die im Reinraum arbeitenden Menschen diesen nicht wieder durch den Staub auf Kleidung, Haut und Haar verschmutzen, müssen sie spezielle **Reinraumanzüge** tragen, die nur noch die Augen freilassen.

liegt eine Gesetzmäßigkeit zu Grunde: das **Moore'sche Gesetz**. Dies sagt eine **Verdopplung** der Transistordichte etwa **alle 18 Monate bei gleichem Preis voraus** und wurde bis heute auch recht gut erfüllt. Der Grund liegt in der **parallelen Fertigungstechnik**, die in einem Arbeitsschritt heute viel mehr Transistoren herstellen kann.

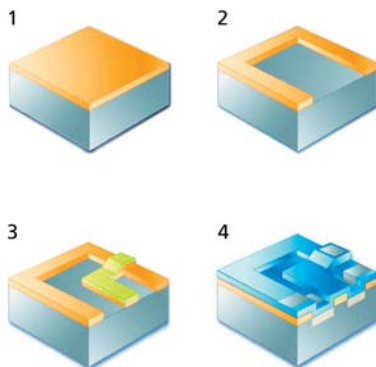
Würde man eine serielle Technik verwenden, also die Herstellung aller 100 Millionen Transistoren nacheinander, würde ein moderner Prozessor zur Sisyphosarbeit werden und unbezahlbar sein. Der Grund seiner »Erschwinglichkeit« liegt also in der Herstellungsmethode, der **Photolithographie**.



Schematische Darstellung der Photolithographie

Photolithographie – malen mit Licht

Lithographie kommt aus dem Griechischen und bedeutet soviel wie **Steinschreiben (lithos = Stein; graphein = schreiben)**. Man beleuchtet eine photoempfindliche Schicht (**Resist**) durch eine Maske und bildet so die **Maskenstrukturen** mit einer Optik (Objektiv) ab. Dann **ätzt** man die Strukturen in die darunter liegende **Siliziumscheibe (Wafer)**. Dieser Vorgang wird mit verschiedenen Masken für die einzelnen Ebenen wiederholt. Da eine Maske eine große Anzahl Prozessoren oder DRAMs produzieren kann, teilen sich die Kosten auf. Diese Geschichte hat allerdings auch einen Haken: die immer kleiner werdenden Strukturen erfordern **immer feiner strukturierte Masken und bessere Optiken**, welche dadurch immer teurer werden. Dies ist ein Faktor, der die **Transistordichte in der Zukunft** limitieren kann. Daneben gibt es natürlich noch die Grenze der atomaren bzw. molekularen Materie.

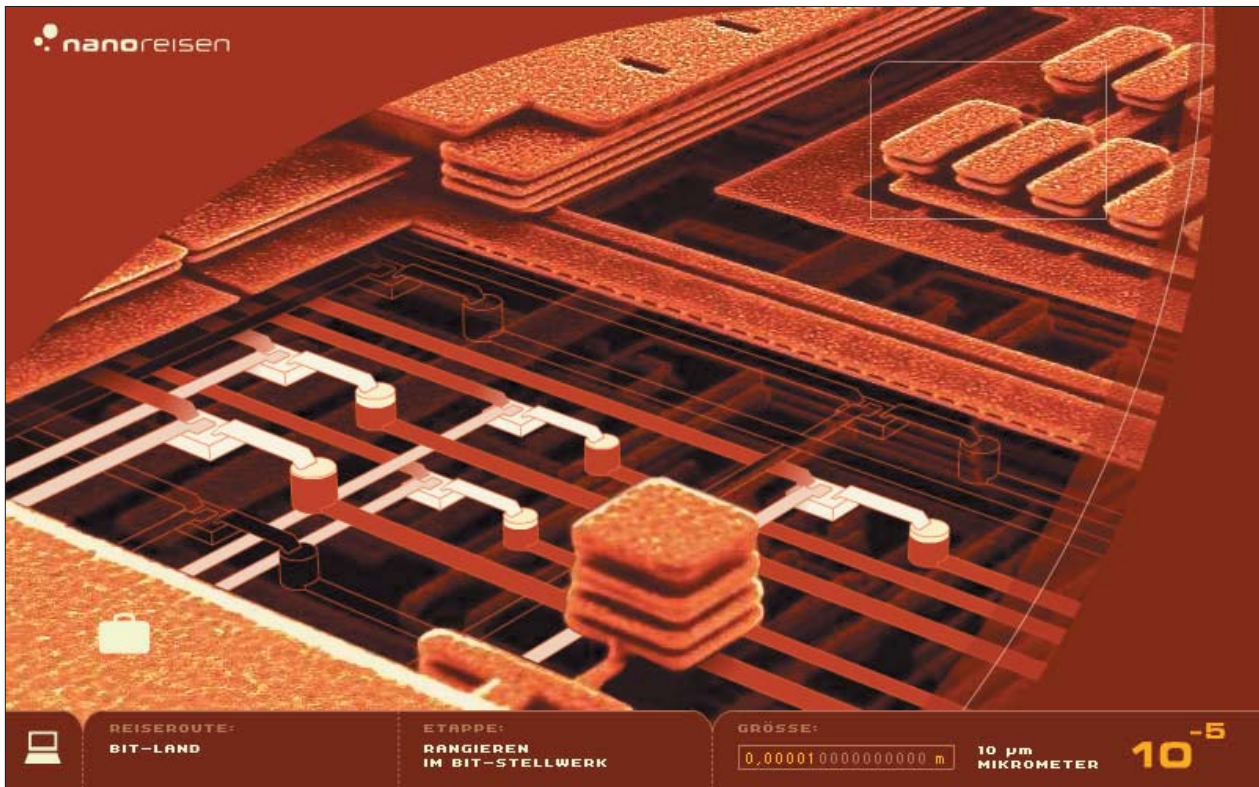


Ein Chip ist ein dreidimensionales Gebilde, bei dem sich alle Schaltelemente in einzelnen Ebenen anordnen. Für einen modernen Hochleistungschip werden **25 bis 30 solcher Ebenen** benötigt, die jeweils eine eigene Lithographiemaske erfordern. Die Strukturen der Maske werden durch das Licht und das Linsensystem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

Nachdem die Strukturen durch den Lithographieprozess auf die Oberfläche des Wafers übertragen wurden, werden diese durch Ätzverfahren in den Wafer übertragen, wodurch z. B. die **dreidimensionale Struktur eines Transistors oder DRAMs** entsteht.

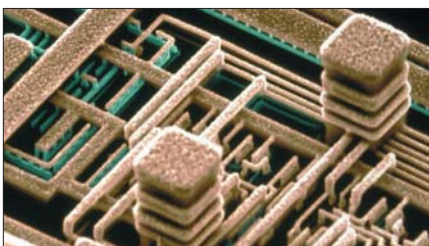
Route: **Bit-Land**

Etappe: **Rangieren im Bit-Stellwerk**



Größenvergleich: 1m : 10 µm
Ø Erde : Fußballfeld

Der Transistor – elektronischer Schalter



Im Bild sind die verschiedenen Verdrahtungsebenen eines Chips zu erkennen. Normalerweise liegen diese Ebenen verborgen in einem Plastikguss. Dieser hat eine schützende Funktion und verhindert dadurch z. B. das Oxidieren, welches den Chip zerstören würde. Die funktionalen Elemente sind die Transistoren, die als Schalter bzw. als schaltbarer Widerstand fungieren.

Der Transistor ist das Grundschaltelement moderner CPUs und besitzt drei elektrische Anschlussmöglichkeiten (Kontakte):

Source = (Strom)quelle

Drain = (Strom)abfluss

Gate = Steuerelement

Mit dem »Gate« kann man den Stromfluss zwischen »Source« und »Drain« steuern. Je nachdem wie groß die elektrische Spannung ist die man auf das Gate legt, fließt zwischen Source und Drain ein mehr oder weniger großer Strom; d. h. man kann mit der elektrischen Spannung des Gates den Strom zwischen Source und Drain ein- und ausschalten. Der Transistor funktioniert also wie ein Schalter, den man mit der Spannung am Gate schaltet. Wenn man mehrere Transistoren nimmt und diese intelligent verschaltet, kann man damit binäre Zahlen, die Grundlage der Computersprache darstellen oder logische Operationen wie z. B. eine Addition ausführen. Heutige CPUs haben mehr als 100 Mio. Transistoren (Stand 2004).

SRAM oder DRAM?

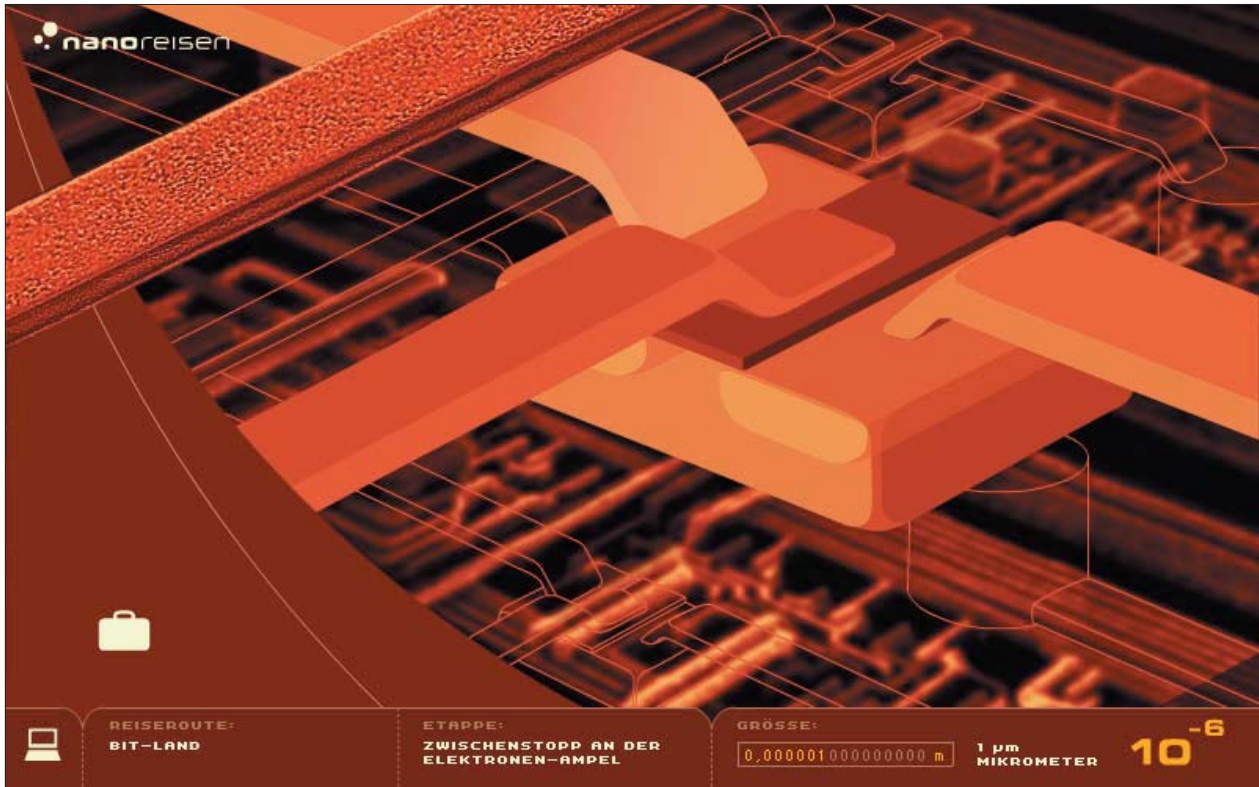
Es existieren verschiedene Arten des »Random Access Memory« oder auch **RAM** genannt. Grundlegend wird zwischen **statischem und dynamischem RAM** unterschieden. Der dynamische ist der uns als Arbeitsspeicher bekannte DRAM. Er kommt als **SDRAM oder DDRAM** vor, wobei der »DDR« doppelt so schnell ist wie der ältere SDRAM. Beiden DRAMs ist ihre schnelle Vergesslichkeit gemein, weswegen ihr Gedächtnis regelmäßig »refreshed« werden muss. Ein DDRAM nutzt die steigende und fallende Flanke des Taktes, ein SDRAM hingegen nur die steigende. Da ansonsten beide gleich aufgebaut sind, hat der DDR seinen langsameren Kollegen verdrängt. Um diesen noch schneller zu machen, wurde die Bandbreite für die Datenübertragung erhöht (DDR2). Ein dynamischer RAM-Speicher besteht aus einer 1-Transistor Speicherzelle, wobei die Speicherung von einem Kondensator übernommen wird. Dies macht den dynamischen RAM vergleichsweise billig. **SDRAM** sollte nicht mit **SRAM** verwechselt werden. SRAM ist der sog. statische RAM und ist in punkto Geschwindigkeit seinen dynamischen Pendanten (DDRAM, SDRAM) weit überlegen. SRAM besteht aus einer gekreuzten Verschaltung von 6 Transistoren (**Flip-Flop**), die zwar sehr schnell sind, aber auch sehr teuer, da viel Platz benötigt wird. Um ein Bit zu speichern sind 6 Transistoren notwendig. Dies ist der Grund, warum SRAM nur da zum Einsatz kommt, wo wenig Speicher mit hoher Geschwindigkeit sehr wichtig ist. Dies ist der **Cache-Speicher** innerhalb des »Prozessor-dies« (**L1-und der L2-Cache**). Er wird aus dem teuren, platzraubenden SRAM gefertigt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in dieser Etappe das Prinzip eines dynamischen RAMs dargestellt, auch

auch wenn das innerhalb einer CPU nicht ganz richtig ist. Um eine »1« zu speichern, muss das Gate des Transistors geöffnet werden. Der nachgeschaltete Transistor wird nun geladen, was einer »1« entspricht. Will man diesen Zustand beibehalten, muss durch den Refresh-Zyklus jede Speicherzelle gelesen werden und nur in dem Fall wieder befüllt werden, wenn ein »voller« Kondensator beim Lesen angetroffen wurde. Verwendet man mehrere Speicherzellen können längere Binärcodes dargestellt werden.

Ist der Computer besser als ein menschliches Gehirn?

Nun, diese Frage lässt sich nicht eindeutig beantworten, da beide ganz unterschiedlich funktionieren. Der Computer ist darauf spezialisiert, in kürzester Zeit eine möglichst große Anzahl an seriellen Rechenoperationen durchzuführen, die also alle nacheinander bearbeitet werden und einer dem Computer bekannten Logik folgen. Darin ist er unschlagbar, wie man z. B. an Schachcomputern erkennen kann, welche in einer sehr kurzen Zeit Millionen Züge vorausdenken können. Im Gegensatz dazu stellt das Gehirn ein massiv parallelisiertes Netzwerk dar. Durch sein stark ausgeprägtes Assoziativvermögen und seine hohe Lernfähigkeit verfolgt das Gehirn einen ganz anderen Ansatz, der in punkto Kreativität und Bandbreite nicht vom Computer geschlagen wird. Das Gehirn hat ca. **30 Milliarden Nervenzellen oder Neuronen**. Jedes Neuron unterhält durchschnittlich 10.000 Verbindungen zu Nachbarzellen. Die CPUs von Computern bewegen sich derzeit bei ca. 100 Millionen Transistoren, also **500 mal weniger als das Gehirn**. Doch solche Vergleiche sind auf Grund der unterschiedlichen Arbeitsweise beider »Rechenmaschinen« und der Zählweise der Recheneinheiten im Gehirn sehr schwierig. Je nachdem welche Zellen oder funktionelle Einheiten berücksichtigt werden, wie beispielsweise **Neuronen, Gliazellen** (Versorgerzellen) und **Synapsen** (funktionelle Kontaktstellen, die die Neuronen untereinander verbinden) ergeben sich stark unterschiedliche Anzahlen (z. B. 100 Billionen Synapsen).

Route: **Bit-Land**

 Etappe: **Zwischenstopp an der Elektronen-Ampel**


Größenvergleich:

1m : 1 μm

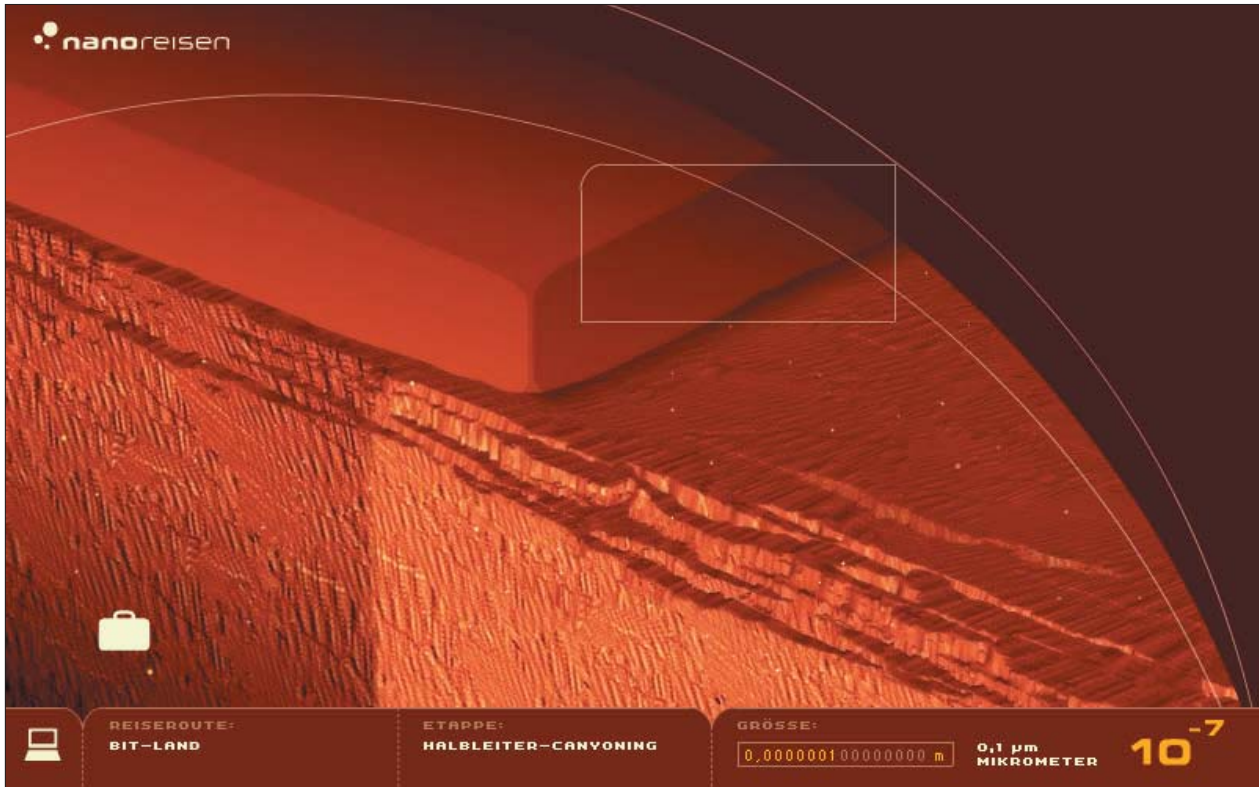
Ø Erde : Breite einer Autobahn

Die Entwicklung des Transistors

Der Transistor wurde ca. 1948 in den **Bell Laboratories** erfunden und ersetzte die bis dahin üblichen Vakuumröhren. Zunächst wurden bipolare Transistoren verwendet, später wurde der sog. Feldeffekttransistor (**FET**) erfunden, bei dem der Strom zwischen **Source** und **Drain** mit Hilfe eines elektrischen Feldes gesteuert wird (geringere Leistung und Verlust) und schließlich der Metalloxid-Halbleiter-FET (**MOSFET**). MOSFETs gestatteten eine extrem kompakte Bauweise, wie sie für die hoch integrierten Schaltungen (**IC**) gebraucht wurden. Heute werden die meisten Schaltkreise in der sog. **CMOS-Technologie** gebaut (complementary metaloxide semiconductor, Komplementärer Metalloxid-Halbleiter). Die CMOS-Technik ist eine Bauweise mit zwei verschiedenen MOSFETs (n- und p-Kanal MOSFET), die zueinander komplementär sind und die im Leerlauf sehr wenig Strom verbraucht.

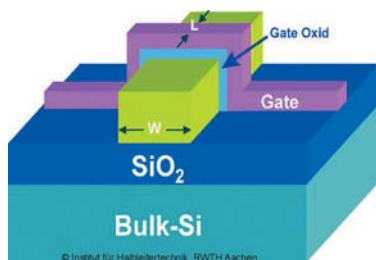
Route: **Bit-Land**

Etappe: **Halbleiter-Canyoning**



Größenvergleich: 1m : 0,1 µm
 Ø Erde : Armlänge

Der Transistor aus zwei Leiterbahnen



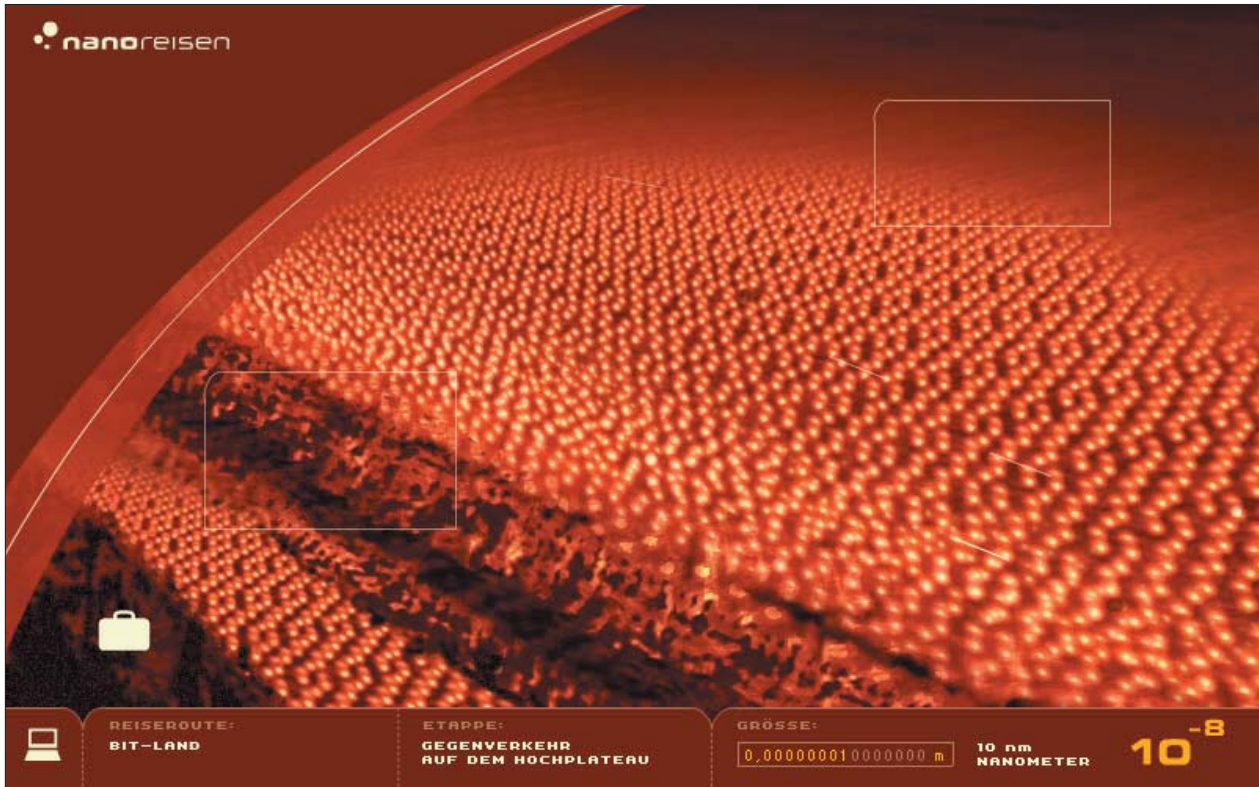
Die Schaltfunktion eines Transistors lässt sich vereinfacht durch zwei einzelne »Bahnen« realisieren. Die **Gateelektrode** liegt über der **Quelle oder Source** und dem **Abfluss oder Drain**. Dazwischen dürfen allerdings keine Elektronen fließen. Nur ein elektrisches Feld garantiert die Steuerfunktion des darunter liegenden Elektronenflusses. Dies ähnelt einem **Gartenschlauch**, durch den Wasser fließt, und auf den man mit dem Schuh tritt, um den Wasserfluss zu unterbinden.

Um diese »Gartenschlauch«-Funktion eines Transistors zu gewährleisten, isoliert ein nicht leitendes Gateoxid den **Source-Drain-Kanal**. Dieser bekommt nur noch das elektrische Feld des Gates zu

spüren (Feldeffekttransistor). Dieses Feld verdrängt den darunter fließenden Strom, wie der Schuh das Wasser aus dem Gartenschlauch.

Um den Stromfluss und damit die Erwärmung weiter zu reduzieren, können in der Zukunft **Kohlenstoff-Nanoröhren**, die sogenannten **Nanotubes**, eingesetzt werden. Da diese den elektrischen Strom leiten, müssen sie nur noch kontaktiert werden. Ein Gate kann auch hier wieder den Stromfluss durch ein elektrisches Feld regulieren.

Route: **Bit-Land**

 Etappe: **Gegenverkehr auf dem Hochplateau**

 Größenvergleich:

1m	:	10 nm
∅ Erde	:	Grapefruit

Silizium – der Stein der Weisen

Das Element Silizium (Symbol Si) ist das Basismaterial unserer heutigen Elektronik. Ohne Silizium gäbe es keine Elektronik und damit keine PCs, keine DVD-Player, keine MP3-Player, keine Mobiltelefone und keine Fensterscheiben. Fensterscheiben bestehen aus Siliziumdioxid, d. h. Silizium im Verbund mit Sauerstoff. In körniger Form kennen wir Siliziumdioxid als Sand. Die für die Elektronik wesentliche Eigenschaft von Silizium ist seine elektrische Leitfähigkeit. Silizium ist ein **Halbleiter**. Bei Halbleitern kann man die elektrische Leitfähigkeit fast nach Belieben einstellen. Ein Halbleiter kann (fast) ein schlecht leitender Isolator sein oder (fast) ein gut leitendes Metall, je nachdem wie man den Halbleiter **dotiert**. Beim **Dotieren** werden dem Halbleiter winzige Mengen anderer Materialien beigefügt und so die Leitfähigkeit eingestellt. Egal ob

CPU, DRAM oder Flash-Speicher das Grundmaterial für die Chips ist immer Silizium. Dazu werden große höchstreine Siliziumblöcke (Einkristalle) in dünne Scheiben (Wafer) gesägt, auf denen dann über komplizierte Verfahren die CPUs, DRAMs oder Flash-Speicher hergestellt werden. Die fertigen Chips werden aus dem Wafer gesägt und in Gehäuse mit elektrischen Anschlüssen verpackt.

Si-Wafer Herstellung



Ein Siliziumkristall. Aus ihm werden einzelne Scheiben, die Wafer, geschnitten.

Am Anfang der Si-Wafer-Herstellung steht Siliziumdioxid d. h. Silizium in chemischer Bindung mit Sauerstoff, welches auch als Sand bekannt ist. Durch hohe Temperaturen und Zugabe von Kohlenstoff kann man den Sauerstoff vom Silizium abtrennen. Übrig bleibt fast reines Silizium. Nur »fast rein« weil es noch ca. 1 % an Verunreinigungen enthält. Notwendig sind aber nur 0.0000001% Verunreinigungen, d. h. dass sich unter 1 Milliarde Siliziumatomen maximal ein Fremdatom aufhalten darf. Für die weitere Reinigung wird das Rohsilizium in Salzsäure aufgelöst. Das dabei entstehende flüssige Trichlorsilan wird verdampft, wodurch die Verunreinigungen zurückbleiben. Das gesäuberte Trichlorsilan wird dann mit hochreinem Wasserstoff wieder zu hochreinem Silizium umgesetzt, welches nun sauber genug für die Wafer Herstellung ist.

Das hochreine Silizium wird in großen Tiegeln aufgeschmolzen. In das flüssige Silizium wird ein winziger Siliziumkristall gesteckt. Dieser **Impfkristall** wird in Drehung versetzt und langsam hochgezogen. Dabei erstarrt immer mehr flüssiges Silizium am Rand des Impfkristalls und dieser wächst und wächst zu einem riesigen **Siliziumkristall von z. B. 30 cm Durchmesser und fast 2 m Länge**. Nun wird dieser Kristall in dünne Scheiben, die Wafer, geschnitten, die so aufwendig gesäubert und poliert werden, dass sich danach noch nicht einmal 100nm große Partikel auf der Oberfläche befinden.

Ein Wort zur Stromrichtung

Die Richtung des Stroms in einem Stromkreis, wurde historisch bedingt von positiven zum negativen Pol festgelegt. Diese Definition wurde von **André Ampère** (1775-1836) damals willkürlich vorgenommen und wird heute **technische Stromrichtung** genannt. Zur damaligen Zeit waren die negativ geladenen Elektronen, die in einem Stromkreis als Ladungsträger vom negativen zum positiven Pol fließen, noch nicht bekannt. Die tatsächliche Richtung des Stromes bezeichnet man als **physikalische Stromrichtung**, sie ist der technischen genau entgegengesetzt und bezieht sich auf die Bewegungsrichtung der Elektronen vom Minus- zum Pluspol.

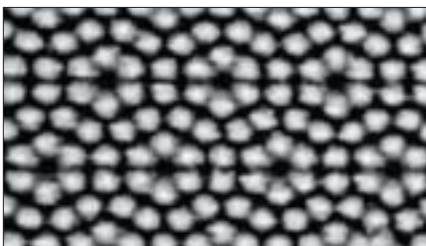
ges Erdkrustenmaterial erstarrt, entstehen in ihm zahllose feine Kristalle aus Quarz, Siliziumdioxid. Quarz ist sehr verwitterungsbeständig, und wenn der Zahn der Zeit das Gestein zerfallen lässt, bleiben Quarzkörner übrig. Die können von Wind und Wasser zu einer Lagerstätte zusammengetragen werden.

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, SiO₂, oder mit Sauerstoff und anderen Elementen wie Aluminium, Magnesium, Kalzium, Natrium, Kalium oder Eisen, 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 Siliziumdioxid ein hervorragender Isolator ist.

Die Oberflächen – Struktur von Silizium



Die Si-7kreuz7-Überstruktur.

Reines Silizium oxidiert an der Luft und bildet eine amorphe (also nicht kristalline) Oxidschicht aus; diese erreicht eine Dicke von wenigen Nanometern bis einigen 10 nm. Die **Blumenmusterstruktur** kann betrachtet werden, wenn das native Oxid unter Vakuumbedingungen entfernt wird und das Silizium eine bestimmte Orientierung besitzt (111). Dies kann man sich so vorstellen: Hat man einen dicken Kristall, so kann man verschiedene Oberflächen erzeugen, je nachdem in welcher Richtung man den Kristall spaltet. Verschiedene Orientierungen haben eine unterschiedliche Symmetrie. Eine dieser Symmetrien ist nun die sog. (111). Eine solche Oberfläche entspannt sich nach dem Spalten, da die obersten Atomlagen nun ihrer Nachbarn beraubt wurden. Diese Entspannung erzeugt eine Überstruktur, die im Falle des (111) – Siliziums ein schönes Blumenmuster ergibt, die sog. **7kreuz7-Überstruktur**.

Impressum

VDI Technologiezentrum GmbH

Graf-Recke-Straße 84
D-40239 Düsseldorf

Telefon +49 (0) 211 62 14-4 01
Fax: +49 (0) 211 62 14-4 84
E-Mail: info@nanoreisen.de
Web: www.vditz.de



Das Projekt wurde gefördert durch das
Bundesministerium für Bildung
und Forschung.

Konzept, Design und Realisierung:

LEKKERWERKEN
Design & Medienkommunikation
Industriestr. 5
D-65197 Wiesbaden
www.lekkerwerken.de

Urheber- und Nutzungsrechte, Haftungshinweis:

Der Inhalt dieses Dokuments ist urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung von Informationen oder Daten, insbesondere die Verwendung von Texten, Textteilen oder Bildmaterial bedarf der vorherigen Zustimmungen der VDI Technologiezentrum GmbH. Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernehmen wir keine Haftung für die Inhalte externer Links.

Bildnachweis

Route Bit-land

AMD Saxony LLC & Co. KG, Dresden:
»Athlon64 CPU«, »Reinraum«

Universität Basel, REM-Labor:
»Milbe – genauer eine Käsemilbe«

**Universität Hamburg, Institut für Angewandte
Physik und Mikrostrukturzentrum**
»Silizium Blumenmuster«,
»Detail Oberflächenstruktur Silizium«

IBM Deutschland GmbH, Mainz:
»Verdrahtungsebenen eines Chips«

Infineon Technologies AG, München:
»Flash-Speicherkarte vor PDA«,
»DRAM –Kurzzeitgedächtnis«,
»Nervenzelle auf Platine«

INTEL, Santa Clara, USA:
»Detail CPU aus dem Jahr 2000«

NVIDIA GmbH, München:
»GPU einer Grafikkarte«

RWTH-Aachen:
»MOSFET-Transistor aus 2 Leiterbahnen«,
»Schema Aufbau Transistor«

Siltronic AG, München:
»Herstellung Silizium-Wafer«

Toshiba Europe GmbH, Neuss:
»4GB Festplatte neben 2 EUR Münze«,
»HD –Langzeitgedächtnis«

VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf:
»Schema Flash-Speicher«,
»Schema TFT-Aufbau«,
»Vergleich DVD und CD«,
»Schema Datenspeicherung Land/Pit«

Carl-Zeiss SMT AG, Oberkochen:
»Schema der Photolithographie«