

Chip-Herstellung im Intel-Reinraum: Nur Roboterhände dürfen die spiegelnden Siliziumscheiben berühren

Computer

„Kennst du deine Fehler?“

Vor 25 Jahren stellte die Firma Intel den ersten Mikroprozessor vor. Der miniaturisierte Computer von der Größe eines Fingernagels löste eine unvorhergesehene Elektronik-Revolution aus. Heute beherrscht der Chip-Gigant Intel den Markt für die Computerbausteine und treibt die Computerindustrie in ein Preis-Leistungs-Wettrennen.

Die weiß verummten Gestalten mustern Zahlenkolonnen und Diagramme auf den Monitoren. Ihre Schutzkleidung läßt nur einen schmalen Sehschlitz für die Augen frei, der voluminöse Overall zwingt seine Träger zu einem leicht watschelnden Gang, Schläuche, die in kleine Rucksäcke münden, geben ihnen das Aussehen von Astronauten. Speziallampen tauchen die Szenerie in schattenloses gelbes Licht.

Das Objekt, dem die Mühe der seltsamen Gestalten gilt, bekommen die Beschäftigten von Intels „D2 Fab“ nur selten, und dann meist unter dem Mikroskop, zu Gesicht: Auf spiegelnden Siliziumscheiben wächst in den hermetisch verschlossenen Produktionsapparaturen Schritt für Schritt das Schaltungsgeflecht von Mikroprozessoren heran.

Die Monitore geben Auskunft über den Fortschritt der chemischen Prozesse im Inneren der Anlage. Berühren dürfen die Kleinodien nur Roboterhände mit ihren leise zischenden Vakuumgreifern. Operateure, deren Tätigkeit auch nur die Nähe zu ungeschützten Chipoberflächen erfordert, müssen einen Helm tragen,

der die in der Lunge verunreinigte Atemluft vom Gesicht absaugt. Durch eine Filterpatrone auf dem Rücken wird sie in den bis an die Grenze des technisch Machbaren staubfreien „Reinraum“ entlassen.

Allgegenwärtige Leuchtanzeigen verkünden neben technischen Daten auch immer wieder eindringliche Mahnungen: „Kennst du deine Fehler?“ Die doppeldeutige Botschaft soll ins Gedächtnis rufen, was dem Augenschein entzogen ist: Ein einziges unsichtbares Schmutzpartikel – in der Sprache der Techniker ein „Fehler“ – vernichtet die elektronischen Zentralorgane, die zukünftig Computer antreiben sollen.

Erst in zehntausendfacher Vergrößerung wird diese Mikrowelt menschlichen Maßstäben zugänglich. Dann hätte der etwa daumennagelgroße Chip die Größe eines Fußballplatzes, und doch müßte sich der Betrachter auf alle Viere niederlassen, um die fein verästelten Strukturen von nunmehr (in der Vergrößerung) knapp vier Millimeter Breite unterscheiden zu können. So klobig wie ein Fußball fiele in dieser Dimension ein einziger

Pflanzenpollen zerstörerisch auf die filigranen Strukturen.

Zu solchen Gedankenspielen nehmen sich die Operateure von D2 keine Zeit. Ihr Job ist der Fortschritt. Vor genau 25 Jahren hat Intels Kunststück, in dem ersten Mikroprozessor 2300 Transistoren zu vereinen, die Fachwelt verblüfft – es war die Geburtsstunde jener Technik, die manche für ebenso epochal halten wie die Erfindung des Buchdrucks.

Inzwischen liegt die Bestmarke bei 5,5 Millionen Schaltelementen (auf einem Mikroprozessor des Typs Pentium Pro). Der Prozessor – das zentrale Steuerorgan eines Computers – führt die Rechenschritte des ihm vorgegebenen Programms mit Geschwindigkeiten von über 200 Millionen Operationen pro Sekunde aus. Sein Urahn galt schon mit 60000 Befehlen pro Sekunde als rasend schnell.

In D2 reift bereits die nächste Generation heran. Der neue Rekord muß fallen, so will es „Moore's Law“, das Gesetz der Computerbranche, wonach sich die Rechenleistung der Chips in konstanten Zeitintervallen verdoppelt (siehe SPIEGEL-Gespräch Seite 221). Mit dem Ge-



A. FREEBERG

nerationswechsel der Prozessoren, ausgedrückt in den Typenkürzeln wie 286, 386 oder Pentium, gibt Intel den Takt vor, nach dem die Computerindustrie tickt.

Die Milliardenindustrie der Mikroelektronik entstand, so wirkt es im Rückblick, durch eine Kette von Zufällen. Die Intel-Gründer Gordon Moore und Bob Noyce wollten Ende der sechziger Jahre einer damals brandneuen Speichertechnologie zum Durchbruch verhelfen.

Zu jener Zeit bestand das Gedächtnis der klobigen Großcomputer noch aus sogenannten Kernspeichern, kunstvoll geflochtenen Drahtnetzen, in denen unterschiedlich magnetisierte Metallringe die Information repräsentieren. Intels Speicherbausteine merkten sich die Daten hingegen als elektrische Ladungsmuster auf vergleichsweise winzigen Siliziumchips – eine Technik, die zur Grundlage der Mikroelektronik wurde.

„Wir suchten nach Absatzmöglichkeiten für diese Speicherchips“, erinnert sich Moore, „doch die etablierten Hersteller von Rechenmaschinen hatten schon ihre Lieferanten.“ Nur eine „drittklassige japanische Firma“ namens Busicom, die gerade in das Geschäft einsteigen wollte, habe damals Interesse an einer Zusammenarbeit gezeigt. Busicom hatte im Jahr 1969 große Pläne: Sie verlangte von Intel die Herstellung von zwölf mikroelektronischen Bausteinen für einen Tischrechner.

Diesen Entwicklungsaufwand hätte die frisch gegründete Firma nie leisten könnten. Der junge Ingenieur Ted Hoff, Intel-Angestellter Nummer 12, konnte die Auftraggeber davon überzeugen, daß es sinnvoller sei, statt der zahlreichen Spezialbausteine einen Universalschaltkreis zu schaffen, der durch entsprechende Programme in der Lage wäre, alle anfallenden Rechenaufgaben zu er-

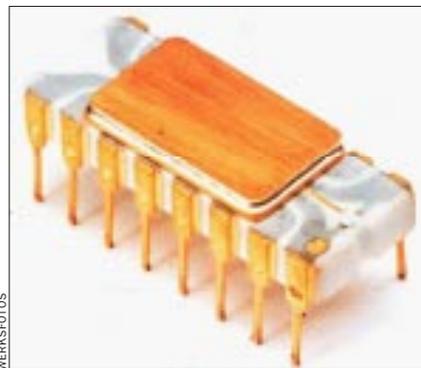
ledigen. Der im November 1971 offiziell vorgestellte Chip mit der Bezeichnung „4004“ wurde zum Urahn der Mikroprozessoren.

Wer visionäres Pathos erwartet, ist von Hoff enttäuscht. „Wir wollten keine Revolution“, sagt er heute, „wir wollten nur das Beste für unseren Kunden.“ Erst vor kurzem bekam der Mann mit dem Buchhalter-Charisma das 1973 beantragte Patent für den Schaltkreis zugesprochen. Geprägt von dem langjährigen Rechtsstreit, arbeitet er inzwischen für eine juristische Beratungsfirma.

Die Intel-Marketingstrategen waren auf das Speicher-Geschäft eingeschworen und warnten vor dem Engagement bei den Prozessoren. „Wir sind zu spät dran“, bekam Hoff zu hören. Den Computerbedarf im Jahr 1971 schätzten die Fachleute auf 20 000 Geräte. Der Witzling Intel könne vielleicht einen Marktanteil von zehn Prozent erreichen, und für die 2000 Zentralschaltkreise lohne sich der Aufwand nicht.

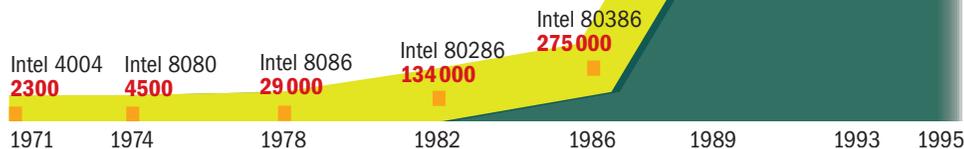
Doch Andy Grove, heute Intel-Chef, verstand, daß man Bedarf auch herstellen kann. Als der Erzrivale Motorola mit dem technisch überlegenen 68 000-Prozessor an Boden gewann, schwor er die Intel-Angestellten auf die Operation „Crush“ ein. Förmlich „zermalm“ werden sollte der Gegner, indem Groves Agenten die noch junge Industrie unermüdlich auf die Intel-Architektur und auf gemeinsame Entwicklungsziele festlegten.

Die Bulldozer-Strategie wirkt bis heute fort. Intel-kompatible Rechenbausteine anderer Hersteller werden im offiziellen Firmen-Sprachgebrauch grundsätzlich „Imitationen“ genannt. Auf Erkundigungen nach solchen Produkten antwortet der gebürtige Ungar Grove mitunter schroff: „Gute Frage. Nächste Frage.“



WERKSFOTOS

Erster Mikroprozessor 1971 (Typ 4004)



Chip des „Pentium“-Mikroprozessors

Inside Intel
Komplexität der Mikroprozessortypen

DER SPIEGEL

entstehen so Jahr für Jahr neue Fertigungsstätten.

Die jeweils modernsten Anlagen stellen zunächst die jeweils neuesten Prozessoren zum höchsten Preis her. Etwa drei Jahre lang bleibt der Prozessor-Typ aktuell, während dieser Zeit verkleinern die Designer die Schaltung weiter, dadurch steigt die Ausbeute an Chips pro Siliziumscheibe, der Preis fällt. Was bis dahin zu den Mittelklassemodellen zählte, wird zum Wegwerfartikel und verschwindet schließlich ganz aus dem Sortiment.

Die Optimierung der Schaltungen bewirkt immer auch eine Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeiten. So wächst zum Beispiel die Taktrate der Pentium-Prozessoren im Mittel jede Woche um eine Million Zyklen pro Sekunde.

Dieses Fortschrittskarussell in Gang zu halten, ist auch für den Riesen Intel ein ständiger Drahtseilakt. Über 250 Prozeßschritte sind nötig, um auf dem Silizium die Elektronen-Avenuen und Datenstraßen des Mikro-Rechenwerks anzulegen. Rund einen Monat dauert die Herstellung eines Chips: Rund 20 verschiedene Muster von Schaltstrukturen werden auf lichtempfindlichen Lack projiziert und durch Ätzen oder das Aufbringen von metallischen oder isolierenden Schichten im Silizium verewigt.

Dieses komplexe Wechselspiel aus physikalischen und chemischen Prozessen läßt sich nicht mehr bis ins Detail vorherbestimmen. Und doch muß das Herstellungsverfahren unter exakter Kontrolle bleiben. Diesen Widerspruch löst Intel durch das unerbittliche Regiment der „exakten Kopie“: Jedes im D2-Labor entwickelte Herstellungsverfahren muß in jeder der über die Welt verstreuten Intel-Fabriken durch detailgetreue Imitation in kürzester Zeit zum gewünschten Ergebnis führen.

Selbst scheinbar Unwichtiges kann entscheidend sein. So kam einmal ein Techniker auf die Idee, die offenbar unproduktive Wartezeit eines Roboters zwischen zwei Bearbeitungsschritten zu verkürzen. Erst als daraufhin der Ausschuß dramatisch zunahm, zeigte sich, daß die Pause wichtig war, um die Siliziumscheiben nach der vorherigen Wärmebehandlung auf eine bestimmte Temperatur abkühlen zu lassen.

„Wir erfassen jedes Detail“, erläutert der stets unergründlich lächelnde Chef-technologe Sunlin Chou. „Es gibt hier zum Beispiel einige Gasleitungen, die im Bogen um Säulen herumlaufen. Wir stellen uns ernsthaft die Frage, ob diese Bögen nicht auch in anderen Fabriken installiert werden müssen, auch wenn dort keine Säulen stehen.“

„Nur der Paranoide überlebt in diesem Geschäft“, faßt Andy Grove seine Managementphilosophie zusammen. Auch Intel, der mit etwa 90 Prozent Marktanteil unschlagbar wirkende Prozessor-Gigant, müsse ständig befürchten, von einem pfiffigen Newcomer ausgetrickst zu werden.

Der institutionalisierte Verfolgungswahn läßt Intel die Fortschrittspirale unbeirrt weiterdrehen: Nie gab es fürs Geld soviel Rechenleistung, Speicherkapazität und Festplattenplatz wie heute – oder morgen oder nächste Woche.

Inzwischen fertigt Intel zu den aktuellen Prozessoren auch gleich komplette Hauptplatinen, die PC-Hersteller dann nur noch in Gehäuse mit eigenem Firmenlogo einbauen müssen. „Zuerst warf man uns vor, wir wollten damit kleine Firmen vom Markt drängen“, erläutert Parker, „doch dann hat die Industrie verstanden, daß wir ihnen das Risiko abnehmen, auf ihren veralteten Entwicklungen sitzenzubleiben.“



Intel-Pioniere Grove, Noyce, Moore
„Nur der Paranoide überlebt“

Veraltet sind die technischen Wunderwerke nämlich schon innerhalb von Wochen. „Wie auf dem Fischmarkt“, meint Gordon Moore, „am Nachmittag fängt die Ware an zu stinken.“

Immerhin machte Intel dieses Jahr ein erstes Zugeständnis an die dauergestreßte Branche: Die traditionelle November-Preissenkung entfällt, die Einführung von „MMX“-Pentiumprozessoren mit neuen Zusatzbefehlen wurde in das nächste Jahr verschoben. Zu groß war die Angst der Händler, potentielle Weihnachtskäufer könnten mit der Anschaffung warten, bis der Preisverfall der neuen Topmodelle eintritt.

Andy Grove vergleicht das PC-Geschäft gern mit der Modeindustrie, wo allein schon der Reiz des Neuen Besitzwünsche weckt. Doch was wäre, wenn die Gier nach immer mehr Rechenleistung plötzlich nicht mehr im Trend läge?

Gerry Parker hat da keine Bange: „Meist wissen die Kunden nicht, daß sie eine neue Maschine brauchen. Bis wir sie ihnen zeigen.“