



Mikrowelten – Geschichten der Computertechnik – Teil 7: Der Zukunftsprozessor

Description

Die meisten CPUs sind Kopien bekannter Konzepte. Wenn überhaupt, verbessern sie die Geschwindigkeit. Oft sind sie nur günstigere Versionen teurer Modelle, was auf einer geringeren Leistung beruht, um Produkte für ein kleineres Budget zu bieten. Doch es gibt Prozessoren, die durch neue Ideen und Architektur einen großen technischen Sprung bedeuten. Neben dem 6502 und den bereits beschriebenen Intel-Prozessoren trifft dies auf den Motorola 68000 zu.

Die Galvin Manufacturing Corporation

1928 ersteigerten die Brüder Paul V. und Joseph E. Galvin bei einer Auktion für 750 Dollar die Pläne und Produktionsanlagen der bankrotten Stewart Battery Company für Batterie-Eliminatoren. Ein Batterie-Eliminator ist ein Gerät, das von einer anderen Stromquelle als einer Batterie gespeist wird und diese in eine geeignete Gleichspannung umwandelt, die von einem zweiten Gerät verwendet werden kann, das für den Betrieb mit Batterien vorgesehen ist. Das macht den Batteriewechsel überflüssig, kann aber den Vorteil der Tragbarkeit zunichtemachen. Er ist auch ein effektiver Ersatz für veraltete Batterietypen.

Nach dem Erwerb gründeten die Brüder ihr Unternehmen in Chicago. Die Galvin Manufacturing Corporation richtete ihr Geschäft in einem kleinen Teil eines gemieteten Gebäudes ein. Das Werk verfügte über ein Betriebskapital von 565 Dollar und fünf Angestellte. Die Lohnsumme der ersten Woche betrug 63 Dollar.

Die ersten Produkte des Unternehmens waren die besagten Batterie-Eliminatoren. Mit denen konnten batteriebetriebene Radios mit Haushaltsstrom betrieben werden. Aufgrund des Fortschritts in der Funktechnologie wurden diese bald überflüssig. Paul Galvin erfuhr, dass einige Radiotechniker Geräte in Autos einbauten, und forderte seine Ingenieure auf, ein preiswertes Autoradio zu entwickeln, das in die meisten Fahrzeuge eingebaut werden konnte. Sein Team war erfolgreich, und Galvin konnte auf der Tagung der Radio Manufacturers Association im Juni 1930 in Atlantic City ein funktionsfähiges Modell des Radios vorführen. Er brachte genügend Aufträge mit nach Hause, um das Unternehmen am Laufen zu halten.

Paul wollte einen Markennamen für das neue Autoradio der Galvin Manufacturing Corporation und schuf den Namen „Motorola“, indem er „motor“ (für Auto) mit „ola“ (von Victrola, ein Warenzeichen für Grammophone) verband, was zu dieser Zeit auch eine beliebte Endung für viele Unternehmen war. Das Unternehmen verkaufte sein erstes Radio der Marke Motorola am 23. Juni 1930 für 30 Dollar an H.C. Wall aus Fort Wayne, Indiana. Der Markenname Motorola wurde so bekannt, dass die Galvin Manufacturing Corporation 1947 ihren Namen in Motorola, Inc. änderte.

Das noch junge Unternehmen begann im November 1930 mit dem Verkauf von Motorola-Autoradioempfängern an Polizeidienststellen und Gemeinden. Viele Produkte von Motorola haben mit Funkgeräten zu tun, angefangen bei einem Batterieentferner für Funksprechgerät, über das erste tragbare Walkie-Talkie der Welt im Jahr 1940, Verteidigungselektronik, zelluläre Infrastrukturausrüstung und Mobiltelefonherstellung. Im selben Jahr baute das Unternehmen sein Forschungs- und Entwicklungsprogramm mit Dan Noble auf, einem Pionier auf dem Gebiet des UKW-Radios und der Halbleitertechnologien, der der Firma als Forschungsleiter beitrug. Während des Zweiten Weltkriegs stellte das Werk das tragbare AM-Radio SCR-536 her, das für die Kommunikation der Alliierten unerlässlich war. Motorola rangierte unter den amerikanischen Unternehmen auf Platz 94, was den Wert der militärischen Produktionsverträge des Zweiten Weltkriegs betraf.

Motorola ging 1943 an die Börse. Nach der Umbenennung 1947 bestand das Hauptgeschäft in der Herstellung und dem Verkauf von Fernsehgeräten und Radios.

Funk und Fernsehen

Im Oktober 1946 führten Kommunikationsgeräte von Motorola die ersten Gespräche über den neuen Autofunkdienst der Illinois Bell-Telefongesellschaft in Chicago. 1947 begann das Unternehmen mit der Herstellung von TV-Geräten, und zwar mit dem Modell VT-71 mit 7-Zoll-Kathodenstrahlröhre. 1952 eröffnete Motorola seine erste internationale Tochtergesellschaft in Toronto, Kanada, um Radios und Fernsehgeräte herzustellen. 1953 wurde die Motorola-Foundation gegründet, um führende Universitäten in den Vereinigten Staaten zu unterstützen.

1955 stellte Motorola den weltweit ersten kommerziellen Hochleistungstransistor auf Germaniumbasis vor. Im selben Jahr wurde das heutige Fledermaus-Logo eingeführt, das von dem preisgekrönten Chicagoer Grafikdesigner Morton Goldsholl Ende 1954 entworfen worden war.

Im Jahr 1960 stellte das Unternehmen das weltweit erste tragbare (19-Zoll), transistorisierte und schnurlose Großbildfernsehgerät vor. Laut dem Illinois Manufacturers Directory von 1962 beschäftigte Motorola weltweit 14.000 Mitarbeiter, von denen mindestens 5.823 in 6 Werken in Illinois tätig waren.

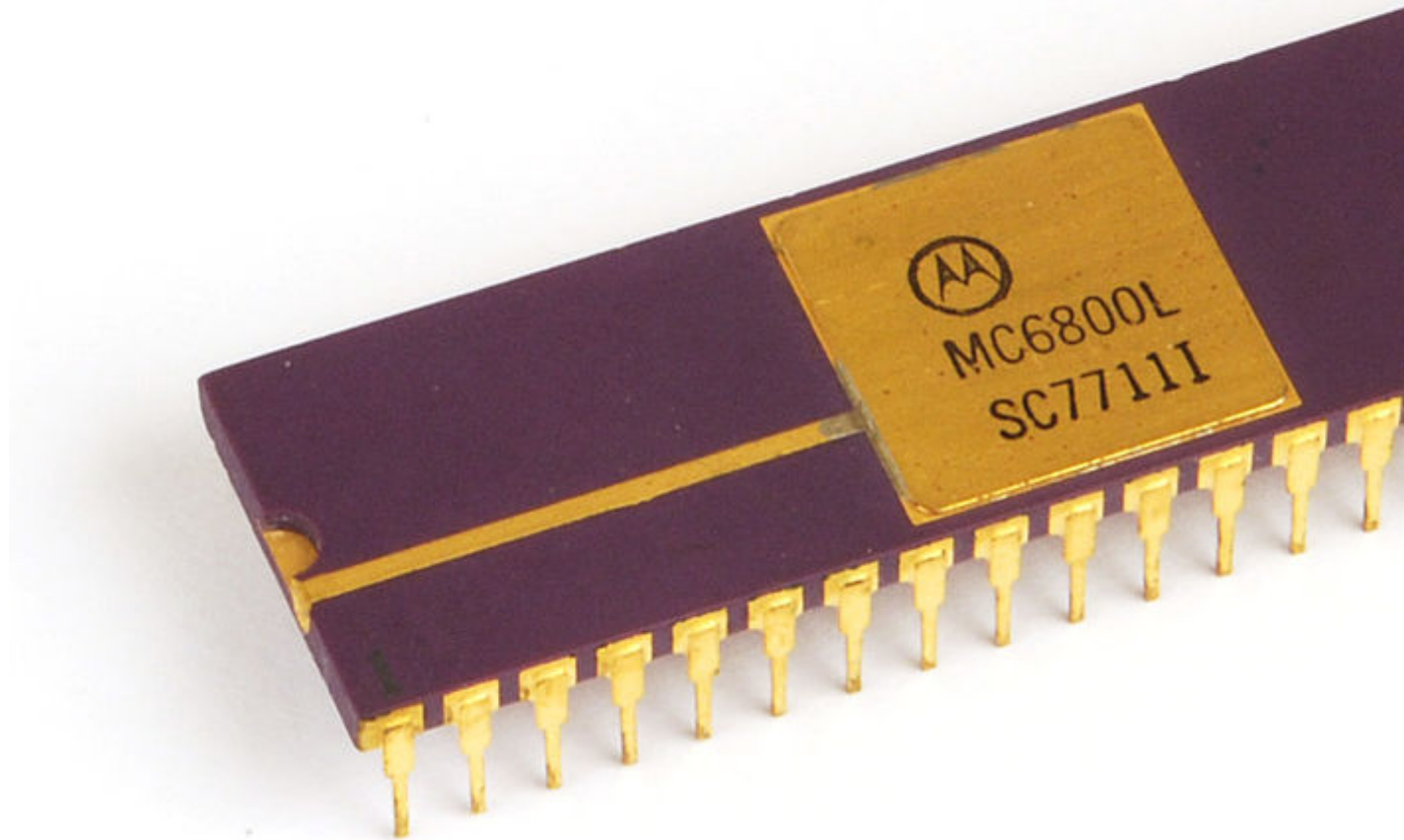
Ab 1958, mit Explorer 1, lieferte die Firma jahrzehntelang Funkgeräte für die meisten NASA-Raumflüge, auch für die Mondlandung 1969. Ein Jahr später gründete das Unternehmen eine Tochtergesellschaft, um Lizenzen zu vergeben und Produkte für internationale Märkte herzustellen. Motorola entwickelte zahlreiche Erzeugnisse für die Regierung, für die öffentliche Sicherheit, Unternehmen und für die breite Öffentlichkeit.

Auf zum Mikroprozessor

1963 führte das Unternehmen die erste rechteckige Farbbildröhre ein. 1964 eröffnete Motorola seine erste Forschungs- und Entwicklungsniederlassung außerhalb der Vereinigten Staaten, in Israel, unter der Leitung von Moses Basin. Die modulare Marke Quasar wurde 1967 eingeführt.

Neil Armstrong sprach übrigens die berühmten Worte „ein kleiner Schritt für einen Mann, ein großer Sprung für die Menschheit“ vom Mond aus mit einem Motorola-Sendeempfänger.

Im Jahr 1973 stellte das Unternehmen das erste tragbare Telefon vor. 1974 war es dann soweit: Motorola präsentierte seinen ersten Mikroprozessor, den 8-Bit-MC6800, vor, der in der Automobil-, Computer- und Videospieleindustrie eingesetzt wurde. Im selben Jahr verkaufte die Firma sein Fernsehgeschäft an den japanischen Konzern Matsushita – die Muttergesellschaft von Panasonic.



Motorola MC6800 (Foto: Wikipedia)

Obwohl es sich beim MC6800 um ein leistungsfähiges Design handelte, wurde es von besseren Designs, wie dem Zilog Z80, und preiswerteren CPUs, wie dem MOS Technology 6502, in den Schatten gestellt. Als sich die Verkaufsaussichten des 6800 eintrübten, begann Motorola mit einer neuen Architektur, um ihn zu ersetzen. Daraus wurde das 1976 begonnene Projekt Motorola Advanced Computer System on Silicon (MACSS).

MACSS

Ziel des MACSS war die Entwicklung einer völlig neuen Architektur ohne Rückwärtskompatibilität mit dem 6800. Letztendlich wurde ein Busprotokoll-Kompatibilitätsmodus für bestehende 6800-Peripheriegeräte beibehalten, und es wurde eine Version mit einem 8-Bit-Datenbus produziert. Die Entwickler konzentrierten sich hauptsächlich auf die Zukunft, d. h. die Vorwärtskompatibilität, die dem

68000-Design einen Vorsprung gegenüber späteren 32-Bit-Befehlssatzarchitekturen (ISAs) verschafft. So sind beispielsweise die CPU-Register 32 Bit breit, obwohl nur wenige in sich geschlossene Strukturen im Prozessor selbst auf 32 Bit gleichzeitig arbeiten. Das MACSS-Team ließ sich stark von der Entwicklung von Minicomputer-Prozessoren wie der PDP-11 und der VAX beeinflussen, die ebenfalls auf Mikrocodes basieren.

Mitte der 1970er Jahre drängten die Hersteller von 8-Bit-Mikroprozessoren auf die Einführung der 16-Bit-Generation. National Semiconductor war mit seinen IMP-16- und PACE-Prozessoren in den Jahren 1973-1975 der erste Hersteller, aber diese hatten Probleme mit der Geschwindigkeit. Intel hatte seit 1975 an seinem fortschrittlichen 16/32-Bit Intel iAPX 432 (alias 8800) und seit 1976 am 8086 gearbeitet. Der wurde 1978 eingeführt, setzte sich aber erst einige Jahre später in Form des fast identischen 8088 im IBM-PC durch. Durch den späten Einstieg in die 16-Bit-Welt verfügt der neue Prozessor über mehr Transistoren (etwa 40.000 im Vergleich zu 20.000 im 8086), 32-Bit-Makrobefehle und eine höhere Benutzerfreundlichkeit.



Zwei Hitachi 68HC000 CPUs werden auf einer Arcade Spiel Leiterplatte verwendet (Foto: Wikipedia)

Der ursprüngliche MC68000 wurde in einem HMOS-Prozess mit einer Strukturgröße von 3,5 µm hergestellt. Er wurde im September 1979 offiziell vorgestellt, erste Muster kamen im Februar 1980 auf den Markt, und ab November waren Chips für die Produktion erhältlich. Die ersten Geschwindigkeitsstufen waren 4, 6 und 8 MHz. 10-MHz-Chips wurden im Laufe des Jahres 1981 und 12,5-MHz-Chips im Juni 1982 verfügbar. Zur Erinnerung: Der 1982 veröffentlichte Commodore 64 mit seinem 6510 Prozessor von MOS Technology kam damals nur auf rund 1 MHz. Der 1982 von Intel eingeführte 80286 Prozessor startete mit 4 MHz.

Zu spät?

IBM zog den 68000 für den IBM-PC in Betracht, entschied sich aber für den Intel 8088, weil der 68000 noch nicht fertig war. Walden C. Rhines schrieb, dass damit „Motorola mit seiner überlegenen Technologie den wichtigsten Designwettbewerb der letzten 50 Jahre verloren hat“.

Der 68k-Befehlssatz ist besonders gut für die Implementierung von Unix geeignet, und der 68000 und seine Nachfolger wurden die dominierenden CPUs für Unix-basierte Workstations, einschließlich Sun-Workstations und Apollo/Domain-Workstations. Er wurde auch für Massenmarkt-Computer wie den Apple Lisa, Macintosh, Amiga und Atari ST verwendet. Ebenso in Microsoft Xenix-Systemen sowie in einem frühen NetWare Unix-basierten Server. Auch in der ersten Generation von Desktop-Laserdruckern kam er zum Einsatz, darunter der ursprüngliche Apple Inc. LaserWriter und der HP LaserJet.

Mitte bis Ende der 1980er Jahre, als es noch nach einem Dreikampf zwischen IBM-PC, Commodore mit Amiga und dem Atari ST aussah, hatte der Motorola-Prozessor eine hohe Verbreitung und das letztlich der PC das Rennen machte, lag am wenigsten an der CPU. Nicht auszudenken, wie der Prozessormarkt heute aussehen würde, hätte sich IBM etwas später für den PC entschieden oder wäre Motorola etwas früher dran gewesen.

1981 wurde das Motorola 68000 Educational Computer Board auf den Markt gebracht, einen Einplatinencomputer für Bildungs- und Ausbildungszwecke, der neben dem 68000 selbst Speicher, E/A-Geräte, einen programmierbaren Timer und einen Wire-Wrap-Bereich für kundenspezifische Schaltungen enthielt. Das Board wurde bis in die frühen 1990er Jahre an US-Colleges als Hilfsmittel zum Erlernen der Assembler-Programmierung eingesetzt.

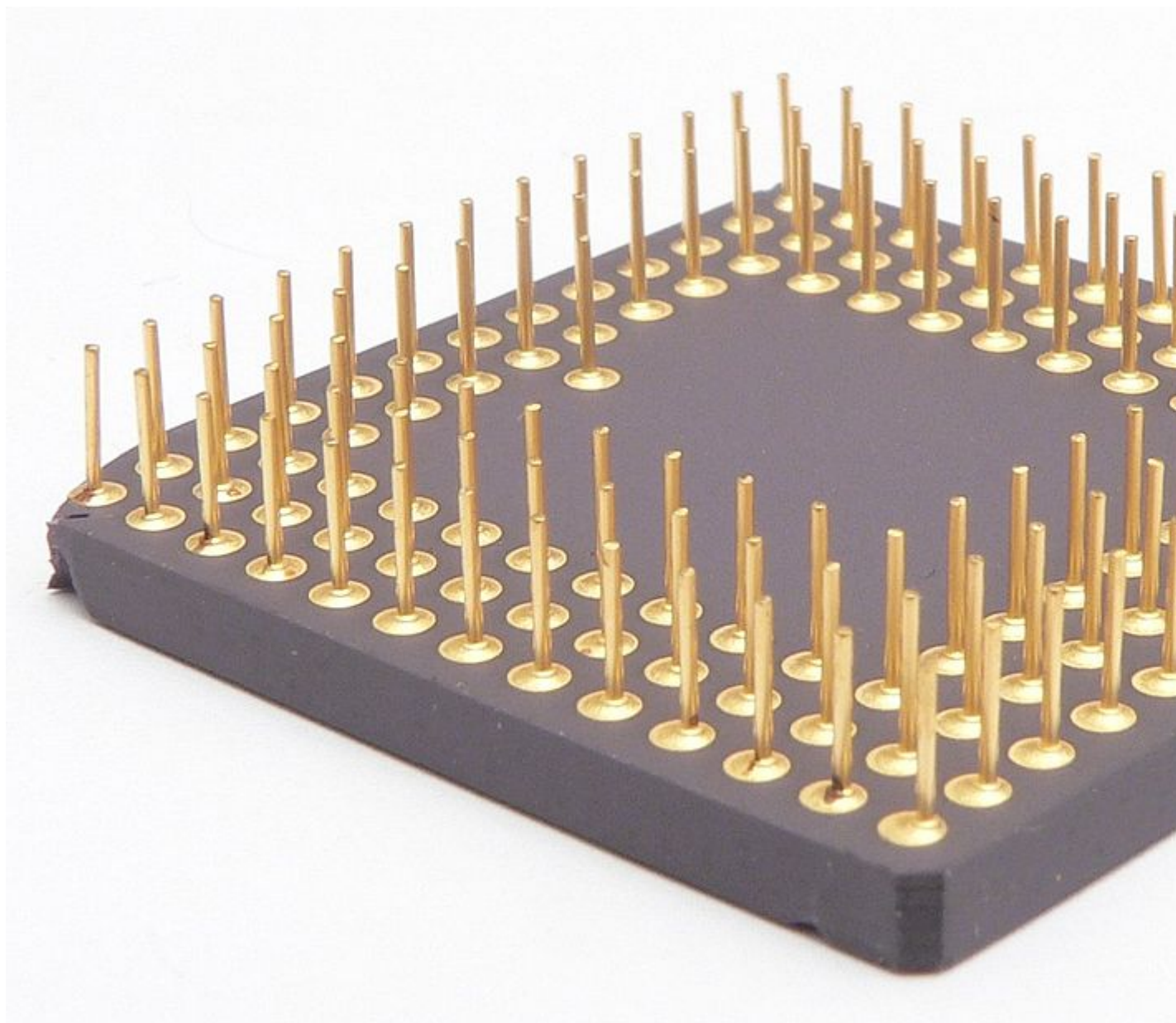
1982 wurde die Befehlssatzarchitektur (ISA) des 68000 geringfügig aktualisiert, um virtuellen Speicher zu unterstützen und den Virtualisierungsanforderungen von Popek und Goldberg zu entsprechen. Der aktualisierte Chip wird 68010 genannt. Er fügt auch einen neuen „Schleifenmodus“ hinzu, der kleine Schleifen beschleunigt und die Gesamtleistung bei gleichen Taktraten um etwa 10 % erhöht. Eine weitere erweiterte Version, die 31 Bits des Adressbusses freilegt, wurde ebenfalls in kleinen Stückzahlen als 68012 produziert.

Um kostengünstigere Systeme und Steuerungsanwendungen mit kleineren Speichergrößen zu unterstützen, führte Motorola ebenfalls 1982 den 8-Bit-kompatiblen MC68008 ein. Dabei handelt es sich um einen 68000 mit einem 8-Bit-Datenbus und einem kleineren (20-Bit-)Adressbus. Nach 1982 widmete Motorola den Projekten 68020 und 88000 mehr Aufmerksamkeit.

Bemerkenswerte Architektur

Der 68000 hat einen externen 24-Bit-Adressbus und zwei Byte-Select-Signale. Diese 24 Leitungen können daher 16 MB physikalischen Speicher mit Byte-Auflösung adressieren. Für die Adressenspeicherung und -berechnung werden intern 32 Bits verwendet. Die 8 höherwertigen Adressbits werden jedoch aufgrund des Fehlens von Gerätepins ignoriert. Dies ermöglicht die Ausführung von Software, die für einen logisch flachen 32-Bit-Adressraum geschrieben wurde,

während auf einen physikalischen Adressraum von nur 24 Bit zugegriffen wird. Mit dem internen 32-Bit-Adressraum verfolgte Motorola das Ziel der Vorwärtskompatibilität, so dass es möglich war, 68000-Software zu schreiben, die die Vorteile späterer 32-Bit-Implementierungen des Befehlssatzes voll ausnutzen konnte.



Ansicht von unten auf einen Motorola XC68020 (Foto: Wikipedia)

Dies hinderte die Programmierer jedoch nicht daran, inkompatible Software zu schreiben. „24-Bit“-Software, die das obere Adressbyte verwarf oder es für andere Zwecke als die Adressierung verwendete, konnte bei 32-Bit-Implementierungen des 68000 fehlschlagen. Frühe Versionen (vor 7.0) von Apples Mac OS verwendeten beispielsweise das obere Byte von Speicherblock-Masterzeigern, um Flags wie „locked“ und „purgeable“ zu speichern. Spätere Versionen des Betriebssystems verschieben die Flags an eine nahegelegene Stelle, und Apple begann mit der Auslieferung von Computern mit „sauberen“ 32-Bit-ROMs, beginnend mit der Veröffentlichung des Mac IIci von 1989.

Die CPU hat acht 32-Bit-Allzweck-Datenregister (D0-D7) und acht Adressregister (A0-A7). Dies war in vielerlei Hinsicht eine gute Anzahl von Registern zu dieser Zeit. Sie war klein genug, um es dem 68000 zu ermöglichen, schnell auf Interrupts zu reagieren und dennoch groß genug, um die meisten Berechnungen schnell zu machen, da sie vollständig innerhalb des Prozessors durchgeführt werden konnten, ohne Teilergebnisse im Speicher zu halten.

Man beachte, dass eine Ausnahmeroutine im Supervisor-Modus auch den Benutzer-Stack-Pointer A7 speichern kann, was insgesamt 8 Adressregister ergeben würde. Das Design des 68000 mit zwei Stapelzeigern macht dies jedoch normalerweise unnötig, es sei denn, es wird ein Taskwechsel in einem Multitasking-System durchgeführt.

Mit den beiden Registertypen können gleichzeitig eine 32-Bit-Adress- und eine 16-Bit-Datenberechnung bewältigt werden. Dies führt zu einer Verkürzung der Befehlsausführungszeit, da Adressen und Daten parallel verarbeitet werden können.

Der 68000 verfügt über ein 16-Bit-Statusregister. Die oberen 8 Bits sind das Systembyte, und seine Änderung ist privilegiert. Die unteren 8 Bits sind das Benutzerbyte, auch bekannt als Bedingungscode-Register (CCR), und seine Änderung ist nicht privilegiert. Die 68000-Vergleichs-, Arithmetik- und Logikoperationen modifizieren die Bedingungscode, um ihre Ergebnisse zur Verwendung durch spätere bedingte Sprünge aufzuzeichnen.



68000 im Amiga 500

Die Entwickler haben versucht, die Assemblersprache orthogonal zu gestalten. Das heißt, die Anweisungen sind in Operationen und Adressmodi unterteilt, und fast alle Adressmodi sind für fast alle Anweisungen verfügbar. Es gibt 56 Befehle und eine Mindestgröße von 16 Bit. Viele Befehle und Adressierungsmodi sind länger, um mehr Adress- oder Modusbits aufzunehmen.

Die CPU sowie später die gesamte Familie, verfügt über zwei Privilegierungsebenen. Der Benutzermodus erlaubt den Zugriff auf alles, außer auf privilegierte Befehle wie die Steuerung der Unterbrechungsebene. Das Supervisor-Privileg erlaubt den Zugriff auf alles. Ein Interrupt wird immer zum Supervisor. Das Supervisor-Bit wird im Statusregister gespeichert und ist für Benutzerprogramme sichtbar. Ein Vorteil dieses Systems ist, dass die Supervisor-Ebene einen eigenen Stapelzeiger hat. Das ermöglicht es einem Multitasking-System, sehr kleine Stapel für Aufgaben zu verwenden, da die Entwickler nicht den Speicher zuweisen müssen, der erforderlich ist, um die Stapelrahmen eines maximalen Stapels von Interrupts aufzunehmen.

Interrupts und Vektoren

Die CPU kennt sieben Interrupt-Levels. Die Stufen 1 bis 5 sind streng priorisiert. Das heißt, ein Interrupt mit höherer Nummer kann immer einen Interrupt mit niedrigerer Nummer unterbrechen. Im Statusregister kann mit einem privilegierten Befehl die aktuelle Mindestunterbrechungsstufe eingestellt werden, wodurch Unterbrechungen mit niedrigerer oder gleicher Priorität blockiert werden. Wenn beispielsweise der Interrupt-Level im Statusregister auf 3 gesetzt ist, können höhere Level von 4 bis 7 eine Ausnahme auslösen. Level 7 ist ein Level-ausgelöster nicht-maskierbarer Interrupt (NMI). Stufe 1 kann durch jede höhere Stufe unterbrochen werden. Stufe 0 bedeutet keine Unterbrechung. Die Stufe wird im Statusregister gespeichert und ist für Programme auf Benutzerebene sichtbar.

Hardware-Interrupts werden der CPU über drei Eingänge signalisiert, die die höchste anstehende Interrupt-Priorität kodieren. Für Systeme, die nicht mehr als drei Hardware-Interrupts benötigen, ist es allerdings möglich, die Interrupt-Signale direkt an die kodierten Eingänge anzuschließen, was jedoch zu einem höheren Softwareaufwand führt.

Die „Ausnahmetabelle“ (Interrupt-Vektor-Tabelle/Interrupt-Vektor-Adressen) ist auf die Adressen 0 bis 1023 festgelegt, was 256 32-Bit-Vektoren ermöglicht. Der erste Vektor (RESET) besteht aus zwei Vektoren, nämlich der Start-Stack-Adresse und der Start-Code-Adresse. Die Vektoren 3 bis 15 werden zur Meldung verschiedener Fehler verwendet: Busfehler, Adressfehler, illegaler Befehl, Null-Division, CHK- und CHK2-Vektor, Privilegienverletzung (um eine Privilegienerweiterung zu verhindern) und einige reservierte Vektoren, die zu Zeile 1010-Emulator, Zeile 1111-Emulator und Hardware-Haltepunkt wurden. Vektor 24 startet die echten Interrupts: Spurious Interrupt (keine Hardware-Quittierung) und die Autovektoren der Stufen 1 bis 7, dann die 16 TRAP-Vektoren, dann einige weitere reservierte Vektoren und schließlich die benutzerdefinierten Vektoren.

Da der Vektor mit der Startadresse beim Zurücksetzen immer gültig sein muss, enthielten die Systeme üblicherweise einen nichtflüchtigen Speicher (z. B. ROM), der mit der Adresse Null beginnt und die Vektoren und den Bootstrap-Code enthält. Für ein Allzwecksystem ist es jedoch wünschenswert, dass das Betriebssystem die Vektoren zur Laufzeit ändern kann. Dies wurde oft dadurch erreicht, dass die Vektoren im ROM auf eine Sprungtabelle im RAM verwiesen wurden, oder durch Bank-Switching,

damit das ROM zur Laufzeit durch RAM ersetzt werden konnte.

Nicht ganz perfekt

Der 68000 erfüllt nicht die Anforderungen von Popek und Goldberg für eine vollständige Prozessorvirtualisierung, da er nur einen einzigen unprivilegierten Befehl, „MOVE from SR“, besitzt, der der Software im Benutzermodus einen Lesezugriff auf einen kleinen Teil des privilegierten Status ermöglicht. Die 68EC000 und 68SEC000, die späteren Derivate des 68000, erfüllen die Anforderungen.

Der 68000 ist auch nicht in der Lage, virtuellen Speicher zu unterstützen, was die Fähigkeit erfordert, einen fehlgeschlagenen Speicherzugriff zu trappen und wiederherzustellen. Der 68000 bietet zwar eine Busfehler-Ausnahme, die zum Trappen verwendet werden kann, aber sie speichert nicht genug Prozessorstatus, um die fehlerhafte Anweisung wieder aufzunehmen, sobald das Betriebssystem die Ausnahme behandelt hat. Einige Firmen haben es geschafft, 68000-basierte Unix-Workstations mit virtuellem Speicher zu bauen, die mit zwei parallel laufenden 68000-Chips mit unterschiedlichen Taktfrequenzen arbeiteten. Wenn der „führende“ 68000er auf einen fehlerhaften Speicherzugriff stieß, wurde der „Haupt“-68000er durch zusätzliche Hardware unterbrochen, um zu verhindern, dass er ebenfalls auf den fehlerhaften Speicherzugriff stieß. Diese Unterbrechungsroutine wickelte die virtuellen Speicherfunktionen ab und setzte den „führenden“ 68000 in den richtigen Zustand zurück, um den synchronisierten Betrieb fortzusetzen, wenn der „Haupt“-68000 von der Unterbrechung zurückkehrte.

Diese Probleme wurden bei der nächsten größeren Revision der 68k-Architektur mit der Veröffentlichung des MC68010 behoben. Die Ausnahmen „Bus Error“ und „Address Error“ schoben einen großen Teil des internen Zustands auf den Supervisor-Stack, um die Wiederherstellung zu erleichtern, und die Anweisung „MOVE from SR“ wurde privilegiert. Ein neuer unprivilegierter „MOVE from CCR“-Befehl steht zur Verfügung, der von Software im Benutzermodus verwendet werden kann. Ein Betriebssystem kann „MOVE from SR“-Befehle im Benutzermodus trappen und emulieren, falls gewünscht.

68EC000

Der 68EC000 ist eine kostengünstige Version des 68000 mit einer leicht veränderten Pinbelegung, die für eingebettete Steuerungsanwendungen entwickelt wurde. Er kann entweder einen 8-Bit- oder einen 16-Bit-Datenbus haben, der bei Reset umschaltbar ist.

Die Prozessoren sind in verschiedenen Geschwindigkeiten erhältlich, darunter 8- und 16-MHz-Konfigurationen, die jeweils 2.100 und 4.376 Dhrystones erzeugen. Diese Prozessoren haben keine Gleitkommaeinheit, und es ist schwierig, einen FPU-Coprozessor (MC68881/2) mit einem solchen zu implementieren, da der EC-Serie die notwendigen Coprozessorbefehle fehlen.

Der 68EC000 wurde als Controller in vielen Audioanwendungen eingesetzt, u. a. in Musikinstrumenten und Soundkarten von Ensoniq, wo er Teil des MIDI-Synthesizers war. Auf den Soundkarten von Ensoniq bot der Controller mehrere Vorteile gegenüber den Mitbewerbern ohne CPU an Bord. Der Prozessor ermöglichte es, die Karte so zu konfigurieren, dass sie verschiedene Audioaufgaben ausführen konnte, z. B. die MPU-401-MIDI-Synthese oder die MT-32-Emulation, ohne dass ein

Terminate-and-Stay-Resident-Programm erforderlich war. Dies verbesserte die Softwarekompatibilität, senkte den CPU-Verbrauch und eliminierte den Speicherbedarf des Host-Systems.

Der Motorola 68EC000-Kern wurde auch später in den m68k-basierten DragonBall-Prozessoren von Motorola/Freescale verwendet. Er wurde ebenso als Sound-Controller in der Spielkonsole Sega Saturn und als Controller für die HP JetDirect-Ethernet-Controller-Karten für die HP LaserJet-Drucker Mitte der 1990er Jahre eingesetzt.

Prozessorfamilie

Die 68000-Reihe wird meistens in vier Generationen unterteilt. Zur ersten Generation gehört u. a. der 68010, der 1982 auf den Markt kam. Er ist pin-kompatibel mit dem 68000, aber nicht 100% software-kompatibel. Den Prozessor gab es in Geschwindigkeiten zwischen 8 MHz und 16.67 MHz. Er hatte rund 69.000 Transistoren. Atari Games verwendete den 68010 in einigen seiner Arcade-Boards wie dem Atari System 1. Einige Besitzer von Amiga- und Atari ST-Computern und Sega Genesis-Spielkonsolen ersetzten die 68000-CPU ihres Systems durch einen 68010, um einen kleinen Geschwindigkeitsschub zu erhalten.

Der Motorola 68020 kam 1984 heraus und gehört zur zweiten Generation. Es wurde auch eine kostengünstigere Version angeboten, die als 68EC020 bekannt ist. Im Einklang mit der für Motorola-Designs üblichen Namensgebung wird der 68020 gewöhnlich als „020“ bezeichnet, ausgesprochen „oh-two-oh“ oder „oh-twenty“.

Er verfügt über interne und externe 32-Bit-Daten- und Adressbusse, im Vergleich zu den frühen 680x0-Modellen mit 16-Bit-Daten- und 24-Bit-Adressbussen. Die ALU des 68020 ist ebenfalls von Haus aus 32-Bit und kann daher 32-Bit-Operationen in einem Taktzyklus durchführen, während der 68000 aufgrund seiner 16-Bit-ALU mindestens zwei Taktzyklen benötigte. Dank neuerer Gehäusemethoden konnte er mit mehr externen Pins ausgestattet werden, ohne dass er so groß war wie das frühere Dual-in-Line-Gehäuse. Der 68EC020 senkte die Kosten durch einen 24-Bit-Adressbus. Der 68020 wurde mit Geschwindigkeiten von 12 MHz bis 33 MHz hergestellt.

Er verfügt über zusätzliche Anweisungen und Adressierungsmodi. Der 68020 (und 68030) hat eine richtige dreistufige Pipeline. Der 68010 verfügte zwar über einen „Schleifenmodus“, der Schleifen durch einen winzigen Befehls-Cache beschleunigte, doch dieser enthielt nur zwei kurze Befehle und wurde daher kaum genutzt. Der 68020 ersetzte dies durch einen richtigen Befehls-Cache von 256 Byte und war damit der erste Prozessor der 68k-Serie, der einen echten On-Chip-Cache-Speicher besaß.

Die früheren 68000- und 68010-Prozessoren konnten nur auf Wort- (16-Bit) und Langwortdaten (32-Bit) im Speicher zugreifen, wenn diese wortorientiert waren (an einer geraden Adresse). Der 68020 hat keine Ausrichtungsbeschränkungen für den Datenzugriff. Natürlich sind nicht ausgerichtete Zugriffe langsamer, da sie einen zusätzlichen Speicherzugriff erfordern.

Der 68020 hat einen kleinen 256-Byte-Befehls-Cache mit direkter Zuordnung, der aus 64 Vier-Byte-Einträgen besteht. Obwohl er klein ist, hat er die Leistung vieler Anwendungen erheblich verbessert. Die daraus resultierende Verringerung des Busverkehrs war besonders wichtig für Systeme, die stark auf DMA angewiesen waren.

Der 68020 verfügt über eine Coprozessor-Schnittstelle, die bis zu acht Coprozessoren unterstützt. Die Haupt-CPU erkennt „F-Zeilen“-Befehle (bei denen die vier höchstwertigen Opcode-Bits alle eins sind) und verwendet spezielle Buszyklen zur Interaktion mit einem Coprozessor, um diese Befehle auszuführen. Zwei Arten von Coprozessoren wurden definiert: Gleitkommaeinheiten (MC68881 oder MC68882 FPU) und die Paged Memory Management Unit (MC68851 PMMU). Es kann nur eine PMMU mit einer CPU verwendet werden. Im Prinzip könnten mehrere FPUs mit einer CPU verwendet werden, was jedoch nicht üblich ist. Die Coprozessor-Schnittstelle ist asynchron, so dass es möglich ist, die Coprozessoren mit einer anderen Taktrate als die CPU zu betreiben.

Der 68020 wurde in den Personalcomputern Apple Macintosh II und Macintosh LC, den Sun-3-Workstations, dem Amiga 1200 (68EC020-Variante), den Netzwerkanalysatoren der Serie 8711 von Hewlett-Packard, HP 9000/320, HP 9000/330 und dem AM-2000 von Alpha Microsystems verwendet. Der 68020 war ein alternatives Upgrade für den 68008 des Sinclair QL in der Super Gold Card Schnittstelle von Miracle Systems.

Der Amiga 2500 und A2500UX wurden optional mit dem A2620 Accelerator ausgeliefert, der einen 68020, 68881 FPU und 68851 MMU verwendet.

Es ist auch der Prozessor, der in TGV-Zügen verwendet wird, um Signalinformationen zu dekodieren, die über die Schienen an die Züge gesendet werden. Er wird in den Flugsteuerungs- und Radarsystemen des Kampfflugzeugs Eurofighter Typhoon verwendet. Auch in der Telefonzentrale DMS-100 von Nortel Networks wurde der 68020 als erster Mikroprozessor des SuperNode-Rechenkerns verwendet.

68030

Der 68030 wurde 1987 auf den Markt gebracht und zählt noch zur zweiten Generation. Er ist im Wesentlichen ein 68020 mit einer Speicherverwaltungseinheit (MMU) und Befehls- und Datencaches von jeweils 256 Byte. Er fügte einen Burst-Modus für die Caches hinzu, bei dem vier Langwörter in einem einzigen Vorgang in den Cache geladen werden können. Die MMU war größtenteils kompatibel mit dem externen 68851, der mit dem 68020 verwendet wurde, aber da sie intern war, konnte sie einen Zyklus schneller auf den Speicher zugreifen als eine 68020/68851-Kombination. Der 68030 verfügte nicht über eine eingebaute Gleitkommaeinheit (FPU) und wurde im Allgemeinen mit dem 68881 und dem schnelleren 68882 verwendet. Das Hinzufügen der FPU war eine wichtige Designnotiz des nachfolgenden 68040. Dem 68030 fehlen einige Befehle des 68020, aber er steigert die Leistung um rund 5 % und senkt gleichzeitig die Leistungsaufnahme um circa 25 %.



Motorola 68030 Mikroprozessor (Foto: Wikipedia)

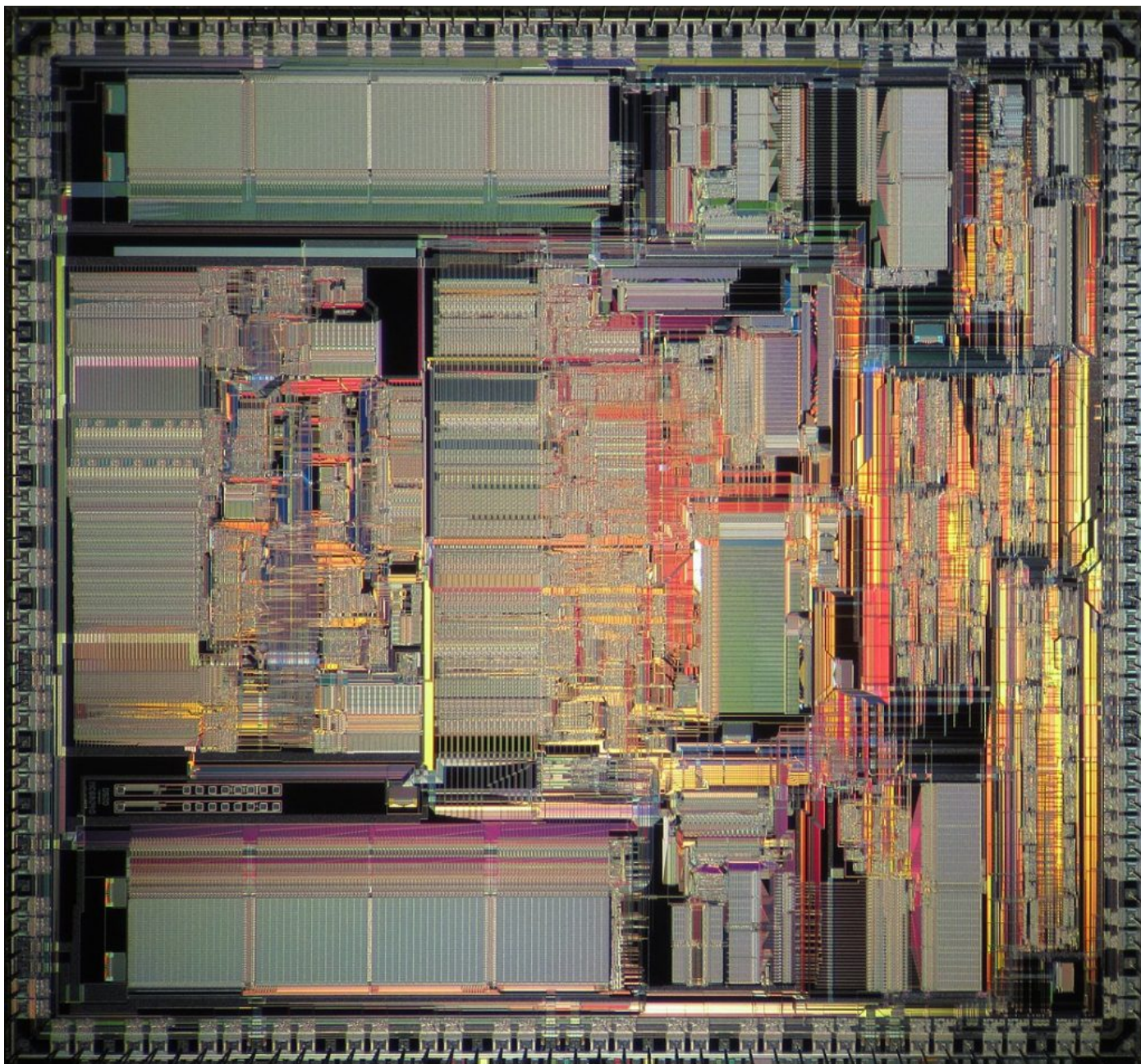
Der 68030 verfügt über 273.000 Transistoren. Es wurde auch eine kostengünstigere Version herausgebracht, der Motorola 68EC030, dem die On-Chip-MMU fehlte. Er war sowohl im 132-Pin-QFP- als auch im 128-Pin-PGA-Gehäuse erhältlich. Aufgrund der schlechteren thermischen Eigenschaften des QFP-Gehäuses war diese Variante auf 33 MHz beschränkt. Die PGA 68030er umfassten 40-MHz- und 50-MHz-Versionen. Es gab auch ein kleines Angebot an EC-Varianten im QFP-Gehäuse.

Der 68030 kann mit dem 68020-Bus verwendet werden. In diesem Fall ist seine Leistung ähnlich wie die des 68020. Der 68030 bietet jedoch eine zusätzliche synchrone Busschnittstelle, die, wenn sie verwendet wird, die Speicherzugriffe im Vergleich zu einem gleich getakteten 68020 um bis zu 33 % beschleunigt. Der feinere Fertigungsprozess ermöglichte es Motorola, die Vollversion des Prozessors auf 50 MHz zu skalieren. Die EC-Variante erreichte maximal 40 MHz.

Der 68030 wurde in vielen Modellen der Apple Macintosh II- und Commodore Amiga-Reihe von Personalcomputern, im NeXT Cube, in späteren Mehrbenutzersystemen von Alpha Microsystems und in einigen Nachfolgern der Atari ST-Reihe wie dem Atari TT und dem Atari Falcon verwendet. Er wurde auch in Unix-Workstations wie der Sun Microsystems Sun-3x-Reihe von Desktop-Workstations, Laserdruckern und der Nortel Networks DMS-100 Telefonzentrale eingesetzt. Die HP LaserJet 4 Netzwerkkarte von Hewlett-Packard verwenden ebenfalls einen 68030 als Hauptprozessor.

Dritte und vierte Generation

1990 kam der 68040 auf den Markt. Er war das erste Mitglied der 680×0-Familie mit einer On-Chip Floating-Point Unit (FPU) und enthielt somit alle Funktionen, für die zuvor externe Chips erforderlich waren. Außerdem verfügte er über einen geteilten Befehls- und Daten-Cache von jeweils 4 Kilobyte.



Motorola 68040 Chipsatz mit FPU auf der linken Seite (Foto: Wikipedia)

Versionen des 68040 wurden für bestimmte Marktsegmente entwickelt, darunter der 68LC040, bei dem die FPU entfernt wurde, und der 68EC040, bei dem sowohl die FPU als auch die MMU entfernt wurden. Motorola hatte die EC-Variante für den Einsatz in eingebetteten Systemen vorgesehen, aber eingebettete Prozessoren benötigten zur Zeit des 68040 nicht die Leistung des 68040, so dass EC-Varianten des 68020 und 68030 weiterhin häufig verwendet wurden.

Motorola produzierte mehrere Geschwindigkeitsstufen. Die 16-MHz- und 20-MHz-Teile wurden nie qualifiziert und als Prototyping-Muster verwendet. Die 25-MHz- und 33-MHz-Versionen waren in der gesamten Produktlinie vertreten, die 40-MHz-Variante war jedoch bis etwa 2000 nur für den „vollen“ 68040 vorgesehen. Ein geplanter 50-MHz-Typ wurde gestrichen, nachdem er den thermischen Entwicklungsbereich überschritten hatte.

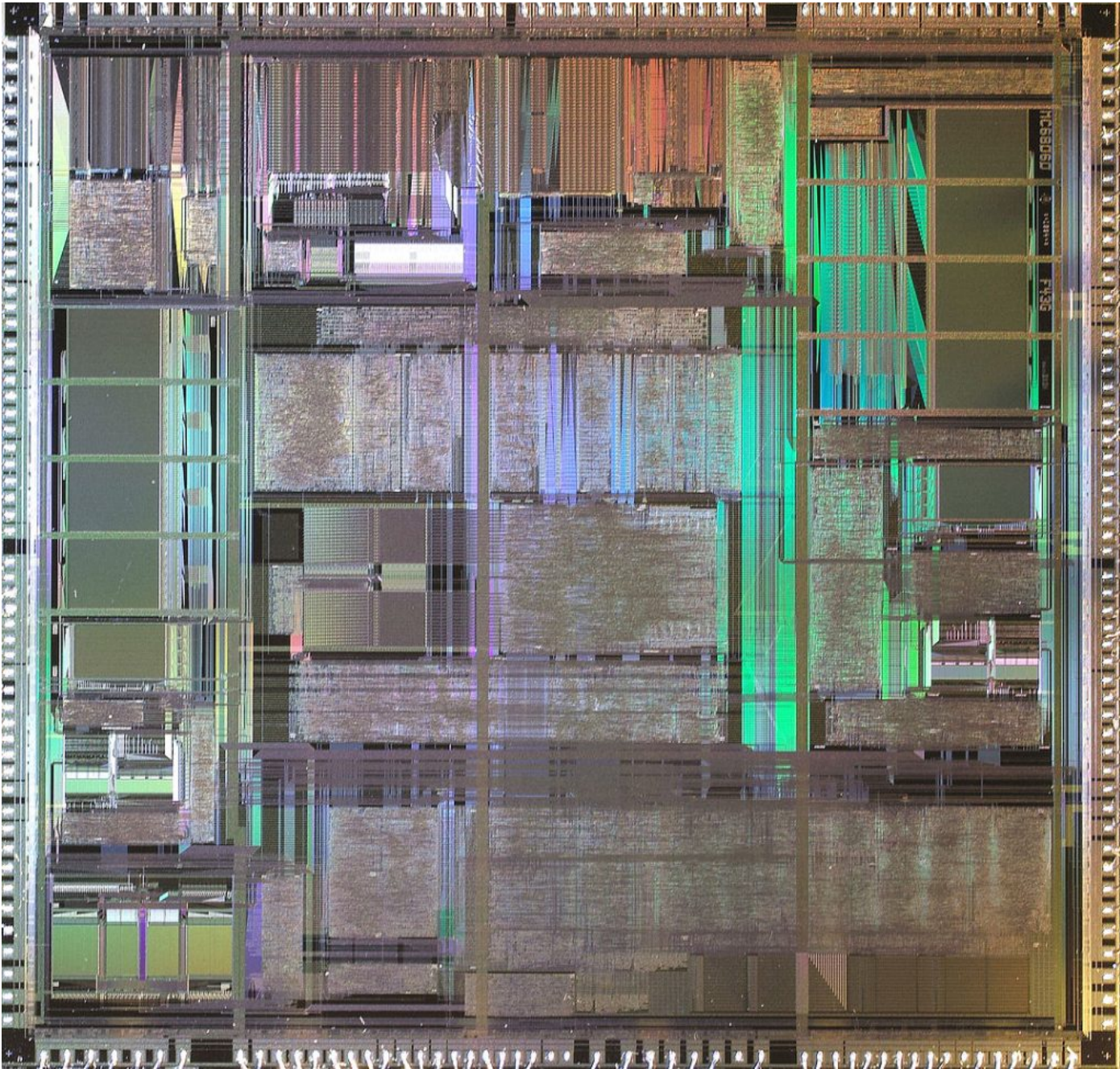
Der 68040 stieß schon früh in der Entwicklung an die Grenzen des Transistorbudgets. Während die MMU nicht viele Transistoren benötigte – es wurden sogar Transistoren eingespart, da sie sich auf demselben Chip wie die CPU befand – war dies bei der FPU der Fall. Die externe FPU 68882 war als sehr leistungsstarke Einheit bekannt, und Motorola wollte nicht riskieren, dass Integratoren die „LC“-Version mit einem 68882 anstelle der profitableren „RC“-Einheit verwenden. Die FPU im 68040 war daher nicht in der Lage, IEEE-Transzendentalfunktionen zu verarbeiten, die sowohl vom 68881 als auch vom 68882 unterstützt wurden. Diese wurden von der damals beliebten Software zur Erzeugung von Fraktalen verwendet. Das Motorola Floating Point Support Package (FPSP) emulierte diese Befehle in Software unter Interrupt. Da es sich dabei um einen Exception-Handler handelte, führte die intensive Nutzung der transzendentalen Funktionen zu erheblichen Leistungseinbußen.

Die Wärmeentwicklung war während der gesamten Lebensdauer des 68040 immer ein Problem. Er lieferte zwar mehr als das Vierfache der Leistung pro Takt des 68020 und 68030, aber die Komplexität des Chips und der Stromverbrauch waren auf einen großen Chip und große Caches zurückzuführen. Dies wirkte sich auf die Skalierung des Prozessors aus, und er war nie in der Lage, mit einer Taktrate von mehr als 40 MHz zu arbeiten. Enthusiasten, die ihn übertakten wollten, berichteten von Erfolgen beim Erreichen von 50 MHz, indem sie einen 100-MHz-Oszillator anstelle eines 80-MHz-Teils verwendeten und die damals neuartige Technik des Hinzufügens von übergroßen Kühlkörpern mit Lüftern einsetzten.

Der 68040 verfügte über die gleichen Funktionen wie der Intel 80486 (1989), war aber bei den Ganzzahl- und Gleitkommaanweisungen deutlich leistungsfähiger als der Konkurrent.

In Apple Macintosh-Computern wurde der 68040 im Macintosh Quadra eingeführt, der nach dem Chip benannt wurde. Die schnellste Variante mit 40 MHz wurde nur im Quadra 840AV (ab 1993) verwendet. Die teureren Modelle der kurzlebigen Macintosh Centris-Reihe (1992-1993) enthielten ebenfalls den 68040, während die billigeren Quadra, Centris und Macintosh Performa den 68LC040 nutzen. Der 68040 wurde auch in anderen Personal Computern wie dem Amiga 4000 und dem Amiga 4000T sowie in einer Reihe von Workstations, Alpha Microsystems Servern, der HP 9000/400 Serie und späteren Versionen des NeXT-Computers verwendet.

1994 erschien mit dem 68060 die vierte Generation. Er teilt die meisten architektonischen Merkmale mit dem P5 Pentium (1993). Beide haben eine sehr ähnliche superskalare In-Order-Doppelbefehls-Pipeline-Konfiguration und einen Befehlsdecoder, der komplexe Befehle vor der Ausführung in einfachere zerlegt. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, dass die 68060 FPU keine Pipeline hat und daher bei Fließkomma-Anwendungen bis zu dreimal langsamer ist als der Pentium. Im Gegensatz dazu sind Ganzzahlmultiplikationen und Bitverschiebungsbefehle auf dem 68060 deutlich schneller. Er hat die Fähigkeit, einfache Befehle in der Adressgenerierungseinheit (AGU) auszuführen und damit das Ergebnis zwei Zyklen vor der ALU zu liefern. Bei der Entwicklung des 68060 wurden große Mengen kommerziellen kompilierten Codes analysiert, um herauszufinden, welche Befehle sich am besten für eine Leistungsoptimierung eignen würden.



Motorola MC68060RC50 (Foto: Wikipedia)

Im Vergleich zum Pentium kann der 68060 bei gemischtem Code besser abschneiden. Der Decoder des Pentium kann nicht bei jeder Gelegenheit einen FP-Befehl ausgeben, und daher ist die FPU nicht superskalar, wie es die ALUs waren. Wenn die nicht gepipelte FPU des 68060 einen Befehl akzeptieren kann, kann der Dekoder einen ausgeben. Das bedeutet, dass die Optimierung für den 68060 einfacher ist: Es gibt keine Regeln, die verhindern, dass FP-Befehle ausgegeben werden, wann immer es für den Programmierer günstig ist, abgesehen von gut verstandenen Befehlslatenzen. Bei ordnungsgemäß optimiertem und zeitgesteuertem Code ist die FPU des Pentium jedoch in der Lage, einen doppelt so hohen Taktdurchsatz zu erzielen wie die FPU des 68060.

Der 68060 ist die letzte Entwicklung der 68000er-Familie für allgemeine Zwecke, die zugunsten der PowerPC-Chips (ab 1992) aufgegeben wurde. Er wurde in einigen späten Amiga-Maschinen und

Amiga-Beschleunigerkarten sowie in einigen Atari ST-Klonen und Falcon-Beschleunigerkarten und in sehr späten Modellen der Mehrbenutzer-Computer von Alpha Microsystems vor deren Umstellung auf x86 verwendet. Apple Inc. und die Unix-Welt waren zu der Zeit, als der 68060 verfügbar war, bereits zu verschiedenen RISC-Plattformen übergegangen. Der 68060 wurde mit 50 MHz im 0,6-µm-Fertigungsprozess von Motorola eingeführt. Einige Jahre später wurde er auf 0,42 µm verkleinert und die Taktrate auf 66 MHz und 75 MHz erhöht. Einigen Anwendern gelang es, die rev6 120 oder 133 MHz zu übertakten.

Höhenflug und Fall von Motorola

Im September 1983 genehmigte die amerikanische Federal Communications Commission (FCC) das DynaTAC 8000X-Telefon, das erste kommerzielle Mobilfunkgerät der Welt. Bis 1998 machten Mobiltelefone zwei Drittel des Bruttoumsatzes von Motorola aus. Die PowerPC-Familie wurde gemeinsam mit IBM und in einer Partnerschaft mit Apple (bekannt als AIM-Allianz, die 1991 gegründet wurde) entwickelt. Motorola verfügt auch über eine breite Palette von Kommunikationsprodukten, darunter Satellitensysteme, digitale Kabelboxen und Modems.

1986 erfand Motorola das Six-Sigma-Verfahren zur Qualitätsverbesserung. Dieses wurde zu einem weltweiten Standard. Im Jahr 1990 schlug die General Instrument Corporation, die später von Motorola übernommen wurde, den ersten vollständig digitalen HDTV-Standard vor. Im selben Jahr führte das Unternehmen den numerischen Pager Bravo ein, der zum meistverkauften Pager der Welt wurde.

Den weltweit ersten funktionierenden Prototyp eines digitalen Mobilfunksystems und Telefons nach dem GSM-Standard stellte Motorola 1991 in Hannover vor. 1994 folgte das weltweit erste kommerzielle digitale Funksystem, das Paging, Daten- und Mobilfunkkommunikation sowie Sprachdisposition in einem einzigen Funknetz und Handgerät kombinierte. 1995 folgte die Weltpremiere für den Zwei-Wege-Pager, mit dem Benutzer Textnachrichten und E-Mails empfangen und mit einer Standardantwort beantworten konnten.

1996 kam der Motorola StarMax auf den Markt, einen Macintosh-Klon, der von Apple lizenziert wurde. Mit der Rückkehr von Steve Jobs zu Apple im Jahr 1997 brachte Apple jedoch Mac OS 8 heraus. Da die Lizenzen der Klonhersteller nur für Apples System 7 gültig waren, konnten diese nach der Veröffentlichung von Mac OS 8 ohne Verhandlungen mit Apple keine aktuelle Mac OS-Version mehr liefern.

Ein hitziges Telefongespräch zwischen Jobs und dem Motorola-CEO Christopher Galvin führte zur Beendigung des Klonvertrags, zur Einstellung des Motorola StarMax und zur Degradierung des lange Zeit favorisierten Apple zu „nur einem weiteren Kunden“ hauptsächlich für PowerPC-CPU's. Jobs wollte nicht, dass Motorola das Angebot an PowerPC-CPU's einschränkt. Als Vergeltung schlossen Apple und IBM Motorola aus der AIM-Allianz aus und zwangen Motorola, keine PowerPC-CPU's mehr zu produzieren, so dass IBM alle künftigen PowerPC-CPU's herstellen konnte. 1998 wurde Motorola jedoch wieder in die Allianz aufgenommen.

Im Jahr 1998 wurde Motorola auch von Nokia als weltgrößter Verkäufer von Mobiltelefonen überholt. Am 15. September 1999 gab Motorola bekannt, dass es General Instrument im Rahmen eines Aktientauschs für 11 Mrd. \$ kaufen würde. Diese Firma war seit langem die Nummer 1 unter den Kabelfernsehausrüstern und belieferte Kabelbetreiber mit End-to-End-Lösungen für hybride Glasfaser-

Koax-Kabel. Dies bedeutete, dass GI alle Komponenten des Kabelfernsehtznetzes von der Kopfstelle über die Glasfaserübertragungsknoten bis hin zu den Kabel-Set-Top-Boxen anbietet, die nun zur Verfügung von Motorola stehen. Durch die Übernahme von GI entstand der Broadband Communications Sector (BCS). Ebenfalls 1999 trennte Motorola einen Teil seines Halbleitergeschäfts – die Semiconductor Components Group (SCG) – ab und gründete ON Semiconductor, dessen Hauptsitz sich in Phoenix, Arizona, befindet.

Im Juni 2000 lieferten Motorola und Cisco das weltweit erste kommerzielle GPRS-Mobilfunknetz an BT Cellnet in Großbritannien. Das erste GPRS-Handy der Welt wurde ebenfalls von Motorola entwickelt. Im August 2000 erreichte der Konzern mit den jüngsten Übernahmen seinen Höchststand von 150.000 Beschäftigten weltweit, zwei Jahre später lag die Zahl der Beschäftigten aufgrund von Entlassungen und Ausgliederungen bei 93.000.

Im Jahr 2002 stellte der Konzern das weltweit erste drahtlose Kabelmodem-Gateway vor. Ein Jahr später wurde das weltweit erste Mobiltelefon vorgestellt, das ein Linux-Betriebssystem und Java-Technologie mit „voller PDA-Funktionalität“ kombinierte. 2004 veräußerte Motorola sein gesamtes Halbleitergeschäft an Freescale Semiconductor und verließ die AIM-Allianz.

Die Motorola RAZR-Reihe (Klapphandys) verkaufte sich über 120 Millionen Mal und brachte den Konzern 2005 auf den zweiten Platz bei den Mobiltelefonen.

Im Juni 2006 erwarb Motorola die von der britischen Firma TTP Communications plc entwickelte Softwareplattform (AJAR). 2010 verkaufte Motorola sein Mobilfunk-Infrastrukturgeschäft für 1,2 Milliarden US-Dollar an Nokia Siemens Networks.

Im Januar 2011 spaltete sich Motorola in zwei getrennte Unternehmen auf, die beide weiterhin das Wort Motorola als Teil ihres Namens verwenden. Motorola Solutions (mit einer blauen Version des Motorola-Logos), hat seinen Sitz im Chicagoer Vorort Schaumburg und konzentriert sich auf Polizeitechnologien, Funkgeräte und kommerziellen Bedarf. Motorola Mobility (mit dem roten Logo), hat seinen Sitz in Chicago und ist Hersteller von Mobiltelefonen. Die Aufspaltung wurde so strukturiert, dass Motorola Solutions der Rechtsnachfolger des ursprünglichen Motorola ist, während Motorola Mobility die Ausgliederung ist.

Am 15. August 2011 gab Google bekannt, dass es Motorola Mobility für rund 12,5 Milliarden US-Dollar kaufen würde. Am 17. November 2011 stimmten die Aktionäre von Motorola Mobility mit überwältigender Mehrheit für die geplante Fusion mit Google Inc. Am 22. Mai 2012 gab Google bekannt, dass die Übernahme von Motorola Mobility Holdings, Inc. abgeschlossen ist.

Am 30. Oktober 2014 veräußerte Google Motorola Mobility an Lenovo. Der Kaufpreis betrug rund 2,91 Milliarden US-Dollar (vorbehaltlich bestimmter Anpassungen), wovon 1,41 Milliarden US-Dollar bei Abschluss gezahlt wurden: 660 Millionen US-Dollar in bar und 750 Millionen US-Dollar in Lenovo-Stammaktien. Die restlichen 1,5 Milliarden US-Dollar wurden in Form eines dreijährigen Schuldscheins gezahlt.

Nach dem Kauf blieb Google Eigentümer des überwiegenden Teils des Patentportfolios von Motorola Mobility, einschließlich der laufenden Patentanmeldungen und Erfindungsmeldungen, während Lenovo eine Lizenz für das Patentportfolio und anderes geistiges Eigentum erhielt. Zusätzlich erhielt Lenovo über 2.000 Patente sowie die Marke Motorola Mobility und das Markenportfolio.

Not too big to fail

Es ist schwierig, den Niedergang von Motorola kurz und verständlich darzustellen. Einst von zwei Brüdern gegründet, war es eines der innovativsten Unternehmen überhaupt und prägte wie kaum ein anderer Konzern die Anfangszeit der mobilen Geräte. Auch wenn Atari- und Amiga-Fans heute noch warm ums Herz wird, wenn sie an den 68k-Prozessor denken, war dies für Motorola ein eher kleines Geschäft.

Die Firma ist ein gutes Beispiel dafür, wie schwierig es sein kann, ein so riesiges, weit verzweigtes Unternehmen zu führen. Und dass Innovationen und Patente keine Garantie für dauerhaften Erfolg sein müssen. Letztlich hat sich der Konzern auch an vielen Fronten aufgegeben. Auf dem Computermarkt mit IBM, Intel und Apple, auf dem mobilen Markt mit Nokia und ebenfalls Apple. Neuere Unternehmen mit flexibleren Strukturen wie Google gaben Motorola den Rest.

Die große Konkurrenz in allen Unternehmensbereichen führte auch dazu, dass Motorola verzichtbar wurde. Bei aller Nostalgie gibt es für den Endkunden nichts, was er tatsächlich vermissen würde. Außer vielleicht die Amigas und Ataris aus den 1980er Jahren.

Links

- [1: Von Adam bis Zuse](#)
- [2: Die drei großen Buchstaben](#)
- [3: Kalifornien und Texas erobern die Welt](#)
- [4: Gleiche Geschwindigkeit bei doppelter Bit-Zahl](#)
- [5: Die Billig-CPU](#)
- [6: Computer für die Massen](#)
- [7: Der Zukunftsprozessor](#)
- [8: Die Legende des Außerirdischen](#)
- [9: Eine Freundin für den Geek](#)
- [10: Siegeszug der 8086er](#)
- [11: Der elektronische Apfel](#)
- [12: Der reduzierte Befehlssatz](#)
- [13: Made in Germany](#)

Date Created

22. April 2022

Author

sven