



---

**Title:** Informationsspeichertechnik. 3. Der assoziative Speicher. Vom ersten arbeitenden Computer Z3 bis zum assoziativen Speicher: Der Weg der Informatik  
**Author(s):** Konrad Zuse  
**Date:** 1971  
**Published by:** Konrad Zuse Internet Archive  
**Source:** Document - ZIA ID: 0094

---

The Konrad Zuse Internet Archive preserves and offers free access to the digitized original documents of Konrad Zuse's private papers and to other related sources.

The Konrad Zuse Internet Archive is a nonprofit service that helps scholars, researchers, students and other interested parties discover, use and build upon a wide range of content in a digital archive. For more information about the Konrad Zuse Internet Archive, please contact [zusearchive@zib.de](mailto:zusearchive@zib.de).

---

Your use of the Konrad Zuse Internet Archive indicates your acceptance of the Terms & Conditions of Use (<http://zuse.zib.de/tou>) including the following license agreement. If you do not accept the Terms & Conditions of Use you are not permitted to use the material.

This work by Konrad Zuse Internet Archive is licensed under a  
Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 Unported License  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>).  
Based on a work at <http://zuse.zib.de>



**Attribution (BY)** - You must attribute the work in the manner specified by the author or licensor (but not in any way that suggests that they endorse you or your use of the work). Attribute with "Konrad Zuse Internet Archive (<http://zuse.zib.de>)".

**Noncommercial (NC)** - You may not use this work for commercial purposes.

**Share Alike (SA)** - If you alter, transform, or build upon this work, you may distribute the resulting work only under the same or similar license to this one.

The usage of this document requires the consideration of possible third party copyrights, and might necessitate obtaining the consent of the copyright holder. The Konrad Zuse Internet Archive assumes no liability with respect to the rights of third parties. The Konrad Zuse Internet Archive is not responsible for the claims of any third party resulting from any infringement of copyright laws.

# der mensch und die technik

Technisch-Wissenschaftliche Blätter der Süddeutschen Zeitung

13. Jahrgang 189. Ausgabe 3. November 1971

## Informations- Speicher- Technik (III)

Der assoziative  
Speicher



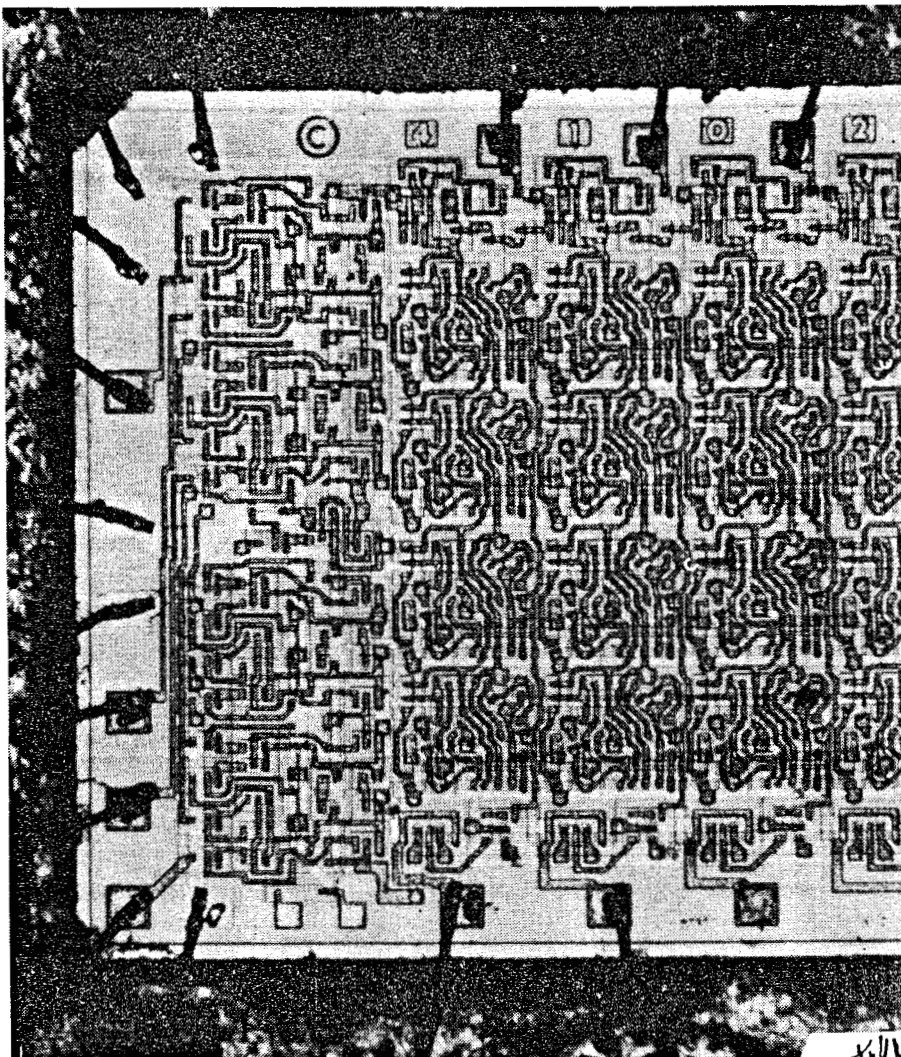
Wie der Mensch Informationen über unsere Sinnesorgane aufnimmt und sie von seinem Nervensystem verarbeitet, gespeichert und reproduziert erhält, hierüber war zuletzt 1968 vom Standort des Nachrichtentechnikers aus referiert worden.

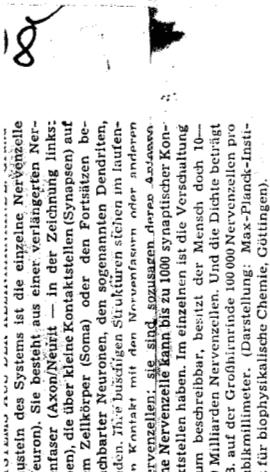
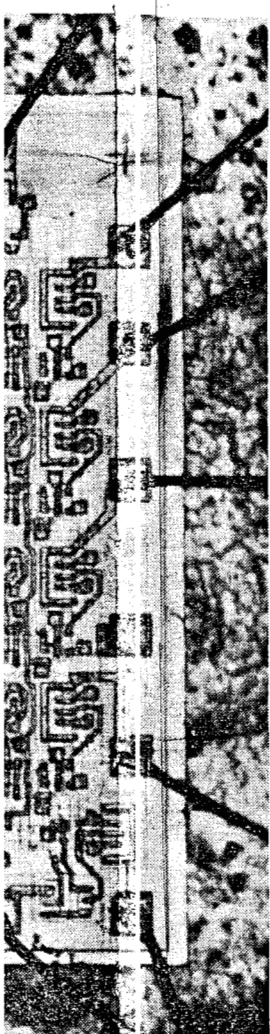
Inzwischen sind nachrichtentechnische Erfahrungen im Rahmen der Informatik mit biologischen, psychologischen und soziologischen Forschungsanliegen angereichert worden. Dabei dürften der Aufbau und die Funktion des assoziativen Speichers, dem wohl vorerst noch keine größere kommerzielle Bedeutung zukommt, sicherlich zur Aufhellung von Zusammenhängen beitragen.

An dieser Stelle ist auch das Ergebnis der neuen Hirnforschung bemerkenswert, daß nicht die einzelnen Nervenzellen (Neuronen) die eigentlichen Informationsspeicher abgeben, vielmehr es die funktionellen Änderungen der Querverbindungen zwischen verschiedenen Neuronen sind, die die Speicherung von Gedächtnisinhalten zustande kommen lassen.

Das assoziative System ist überhaupt favorisierter Kandidat bei dem gedanklichen Konzept zu Ansätzen einer modernen Modellvorstellung über das Gedächtnis des Menschen. Dabei werden, wie die folgenden Beiträge zeigen, insbesondere Verbindungen aufgenommen zu der Assoziationspsychologie des 17.—19. Jahrhunderts. Ein interessantes Fazit aus der ersten Phase der Computer-Zeit (1941—1971).

DER KRISTALL FÜR DIE MATRIXEINES 16-BIT-ASSOZIATIV-SPEICHERS hat eine Abmessung von ca. 1,9×2,1 Millimeter. Sie ist organisiert in 4 Worte zu je 4 bit und aufgebaut in monolithischer





Der Begriff „Informatik“ ist aus dem Bedürfnis heraus entstanden, einen gemeinsamen Oberbegriff für Theorie und Praxis des Computereinsatzes zu schaffen. Man will sich dabei bewußt von mehr theoretischen und wissenschaftlichen Gebieten wie Kybernetik, Informationstheorie und Automatentheorie distanzieren. An sich ist die „Informatik“ nicht unbedingt an den Computer gebunden; jedoch ist erst durch den breiten Einsatz neuer technischer Hilfsmittel zur Bewältigung umfangreicher rechnerischer Probleme das Bedürfnis entstanden, Abgrenzungen zu schaffen.

Die theoretischen Vorarbeiten können bis auf Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) zurückverfolgt werden. Er war nicht nur der Konstrukteur einer Rechenmaschine, sondern auch einer der Begründer der mathematischen Logik. Die Idee des „Computers“ im heutigen Sinn stammt von dem Engländer Charles Babbage (1792-1871), der die beiden grundlegenden Prinzipien des Programmbauans und der Speicherung entwickelte. Er scheiterte mit der praktischen Verwirklichung, weil er seinerzeit um ein Jahrhundert voraus war.

Eine stürmische Entwicklung setzte erst ein, nachdem vor etwa 30 Jahren mit den ersten wirklich arbeitenden Pioniergeräten der Wert dieser Ideen praktisch bewiesen wurde. Es liefen verschiedene Entwicklungen etwa gleichzeitig in Deutschland und in den USA. Der erste arbeitende Computer war das Gerät Z 3, welches vom Verfasser dieses Beitrages im Jahre 1941 in Berlin fertiggestellt wurde, nachdem verschiedene Vormodelle zu keinem brauchbaren Erfolg geführt hatten. Es arbeitete in elektrischer Schalter-Technik, d.h. mit Relais- und Schrittschaltgeräten. In den USA liefen mehrere unabhängige Entwicklungen. Als erstes amerikanisches Gerät gilt das Gerät Mark I von Atken, welches 1944 fertiggestellt war. Auch dieses Gerät wurde in elektro-mechanischer Technik gebaut.

Auch die Idee der elektronischen Rechenmaschine entstand wohl etwas früher in Deutschland als in den USA. Dr. Sartery und Dr. Dirks arbeiteten bei uns an diesen Problemen, jedoch mit verhältnismäßig bescheidenen Mitteln, so daß nur Versuchsmodelle entstanden. Im Gegensatz dazu fingen man drüben mit großer Energie an die Entwicklung der Elektronik heran. Etwa 1945 war das Gerät ENIAC fertig, welches 18 000 elektronische Röhren enthielt.

Damit war das Signal für die Entwicklung der Computer gegeben. Man arbeitete fortan in verschiedenen Ländern intensiv daran. In Deutschland mußten die praktischen Arbeiten allerdings auf Grund der allgemeinen Nachkriegssituation zunächst unterbleiben. Der Computer brauchte jedoch noch etwa weitere 10 Jahre, um eine gewisse Reife zu erlangen.

Vom ersten arbeitenden Computer Z 3 bis zum assoziativen Speicher:

## Der Weg der Informatik

Bereits vor etwa 30 Jahren ist, daß die ersten Computer fast ausschließlich von Mathematikern und Ingenieuren für ihre eigenen Zwecke gebaut wurden. Die Vertreter der Wirtschaft waren diesen neuen Spezies gegenüber zunächst sehr skeptisch. Heute ist die Situation anders. Etwa 85 Prozent aller Computer sind kommerziell eingesetzt. Die wissenschaftlichen Rechengeräte haben aber nach wie vor als richtungweisende Pioniergeräte ihre Bedeutung über ihr eigenes Anwendungsgebiet hinaus.

Für die weitere Entwicklung der Informatik können wir hauptsächlich zwei Aspekte unterscheiden, die eng miteinander verflochten sind: die technologisch konstruktive und die organisatorisch-logische Seite. Hierfür haben sich die beiden Schlagworte: „hardware“ und „software“ eingebürgert. Die Technologie führte von der Mechanik über die Elektromechanik zur Elektronik, mit den verschiedenen Stufen der Röhrentechnik, der Transistortechnik und der integrierten Schaltkreise. Diese Entwicklung befindet sich noch im vollen Fluß.

Besonders in den letzten Jahren sind eine Reihe verschiedener Techniken entwickelt worden, welche es erlauben, auf sehr kleinem Raum eine große Menge von Schaltelementen in einem „integrierten“ Arbeitsverfahren zu konzentrieren. Noch vor zehn Jahren waren diese Techniken erheblich teurer als normal verdrahtete Bauelemente. Heute haben wir es jedoch mit einem ausgesprochenen Preisverfall auf dem Gebiet der Bauelemente zu tun. Das führt einerseits dazu, daß im Prinzip schon vollständige Computer-Schaltungen oder gar kleine Computer in einem einzigen Arbeitsgang hergestellt werden können und andererseits wesentlich mehr Bauelemente in einem Gerät eingebaut werden können. Das Preisleistungsverhältnis wird also immer günstiger; dazu kommen immer neue Möglichkeiten für den Computer-Einsatz.

Die technologische Entwicklung bewirkt außerdem eine erhebliche Geschwindigkeitserhöhung. Im Durchschnitt konnte in den letzten 30 Jahren die Geschwindigkeit der Geräte etwa 10<sup>6</sup> bis 10<sup>7</sup> mal vergrößert werden. Auch diese Tendenz hält heute noch an. Dabei kann man natürlich die grundsätzliche Frage stellen, ob die Entwicklung zu immer schnelleren und kleineren Bauelementen auch weiterhin das erstrebenswerte Ziel ist. Es ist auch die Frage nach den prinzipiellen physikalischen Grenzen benannt. Sie sind jedoch bei weitem noch nicht erreicht.

Während die Computer heute mit Schaltzeiten im Bereich von Nanosekunden (10<sup>-9</sup> sec) arbeiten, rechnen die Physiker mit kürzesten Zeiten von 10<sup>-18</sup> sec. Auch in bezug auf die Verkleinerung liegen die physikalischen Grenzen noch in weiter Ferne. Die Dichte der Schaltelemente im menschlichen Gehirn ist allerdings um viele Zehnerpotenzen höher als die Dichte der Bauelemente in einem Computer.

Die konstruktiven Elemente kann man nach drei Gesichtspunkten unterscheiden: Informationsverarbeitende Teile, speichernde Teile und Eingangs- und Ausgangsgeräte. Bei der Informationsverarbeitung war die Erkenntnis sehr nützlich, daß sich alle Prozesse in solche zwischen Ja-Nein-Werten zerlegen lassen, welche den logischen Operationen des Aussagenkalküls entsprechen. Damit kommt man mit verhältnismäßig wenigen Grundelementen aus.

Schon Babbage hatte erkannt, daß programmierte Rechengeräte einen umfangreichen Speicher brauchen und plante einen mechanischen Speicher für 1000 stelligen Dezimalzahlen. Heute werden die Anforderungen an die Speicherkapazität immer höher. Dabei ist eine Reihe verschiedener Techniken erprobt und eingeführt worden, wobei die auf dem Magnetismus basierenden Verfahren sich am besten bewährt haben. Die einzelnen Techniken unterscheiden sich jedoch sehr in bezug auf Kapazität, Geschwindigkeit und Preis. Für die logisch an sich gleiche Aufgabe müssen daher aus rein ökonomischen Gründen verschiedene Techniken in der gleichen Anlage benutzt werden. (Bänder, Platten, Kernspeicher usw.)

Fast alle Speicher arbeiten, jedoch heute noch auf dem gleichen Prinzip wie der Speicher von Babbage, nämlich Adressen orientiert, d. h. die zu speichernden Informationen werden in Abschnitte (Wörter) zerlegt, die über Kennziffern (Adressen) aufgerufen werden können.

Man unterscheidet dabei Speicher mit direktem Zugriff (sequentielle Speicher), bei direktem Zugriff kann die Verbindung zu einer ausgewählten Speicherzelle sofort hergestellt werden (z.B. bei einem Kernspeicher). Bei sequentiellen Speichern haben wir es mit umlaufenden Informationsträgern zu tun, wie z.B. Bänder, Trommeln und Platten, bei denen der Zeitpunkt abgewartet werden muß, in welchem die gesuchte Speichereinheit die Les- bzw. Schreibvorrichtung passiert. Dementsprechend bezieht sich die Technologie der Speicherung auf verschiedene

Aufgaben: Die Speicherung als solche, die Verläßlich- und Lesetechnik mit den erforderlichen Verschaltungen und der Ausbautechnik. Erst alles zusammen ermöglicht die Beurteilung der Güte einer Speichertechnik.

Im Gegensatz zu Adressen orientierten technischen Speichern führen die etwa gleichzeitig laufenden Untersuchungen der Kybernetiker zu dem Erkenntnis, daß im menschlichen Gehirn das Prinzip des „assoziativen“ Speichers verwirklicht ist, bei dem der Aufruf der Informationen über den Inhalt der verschiedenen Speicherzellen erfolgt. Dieses Prinzip ist logisch außerordentlich leistungsfähig und erlaubt, daß „assoziativ“ verschiedene Informationen, die an beliebigen, unbekannten Stellen gespeichert sind, rasch aufgerufen werden können. Konstruktiv bedeutet dies eine enge Verflechtung Informationsverarbeitender und Informationsspeichernder Elemente.

Nachdem die ersten Geräte gebaut waren, wurde bald klar, daß auch grundsätzlich neue Wege gefunden werden mußten, um sie wirkungsvoll einzusetzen. Die algorithmischen Sprachgebilde können immer mehr Bedeutung und bilden heute einen wesentlichen Anteil an dem gesamten Komplex „Informatik“. Auch dieses Gebiet ist heute noch voll im Fluß. Eine wirkliche befriedigende universelle algorithmische Sprache hat sich noch nicht durchsetzen können. Das liegt zum Teil daran, daß man vor etwa 15 Jahren noch zu stark auf die Zahlenrechnung eingestellt war, während heute immer mehr die logischen und organisatorischen Probleme in den Vordergrund treten.

Auf die theoretische Untersuchung formaler Sprachen wird viel Scharfsinn verwendet. Leider gehen die Praktiker und die Theoretiker dabei nicht immer konform. Wir haben auf der einen Seite eine Fülle von neuen Sprachschöpfungen bzw. Erweiterungen eingeführter Sprachen auf der anderen Seite eine mathematische Richtung, die hauptsächlich auf der Automaten-theorie und der Informationstheorie aufbaut. Man muß abwarten, ob die beiderseitigen Bemühungen bald zu einer besseren Zusammenarbeit kommen.

Im ganzen gesehen können wir sagen, daß die Entwicklung der Informatik an einem Punkt angelangt ist, bei dem eine grundsätzliche Bestimmung angebracht erscheint. Sollen wir den bisherigen Weg fortsetzen, immer schnellere und immer leistungsfähigere Geräte zu bauen? Die physikalischen Grenzen der Technologie sind, wie bereits gesagt, noch nicht erreicht. Es be-

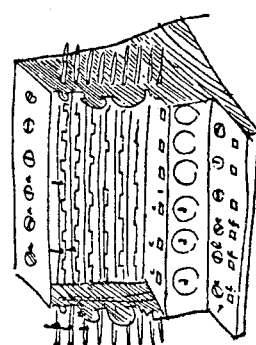
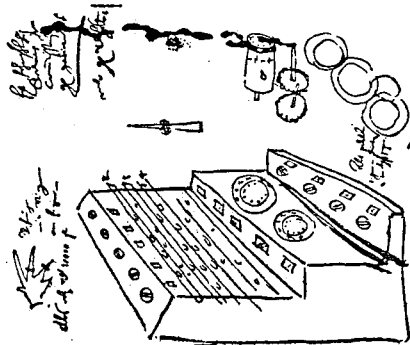
steht Aussicht, daß wir bald über sehr kleine Speicher mit hoher Kapazität und schnellem Zugriff verfügen werden. Bis jetzt ist unsere ganze Denkwelt in bezug auf den Bau von Computern noch fast völlig auf die Trennung von Informationsverarbeitung und Informationsspeicherung eingestellt.

Die neuen Techniken erlauben es, informationsverarbeitende Prozesse in den Speicher mit einzubeziehen. Damit wäre der Weg frei für den Bau assoziativer Speicher ausreichender Kapazität. Darüber hinaus gibt es noch andere Möglichkeiten, logische Prozesse in den Speicher einzubeziehen. Aber diese neue Technik müßte auch ihren Niederschlag in neuen Möglichkeiten der Software finden.

Es kann sein, daß sich dadurch ein erhebliches Umdenken im Aufbau der Programme der Betriebssysteme und des Zusammenspiels verschiedener Geräte bzw. Geräteeinheiten ergibt. Vielleicht ist manches, was bisher nur empirische Theoretiker beschäftigt, in Zukunft zu verwirklichen. Dabei seien nur Schlagworte, wie „künstliche Intelligenz“, „generelle Problemlösung“ usw. erwähnt. Man ist dabei bestrebt, die maschinelle Informationsverarbeitung über reine Routineoperationen hinaus auf schwierige kombinatorische Aufgaben auszuweiten. Der bisherige Aufbau von Computern erlaubt keine großartigen und zufriedenstellende Lösungen in dieser Richtung. Es zeigt sich nämlich immer deutlicher, daß solche Prozesse nur auf der freien Verarbeitung umfangreicher Informationen basieren können. Lernvorgänge und Selbstorganisation spielen dabei eine große Rolle. Gern nimmt man Brettspiele, wie das Schachspiel als Modellfall für solche Untersuchungen. Einige Erfolge sind erreicht, aber wirkliche gute Schachspieler sind den Computern immer noch überlegen. Die in der Praxis vorkommenden Aufgaben sind meistens noch viel komplexer. Hierher gehören auch die Versuche, das Management durch Computer zu unterstützen, indem man sogenannte „Management Information Systems“ schafft. Die Frage, wie weit Computer einem Wirtschaftsführer oder einem Politiker Entscheidungen erleichtern oder abnehmen können, ist Gegenstand umfangreicher Diskussionen und Versuche. Es zeigt sich auch dabei immer wieder, daß die Informatik erst ihren richtigen Weg zurückgelegt hat. Das meiste, was über tägliche Routineoperationen hinausgeht, muß erst noch erschlossen werden.

Bestimmung ist notwendig. Der Mensch muß seine Rolle im Rahmen der Informatik erst noch finden. Es sieht uns noch manche Überraschung bevor, auch den Fachleuten. Es ist zu hoffen, daß wir bald zu einer Klärung der Situation kommen und den sehr leistungsfähigen neuen Techniken ebenso leistungsfähigen neuen Arbeitsverfahren gegenüberstellen können. Konrad Zuse





ENTWURFSZEICHNUNG FÜR EINE RECHENMASCHINE AUS DEM JAHRE 1623. Die Zeichnungen stammen aus dem Nachlaß von Prof. Wilhelm Schickard aus Tübingen (1592-1635), einem Freund des Astronomen Johannes Kepler. Wiederentdeckt durch Baron von Freytag-Loringhoff, wurde sie manipulierbar rekonstruiert durch das Institut für Angewandte Mathematik der TH Darmstadt.



## Assoziative Systeme

Erinnert man sich überhaupt noch der Zeiten, wo man nicht vom Computer sprach, sondern vom Elektronengehirn und von der Denkmachine? Diese einst sensationellen Namen sind zu Recht vergessen worden — sie waren von Grund auf falsch. Ein Flugzeug ist kein Vogel, ein Raumpfleger ist kein Elefant, die Fernkamera ist kein Auge — warum sollte der Computer ein Gehirn sein und denken?

Den technischen Gebilden fehlen im Vergleich zu den nächsten natürlichen Gebilden stets die allgemeinen Eigenschaften, denn die technische Lösung soll stets in einer speziellen Funktion das Natürliche übertreffen. Was dem Computer alles fehlt, um ein richtiges Gehirn zu sein, läßt sich nicht sagen — wir wissen dazu viel zu wenig vom Gehirn. Man kann höchstens einzelne Unterschiede anführen und einer der hervorstechendsten davon liegt im Fertigwerden mit dem Unvollständigen und dem Unerwarteten.

Computerprogramme bewältigen mit unübertrefflicher Präzision, Sicherheit und Geschwindigkeit die größten und schwierigsten Aufgaben, wenn sie klar definiert und vollständig beschrieben sind, wenn alle Anfangsdaten und Anwendungen ohne Ausnahmen festgelegt sind, und wenn im Ablauf des Programms nichts Überraschendes auftritt. Das Gehirn wird hingegen auch mit unklar definierten und unvollständig beschriebenen Problemen fertig, und das ist sogar seine Stärke. Der Computer kann überhaupt erst dort anfangen, wo ein überdurchschnittliches Gehirn eine Arbeit abgeschlossen hat. Das menschliche Gehirn ist von Natur aus dazu fähig, fehlende Ausgangsdaten zu ergänzen oder zu umgehen, zweifelhafte Lagen ohne Anweisung zu meistern, und im Übernahmungsfall zeigt es seinen vollen Witz. Gewiß, nicht jedes Gehirn zeigt diese schönen Eigenschaften in vollem Glanz, und keines ist zu allen Zeiten gleich leistungsfähig, aber es gibt auch nur wenige, die nicht doch hin und wieder frappierende Erfolge erzielen. Niemand weiß, wie das vor sich geht, am wenigsten derjenige, der soeben einen Geistesblitz hat.

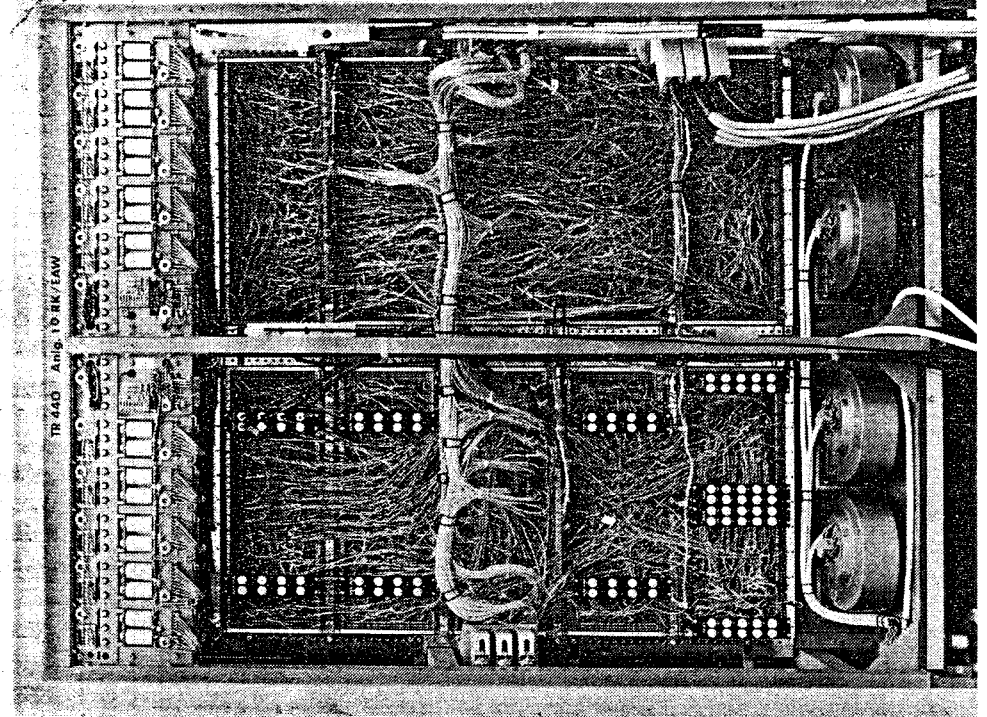
Es liegt sehr nahe, bei der Computerprogrammierung nach Richtungen zu suchen, die Erfolg bei der Nachahmung auch dieser Eigenschaften des Gehirns versprechen, und selbst in der Schaltkreistechnik nach Strukturen zu streben, die mehr Hoffnung auf derartige Lösungswege bieten als die klassische logisch-mathematische Präzision. Der favorisierte Kandidat ist das assoziative System. Denn die assoziativen Fähigkeiten des Gehirns können sehr mit der Genauigkeit

geistigen Dispositionen, die zwei oder mehr unterschiedbaren Bewußtseinsinhalten entsprechen, die während einer und durch eine Erfahrung gebildet wird und die von solcher Art ist, daß, wenn der eine Bewußtseinsinhalt wieder auftritt, auch der andere in bestimmter Weise und Intensität dazu neigt, wieder aufzutreten.

Das klingt nicht gerade nach einem verlässlichen Mechanismus (was erklärt, warum er so schwer zu verstehen ist und warum man ihn nur schwer programmieren kann), aber offenbar ist das doch die Basis für einen guten Teil der menschlichen Schöpfungskraft. Vielleicht muß es so sein, daß ein schöpferisches System unverlässlich und ein verlässliches System unschöpferisch ist. Plato gab nur ein Beispiel (der Anblick der Lyra der Geliebten löst ähnliche Empfindungen aus wie der Anblick der Geliebten selbst) — Aristoteles klassifizierte in Assoziation durch Ähnlichkeit, durch Kontrast und durch Nähe. Die Empiristen griffen im 17. Jahrhundert das Konzept der Assoziation wieder auf: John Locke (1632-1704) und David Hume (1711-1776) fügte die Assoziation durch Kausalität hinzu.

Im folgenden Jahrhundert hat sich dann eine Schule der Assoziationspsychologie entwickelt, für die alles geistige Leben von sensorischer Stimulation herrührt und nach der alles Wissen auf die assoziative Verknüpfung von Elementarereignissen zurückgeführt werden kann. Ein solcher Bild muß den ambitionierten Programmierer mit der Hoffnung erfüllen, dieses Konzept in der Maschine verwirklichen zu können und damit in der Tat auf eine künstliche Intelligenz vorzustößen.

Er kann sich darin bestärkt fühlen durch die weitere Geschichte der Psychologie. Zwar kamen gegen Ende des 19. Jahrhunderts immer stärkere Argumente gegen diesen Traum von der Perfektion auch in der Naturwissenschaft auf, zugleich aber erhielt die Assoziationspsychologie Unterstützung von der Physiologie: die Prozesse in den Nervenzentren wurden experimentell untersuchbar, und insbesondere die Arbeiten von J. P. Pavlov (1849-1936) legten es nahe, Assoziation und Konditionierung auf das gleiche Prinzip, auf die Schaltvorgänge in den Neuronen zurückzuführen. Während die Würzburger Schule und die Gestaltpsychologie diesen analytischen Vorstellungen synthetische Prinzipien entgegensetzte, verstärkte die von John Broadus Watson (1878-1958) ausgehende Verhaltensforschung das Schwergewicht der Mecha-



Daß Perfektion nicht erreichbar ist, stellt auf der anderen Seite keinen Grund dafür dar, die Versuche aufzugeben. Wenn man sich der Einschränkungen bewußt ist und sie in allen Stadien berücksichtigt, dann kann die assoziative Technik ein besseres Pendant zur algorithmischen Behandlung werden als alle anderen bisher versuchten heuristischen Verfahren. Freilich beweist man sich in ein No-Land, für welches man nicht wie bisher mit geriffelten Werkzeugen ausgerüstet ist.

Es spricht zum Beispiel alles dafür, daß assoziative Verfahren nur im Parallelbetrieb sinnvoll verwendet werden würde viel zu lange dauern, wollte man alle Eintragungen der gespeicherten Informationen in Serie auf Assoziationen ablesen.

Vielmehr muß man ganze Büschel gleichzeitig prüfen und die Prüfung abbrechen, sobald das Ergebnis negativ genug ist. Es dürfte keine Schwierigkeiten machen, in der künftigen integrierten Technologie derartige Parallelisierungs-gänge billig genug zu realisieren. Unser gesamtes Instrumentarium an mathematischen Prozessen aber ist wesentlich sequentiell, und wir werden in einem Maß undenken müssen, das wenige Hoffnungen auf baldige spektakuläre Erfolge übrig läßt. Bei der erwähnten amerikanischen Forschungsbegleitung über assoziative Systeme haben Marvin Minsky und Seymour Papert, vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) einige Ansätze vorgebracht, aber auch die vor uns liegende Arbeit deutlich gemacht.

Nur andeutungsweise sei auf die Spannweite der Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet hingewiesen. Eine Gruppe versucht, für ein militärisches Informationssystem eine assoziative Sprache zu entwickeln, die in den Daten alle vorhandenen Einheiten nach dem Bestand an Leuten und Ausrüstung erfäßt, mit Angaben wie Standort und Aufgabeneinstellung, Dienstgrad und Ausbildung, Gewicht und Verwendbarkeit von Geräten usw. Da man hier weitgehend von einer konstruierten Realität reden kann, dürften Suchprogramme ziemlich erfolgreich werden; sie könnten die für ein Problem nächstgelegene beste Gruppe samt Ausrüstung besser herausfinden als der suchende Mensch.

Wie man aus einem Gebirge von ganz unterschiedlichen Statistiken — es gibt eine Stelle in

Washington, die alle Statistiken erhält, die sich die amerikanische Regierung beschaffen kann — die beste Information herausschöpfen, wurde von einer zweiten Gruppe nicht ganz ersichtlich gemacht, wenngleich eine beeindruckende Programmierungsarbeit in Richtung auf das Ziel vorstellig wurde. Hier mögen semantische Dis-krepanzen gelegentlich zu total falschen Schlüssen führen, meist aber wird man doch weit bessere Ergebnisse erzielen als ohne Computer.

Wenn eine dritte Gruppe davon träumt, mit einer Art assoziativen Satzzerlegungsmethode einem Computer mit langwieriger Gedächtnis-schleife ein strukturiertes Wissen beizubringen, das mit dem Wissen eines menschlichen Gehirns vergleichbar ist, dann darf man getrost ein Mißerfolg voraussagen, auch wenn alle Gedächtniseinträge von einem Wissens-schaffler an der Konsole überwacht werden.

Solange es um so einfache Beziehungen wie Rechtsanwalt: Klient geht, und nur um ein paar hundert davon, mag man das System unter Kontrolle halten können — sind es aber erst ein paar hunderttausend Relationen und komplizierte Zusammenhänge, dann wird sich das System er-sens selbst lähmen und zweitens an den Tücken der lebendigen Sprache scheitern, mit denen auch der intelligenteste Mensch ein Leben lang kämpft (ob er es merkt oder nicht).

Auch die assoziativen Verfahren werden also den Computer nicht zum Elektronengehirn und zur Denkmachine machen — aber sie werden zu einem neuartigen Feld der Informationsverarbeitung führen, dessen erfolgreiches Anwen-dungsbereich heute niemand voraussehen kann.

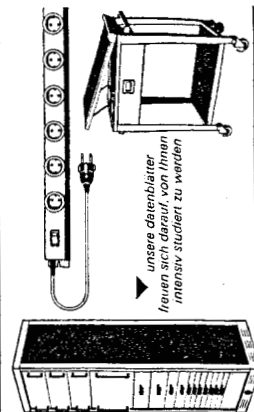
Der Computer ist ein Werkzeug und hat die Grenzen der technischen Schöpfung; innerhalb dieser Grenzen aber bringt die Kleinarbeit der wissenschaftlichen Forschung Leistungen zu, denen die Phantasie auch der kühnsten Science-fiction-Autoren bisher noch nicht vor-susellen vermochte. Aus der Psychologie und Philosophie stammt die Anregung zu assoziati-ven Systemen, von dort kann man auch die Hin-weise auf Grenzen und die Warnung vor über-triebenen Hoffnungen holen — alles zusammen aber bestätigt, daß der Computer so faszinierend geblieben ist, wie er in den Pionierzeiten war.

Heinz Zemanek

## AUS DEM INHALT

Der Weg der Informatik  
Vom ersten arbeitenden Computer Z 3 bis zum assoziativen Speicher  
Hans-Knurr, Dr.-Ing. E. h. Konrad Zuse, Hünfeld  
Assoziative Systeme / Prof. Dr. techn. Heinz Zemanek, Wien  
Mechanismen der Informationsverarbeitung und -speicherung im Gehirn  
Prof. Dr. med. Otto D. Creutzfeldt, Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen

Prinzip und Anwendung des Assoziativ-Speichers  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Otto Lethlich, Institut für Datenerarbeitungsanlagen der Technischen Universität Braunschweig  
Zur Technologie der Assoziativ-Speicher / Dipl.-Phys. Rudolf Leibbrand, Wiesbaden



unsere Datenblätter  
haben sich darauf, von ihnen  
intensiv studiert zu werden

unser Gesamtprogramm umfaßt  
3 Hauptproduktgruppen

- 1 ein äußerst umfassendes programm angeordnet und ungenormten mechanischen Bauteilen für die elektron. d. h. Schranke, einschübe. Tischgehäuse, teilschubsysteme nach DIN 41 494 und 41 490.
- 2 ein umfangreiches programm an stromverteilungs-leistungen für die Industrie, Institute, Behörden und Haushalte.
- 3 ein programm von 23 verschiedenen labor- und werkstattwagen.



hans knurr ko  
8 müchen 80, ampfingstraß 27  
telefon (0811) 40 30 45  
fa. 529 608 hams d

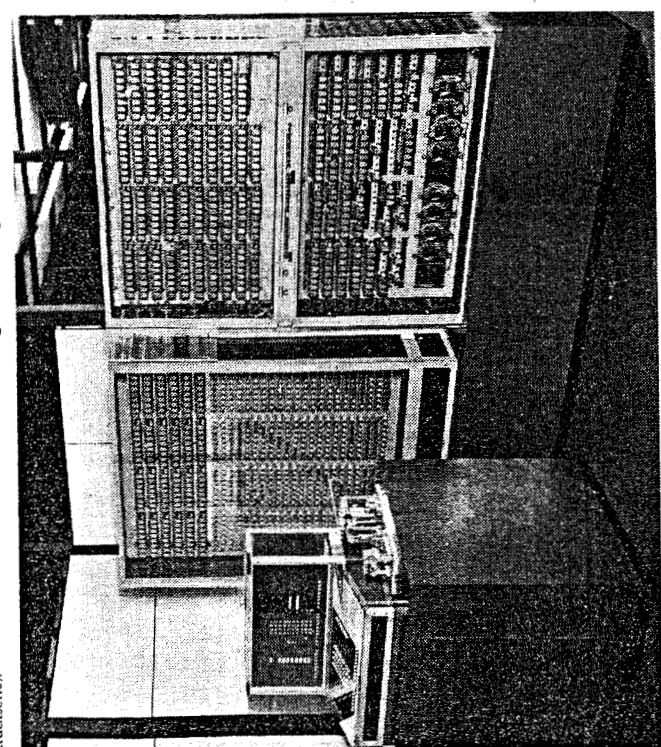
ihre elektronik ist gut  
und deshalb einer  
knurr mechanik wert

langzeitiges Gernut ist tatsachen ganz anders geartet, als die logische Kombinationsfähigkeit der elementaren Computerfunktionen und -schaltkreise.

Die Schöpfungskraft der assoziativen Verknüpfung ist schon lange vor dem naturwissenschaftlichen Zeitalter aufgefallen und schon in der griechischen Philosophie behandelt. Die assoziative Technologie ein bischen mit den Erkenntnissen der Philosophie auszuweichen, erschien mir reizvoll im Zusammenhang mit dem Schulreiferat für eine amerikanische Forschungsbegleitung über assoziative Systeme, das ich vor eini-ger Zeit dort gehalten habe.

## Assoziation in Psychologie und Philosophie

In einem Wörterbuch der Psychologie fand ich eine computernde Definition der Assoziation; sie redet von Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe: „Assoziation (von Ideen) ist eine mehr oder weniger vollständige Verbindung zwischen den



1941 WURDE DIE ERSTE PROGRAMMGESTEUFTE RECHENANLAGE DER WELT VON KONRAD ZUSE fertiggestellt. Das Rechengert, das im Auftrag der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt entwickelt wurde, erreichte eine Geschwindigkeit von 15–20 arithmetischen Operationen je Sekunde. Es führte eine Multiplikation in 4–5 Sekunden aus. Diese programmgesteuerte Rechenanlage enthielt ein Rechenwerk aus 600 Relais und einen Relaispeicher für 64 Zahlen zu 22 Dual- bzw. 7 Dezimalstellen. Insgesamt waren 2900 Relais eingebaut. Das Rechenprogramm wurde aus einem gelochten Kinofilmstreifen (8 Spuren) getestet. Die Zahl der Programmschritte war daher nicht durch die Speicherkapazität begrenzt. (Die Reproduktion der Zuse Z 3 befindet sich im Deutschen Museum München.)

# hamek für die elektronik

## Mechanismen der Informationsverarbeitung und -speicherung im Gehirn

Seit dem Beginn der Computertechnik, also seit den 1940er Jahren, werden immer wieder Ansätze versucht, auch das Gehirn als Computer zu verstehen. Diese Versuche wurden einerseits von Computeringenieuren, andererseits von Neurobiologen unternommen, und die entsprechenden Gedanken und Hypothesen sind in einer Reihe von Büchern niedergelegt, von denen das bekannteste das sog. Hixon-Symposium von 1951 ist (Cerebral mechanisms in behaviour; Herausgeber: L. A. Jeffress; Hafner Publishing Co., New York/London, 2. Ausgabe 1967). In diesem Band zeigen u. a. Pitts und McCulloch, daß alle logischen Operationen wie Addition, Multiplikation, und — oder — Schaltungen, Gleichheit etc. durch kleine Nervennetze von 5 bis 10 Nervenzellen durchgeführt werden können.

Der Fehler dieser Modelle ist nur, daß derartige Schaltkreise nicht in Wirklichkeit im Nervengewebe existieren und daß die verwendeten Schaltelemente, die Nervenzellen, idealisiert wurden und somit Aktivitätsmuster zeigen, die in Wirklichkeit ebenfalls nicht existieren. Diesen Theo-

rien hat auch im gleichen Band der Mathematiker und einer der ersten Theoretiker der Informatik widersprochen. Er führt im einzelnen aus, daß es nicht sinnvoll sei, Computerstrategien (oder allgemeiner: Strategien der klassischen Logik) zum Verständnis der Arbeitsweise des Gehirns heranziehen. „Es ist statt dessen durchaus möglich, daß der einfachste und einzig praktische Weg zur Darstellung eines bestimmten Erkenntnisvorganges im Gehirn (in dieser Untersuchung: die Feststellung visueller Ähnlichkeit) der sei, eine Beschreibung der Verbindungen der Gehirnteile zu geben, die die entsprechenden Nachrichten (hier: visuelle Nachrichten) verarbeiten.“

Er sagt weiter: „Ich bin davon überzeugt, daß eine neue, im wesentlichen logische Theorie notwendig ist, um hoch komplizierte Automaten und besonders das Gehirn zu verstehen. Es kann aber sein, daß hierbei die Logik eine Art Pseudomorphose zur Hirnforschung hin durchmachen muß, eher als umgekehrt.“ Heute wenden sich denn auch die theoretischen Neurobiologen ganz dem „real nervous system“ (mit einem kleinen Seitenhieb auf die Molekularbiologen, spöttisch „RNS“ genannt) zu und von anderen Modellen ab, wie den technischen Computern oder den molekularbiologischen Mechanismen der Kodierung und Übertragung von Erbinformationen in chemischen Codes.

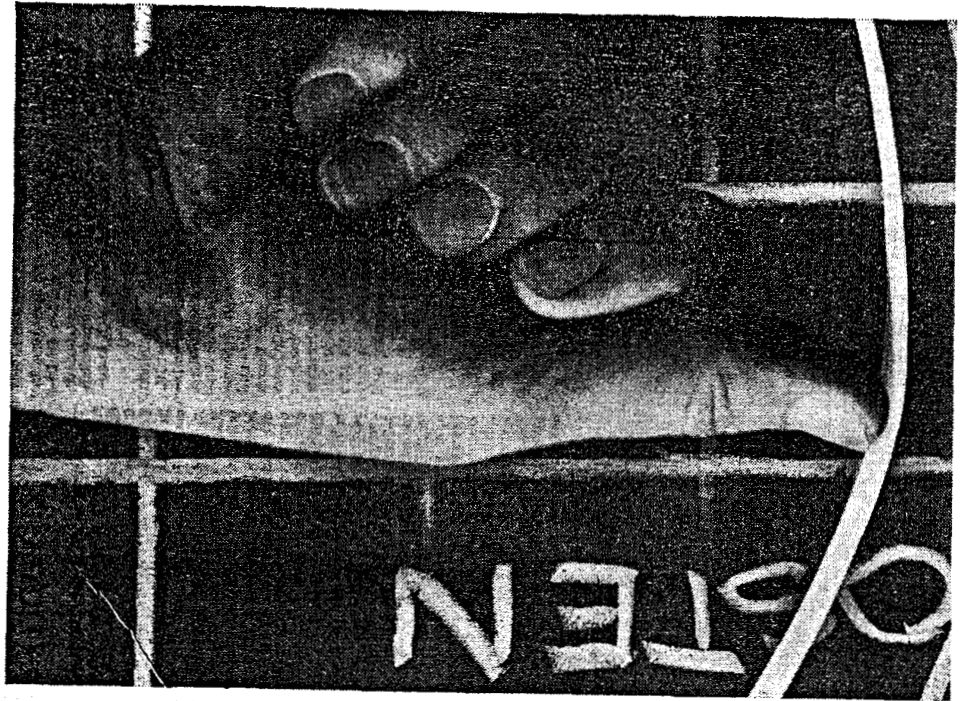
Die einzelnen Schaltelemente des Gehirns sind die Nervenzellen, von denen das menschliche Gehirn etwa 10<sup>10</sup> bis 10<sup>11</sup> (also zehn bis hundert Milliarden, aber ein Insekt auch schon 10<sup>8</sup>) (also eine bis hundert Millionen) enthält. Die Arbeitsweise dieser Schaltelemente ist im wesentlichen bekannt. Sie verwandeln elektrische Potentialschwankungen auf der Eingangsseite (Erregungen) in Impulsen, deren Frequenz der Erregung proportional ist. Die Nachrichten aus der Umwelt (chemische oder physikalische Reize wie Geruch, Geschmack, Licht, Schall, Druck etc.) werden von Rezeptoren in elektrische Potentialschwankungen umgewandelt, die dann die nachgeschalteten Nervenzellen erregen. Die Erregung einer Nervenzelle wird über Verbindungsfasern (Nervenfaser oder Axone) in Gestalt von Erregungspropagationen Impulsen an andere Nervenzellen weitergeleitet. Diese Impulse lösen an den Kontaktstellen (Synapsen) mit den nachgeschalteten Nervenzellen wieder-

zen in den parallelen Kanälen, gleichzeitig ins Gehirn gesandt und nicht wie beim Fernsehgerät im Scanningverfahren abgetastet wird.

Tatsächlich sind die Verhältnisse noch komplizierter, da nur etwa die Hälfte der retinalen Nachrichtenkanäle, sprich Nervenzellen, auf erhöhte Beleuchtungsstärke mit einer Zunahme, die andere Hälfte jedoch mit einer Abnahme der Entladungsfrequenz reagieren. Außerdem gibt es noch farbspezifische Rezeptorkanäle, so daß wir bereits in der Netzhaut getrennte Registrierungssysteme für Helligkeit, für Dunkel- und für Farbverteilungen vor uns haben. Ähnliches gilt auch in entsprechender Abwandlung für die anderen Sinnesorgane.

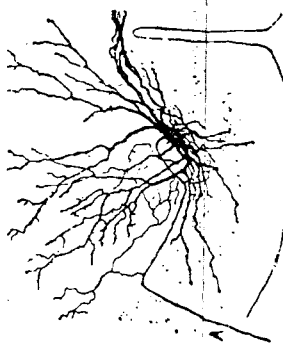
Diese dem Reizmuster entsprechende räumliche Erregungsverteilung wird unter weitgehender Beibehaltung der räumlichen Beziehungen zwischen den einzelnen Punkten, also parallel in das Gehirn gesandt. Auf diese Weise kommt es zu einer Projektion der Umwelt auf die Gehirnoberfläche, und zwar getrennt für die visuelle, die auditive und die taktile Umwelt. Diese Landkarten der Umwelt entsprechen in ihrer Ausdehnung nicht genau der tatsächlichen Umwelt, sondern zeigen entsprechend der Wichtigkeit eines bestimmten Rezeptorenbereichs stärkere oder schwächere Repräsentation, sind also entsprechend der funktionellen Bedeutung eines einzelnen Rezeptorenfeldes verschieden gewichtet.

Bereits auf dem Weg zur Hirnrinde, und in gesteigertem Maße dortselbst, kommt es in verschiedenen Schaltungsstufen zu einer Querverbindung zwischen den einzelnen parallelen Kanälen. Bei diesen Querverbindungen verwendet das Nervensystem nun noch einen weiteren Trick, indem es derartige Querverbindungen fast ausschließlich als inhibitorische Verbindungen ausbildet, so daß sich benachbarte Kanäle gegenseitig hemmen. Auf diese Weise gelingt es, Kontraste im Erregungsfeld besonders stark hervorzuheben, und in den höheren Hirnzentren (also der Hirnrinde) bestimmte Reizaspekte besonders hervorzuheben, wie z. B. Linien bestimmter Ausrichtung oder Bewegungen von Objekten in bestimmter Richtung im visuellen, Tonkombinationen und Tonfolgen im auditiven Bereich. Auf Grund dieser besonderen Empfindlichkeit einzelner Elemente auf be-





von etwa 3 bis 40 out/sec übertragen.



NERVENZELLE AUS DEM RÜCKENMARK.  
(Darstellung des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie, Göttingen.)

Derartige Reizübertragungsmechanismen mit einem Taster im Eingang, der einen physikalischen Wert (Temperatur, Druck, Licht o.ä.) in analoge elektrische Werte umwandelt, wird auch technisch vielfach verwandt (Transducer). Das Nervensystem leistet sich jedoch einen Luxus, der in technischen Maschinen nur schwer realisierbar ist: Jeder Orspunkt auf der Rezeptoroberfläche (d.h. der Körperoberfläche, der Netzhaut, dem Hörgang etc.) wird durch einen eigenen Nachrichtenkanal repräsentiert, also durch jeweils eine Nervenzelle mit der zugehörigen Nervenfasern. Die Netzhaut (Retina) des Menschen erhält z.B. 1 Million Nervenzellen, so daß also eine Million Punkte des Gesichtsfeldes abgetastet werden können. Die Beleuchtung jedes einzelnen Punktes führt zu einer Intensitätsabhängigen Impulsfrequenzänderung in dem zugehörigen Einzelkanal, so daß das gesamte retinale Bild, umgewandelt in Entladungsfrequenzen, etwa 3 bis 40 out/sec übertragen.

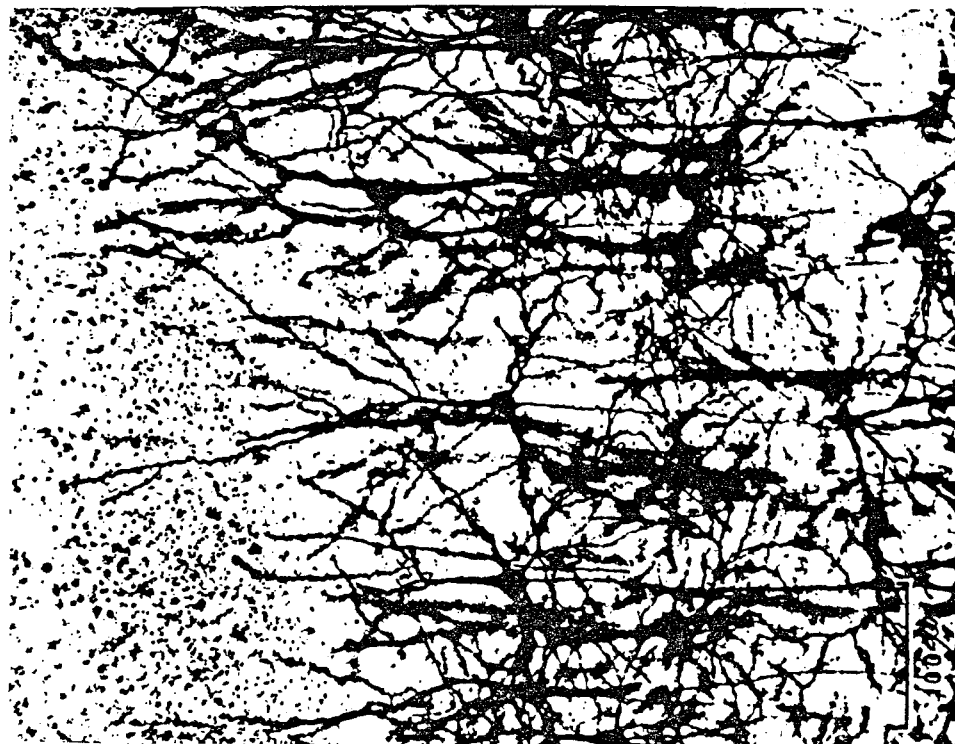
über nicht Funktionen der einzelnen Neurone, sondern Folge der Zusammenschaltung der in der jeweiligen Übertragungsrichtung beidseitig miteinander inhibitorisch verschalteten Orkanäle sind, läßt sich leicht ableiten, daß die Hervorhebung eines bestimmten Reizespektes gleichzeitig zur Unterdrückung eines anderen Aspektes im gleichen Ortsbereich führt. Mit anderen Worten: die Wahrnehmung eines komplexen Reizparameters beeinflußt das ganze Netzwerk des entsprechenden Sinnesbereiches (visuell, auditiv etc.).

Mit der sicheren Nervennetzstruktur als Informationsgewebe dienen kann, müßten komplexe Erregungsfelder nicht nur im Augenblick des Reizes, sondern auch langdauernd zu verändernden Erregbarkeitsbedingungen in dem Nervennetz führen. Gedächtnis wäre dann nichts anderes als eine durch vorerregte Reize modulierte Bannung horizontaler Erregungsfelder in den kortikalen Analysatoren.

Eine solche Modifizierbarkeit des kortikalen Analysators wurde in letzter Zeit bei jungen Tieren im visuellen Bereich nachgewiesen: Bei Katzen, die von Geburt an nur einer bestimmten Reizart (z.B. vertikalen Streifenmustern) ausgesetzt wurden, werden die Musterfilter für komplexer verschiedene Reize (also horizontale Streifen) ganz unterdrückt. Dies ist eine grobe, aber eindrucksvolle experimentelle Unterstrichung mancher psychoanalytischer Vorstellungen, nach denen bestimmte Erlebnisse (genisch Reaktionskombinationen) in früher Kindheit zu bleibenden Veränderungen der Erlebensbereitschaft führen können. Natürlich genügt bei solchen komplexen Vorgängen wie Erlebnis nicht die Modifikation der primären Sinnesfelder, sondern hier müssen Änderungen in den entsprechenden höheren Verschaltungsebenen des Nervensystems angenommen werden, in denen eben diese Erlebnisse „analysiert“ werden.

In allerletzter Zeit häufen sich Befunde, die die Auffassung unterstützen, daß die Analysatoren nicht nur lernen können, sondern auch selbst der Ort der Gedächtnisspeicherung sind. Bisher gibt es keine Beweise für die lange verfochtene Theorie, daß es im Gehirn einen umschriebenen Speicherplatz für das „Gedächtnis“ gibt. Vielmehr weisen bei kritischer Betrachtung alle Befunde darauf hin, daß Gedächtnisinhalte an den Orten gespeichert werden, an denen sie auch bei der Eingabe in das System analysiert werden. Damit sind nun die besten Voraussetzungen für einen Assoziationspeicher gegeben. Wenn eine dem bereits gespeicherten Erregungsmuster ähnliche Erregungskombination in das System eingegeben wird, kommt es zu einer besonders starken Reaktion und unter günstigen Bedingungen auch zu einer Aktivierung des gespeicherten Musters, also zum assoziativen Erinnern.

Es ist geradezu aufregend, wenn man diese modernen Ansätze zu einer Modellvorstellung über das Gedächtnis den alten Vorstellungen der Assoziationspsychologie des 17.-19. Jahrhunderts und sogar den Vorstellungen von Aristoteles über das Gedächtnis vergleicht. Aristoteles sagt in seiner Schrift über „Gedächtnis und Erinnern“ sinngemäß: „Die Jagd nach einem im Gedächtnis aufbewahrten Eindruck wird dadurch begünstigt, daß man sich Eindrücke ins Gedächtnis ruft, die zu dem Gesuchten im Verhältnis der Ähnlichkeit, des Gegensatzes oder der räumlichen und zeitlichen Nähe stehen.“ In moderner neurophysiologischer Terminologie würde man sagen: „Indem man in dem gespeicherten räumlich-zeitlichen Erregungsmuster ein ähnliches Erregungsmuster hervorruft, so hat die Vorstellung von Neurophysiologen über Informationsverarbeitung den eingangs erwähnten und auch im Beitrag von Zuse und Zemanek ausgeführten Vorstellungen einer neuen Computertlogik kommen.“ Otto D. Creutzfeldt



DARSTELLUNG VON EINIGEN NERVENZELLEN AUS DEM NERVENNETZ DER GROBHIRNRINDE. Nach oben erstrecken sich die Fortsätze (Dendriten), nach unten verlängerte Nervenfasern (Axon). Die dicken Punkte sind die Nervenfortsätze. Signale werden über die Nervenfasern in diesem Nervenetz gesandt und nach Umschaltung über die Axone wieder aus der Großhirnrinde herausgesandt. Die Nachrichtenverarbeitung erfolgt durch zahlreiche Kontakte zwischen den Nervenzellen des Nervenetzes. (Darstellung Archiv des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie, Göttingen.)



# Die beste Methode, Ihre Kosten nach unten zu drücken, heißt heute: PSS!

Und damit zum Benutzer unseres Planungs- und Steuerungssystems für Industriebetriebe. PSS – ein Produkt aus der Anwendungsentwicklung von AEG-TELEFUNKEN.

ZWA 4302

Schar kalkulierende Industrieunternehmen sind darauf angewiesen, das Kostenminimum zu erreichen. Wir helfen Ihnen dabei. Mit unserem Großrechenystem TR 440.

Im Rahmen unseres vielfältigen Programms an Anwendungs-Software bieten wir Industrieunternehmen ein umfangreiches Planungs- und Steuerungssystem für die Produktion – kurz PSS.

Kapazitätsplanung, Fertigungssteuerung, Materialdisposition, die laufende Bestandsführung und das Errechnen der optimalen Losgröße werden von PSS übernommen. Selbstverständlich speziell auf Ihr Problem zugeschnitten. Das Ergebnis: geringere Produktionskosten, höhere Lieferbereitschaft, kostengerechte Kalkulation.

Eine abgesetzte Datenstation, Fernschreiber oder Sichtgerät, angeschlossen über eine einfache Telefon- oder Telexleitung an den zentralen Rechner, machen Sie zum Teilnehmer unseres Großrechenystems TR 440.



GROSSRECHENSYSTEM  
**TR 440**

Der Kern von Daten-Verarbeitungs-(DV)-Anlagen besteht bekanntlich aus Bausteinen wie Rechenwerken, Steuerwerken und Speichern. In den Rechen- und Steuerwerken werden die Informationen vorwiegend verarbeitet („logisch verküpft“). In den Speichern zwischenzeitlich aufgehoben. Diese Aufteilung ergab sich historisch aus den verfügbaren Technologien.

Obwohl DV-Anlagen mit diesen Bausteinen alles berechnen können was programmiert ist, ergeben sich besonders bei großen Dokumentationsaufgaben oft Grenzen durch übermäßigen Speicher- oder Zeitbedarf. Systemänderungen derartigen Ausmaßes lassen den Wunsch aufkommen, Bausteine zu haben, in denen Speicher- und Verküpfungsfunktionen vereint sind. Durch die moderne integrierte Halbleitertechnik kann dieser Wunsch grundsätzlich realisiert werden; denn Speicher- und Verküpfungselemente werden mit dem gleichen Verfahren in jeder beliebigen Kombination hergestellt. Nur läßt sich wirtschaftlich nicht für jede Aufgabe ein spezielles Gerät herstellen. Standardisierung und

## Prinzip und Anwendung der Assoziativ-Speicher

Typisierung sind in der DV-Technik ebenso wichtig wie in allen Bereichen unseres praktischen Lebens. Man sucht also heute nach neuen Standardbaugruppen, die Datenspeicherung und Verküpfung möglichst universell verwendbar in sich vereinen. Der „assoziative Speicher“ ist ein solcher Baustein.

Es soll daher im folgenden versucht werden, sein Prinzip und seine Anwendungsmöglichkeiten zu erläutern. Es wird sich herausstellen, daß der Mensch im täglichen Leben dieses Prinzip sehr oft benutzt, ja das menschliche Denken selbst darauf beruht, so daß es sich hier darum handelt, die Grundbegriffe genauer zu erklären und auf die Technik zu übertragen.

Informationen werden zur Speicherung zweckmäßigerweise als bestimmte Einheitsgrößen „verpackt“, z. B. 7stellige Dezimalzahlen, 8-Buchstaben-Wörter, Bytes, Blöcke etc. Man nennt diese Einheiten „Wörter“. Diese „Wörter“ muß Plätze im Speicher haben, in die sie mehr oder weniger bequem und schnell herein- und herausgeräumt werden kann. Der wesentliche Unterschied zwischen den bekannten (üblichen) „Adress-Speichern“ und dem hier behandelten Assoziativ-Speicher besteht in der „Lagerordnung“ bzw. in der Art, wie die „Wörter (die „Wörter“) auf die Speicherplätze verteilt und wieder aufgesucht wird.

Beim „Adress-Speicher“ sind die Speicherplätze wohlgeordnet, nummeriert („adressiert“) und ein Aufsuchmechanismus bestimmt nach der „Adresse“ den Platz, auf den ein neues Informationswort eingespeichert (eingeschrieben) werden oder von dem ein gespeichertes Wort ausgelesen (ausgelesen) werden soll.

Beim Assoziativspeicher gibt es keine vorgegebene Speicherordnung. Man sucht die gespeicherten „Wörter“ danach aus, ob ein Teil ihres Inhalts (ein Merkmal, ein Deskriptor, z. B. die ersten 4 Ziffern jedes Wortes) mit einem gewünschten Suchmerkmal übereinstimmt. Man sucht also nach dem Wort, bzw.

nach all dem Worten, die in bezug auf ein gegebenes Kriterium mit dem Suchwort „assoziativ“ (= verbunden, zusammengehörig) sind. Nachdem das Merkmal selbst ein Teil der gespeicherten Information ist — und nicht die Nummer des Speicherplatzes —, nennt man assoziative Speicher auch treffend „Inhalts-adressierte Speicher“.

Wenn der Speicher sehr groß ist und alle gespeicherten Worte eines nach dem anderen durchgeprüft werden müssen, kann das sehr lange dauern. Man ordnet daher jedem einzelnen Wort eine Schaltung zu, die das jeweilige Merkmal mit dem gemeinsamen Suchmerkmal vergleicht. Das geschieht dann gleichzeitig bei allen Worten, erfordert aber zusätzlichen Aufwand für die Verküpfungsschaltungen.

Dazu folgende Analogie aus dem täglichen Leben. Der Lehrer in der Schulklasse ruft: „Klaus Müller!“ Alle Schüler hören den Namen und vergleichen ihn gleichzeitig mit ihrem eigenen. Klaus Müllers Name koinzidiert mit dem Suchwort — er meldet sich.

„Melden“ entspricht in der Technik einem Signal aus der Vergleichsschaltung des aufgerufenen Wortes, das in einer ihm zugeordneten Merkschaltung (Flip-Flop) gespeichert wird. Danach wird bestimmt, was mit dem aufgesuchten Wort nun geschehen soll, z. B. ob es ausgelesen oder neu beschrieben werden soll.

Ein Aufzug nach einem wählbaren Kriterium ist eine wesentliche Eigenschaft assoziativer Speicher, die beim Adress-Speicher nicht vorhanden ist. Versuchen Sie einmal, aus dem Münchner Telefonbuch eine Nummer zu finden, wenn Sie nur die postale Adresse, nicht aber den Namen des Teilnehmers wissen! (Durchblättern und alle Adressen vergleichen!)

Ein Aufzug nach einem wählbaren Kriterium ist eine wesentliche Eigenschaft assoziativer Speicher, die beim Adress-Speicher nicht vorhanden ist. Versuchen Sie einmal, aus dem Münchner Telefonbuch eine Nummer zu finden, wenn Sie nur die postale Adresse, nicht aber den Namen des Teilnehmers wissen! (Durchblättern und alle Adressen vergleichen!)

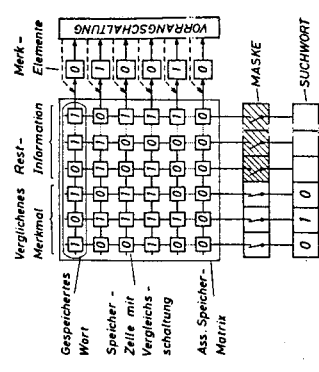
Elektronisch wählt man das Merkmal durch Herausheben der Informationsstelle, die als Auswahlkriterium dienen sollen, im Fachregister „maskiert“, d. h. sie spielen bei der Auswahl keine Rolle. Beliebige Kombinationen von Merkmalen sind möglich.

Nun kann die Frage des Lehrers auch lauten: „Wer kann schwimmen?“ Ein großer Teil meldet sich. Die Hände werden gezählt oder die Namen nacheinander vom Lehrer aufgeschrieben. Bei einer solchen „multiplen Koinzidenz“ sind die markierten Worte nacheinander z. B. auszulesen. Eine Vorrangschaltung besorgt die richtige Reihenfolge. Selbstverständlich gibt es im allgemeinen auch Fragen, die niemand beantworten oder auch alle.

Technisch ergibt sich aus diesem Konzept das Blockschaltbild eines wortorientierten assoziativen Speichers. Man beachte, daß es hier kein Adressenregister und keine Dekoderschaltung gibt. Jedes einzelne Wort, insbesondere jede Bit-Speicherzelle muß aber mehr leisten, als nur Informationen speichern und bei Aufruf abgeben oder aufnehmen zu können. Sie muß auch vergleichen, ob ihr Inhalt mit dem entsprechenden Bit des Suchwortregisters übereinstimmt. Nur wenn alle verglichenen Bits eines Wortes mit denen des Suchwortes übereinstimmen, ist es aufgerufen.

Ein mit Feldefekt-Transistoren vertrauter Leser möge aus dem wiedergegebenen Schaltbild einer Zelle herausfinden, wie das im einzelnen funktioniert. Solche Schaltungen kann man heute kaufen.

Eine Anwendung des assoziativen Speicherprinzips hat sich bereits seit vielen Jahren eingebürgert. Die „Nadelkartei“ gestattet mit Hilfe von Randkardikarten die Auswahl von Literaturkarten nach wählbaren Kriterien (Stichworte, Verfasser). Bei sehr großen Datenbeständen wird die Nadelkartei unhandlich (Versicherungskarten etc.). Assoziative Halbleiterspeicher dürfen für solche Kapazitäten (10<sup>6</sup>–10<sup>7</sup>bits) vorerst

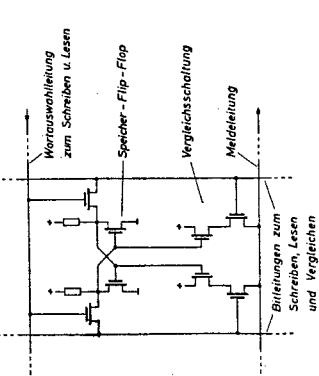


BLOCKSCHALTBIOD EINES ASSOZIATIV-SPEICHERS. Die Schreib- und Leseeinrichtung ist nicht eingezeichnet. (Zeichnung: Institut für Datenverarbeitung der TU Braunschweig.)

## Zur Technologie des assoziativen Speichers

Gestützte bipolare Halbleitertechnik, zum Beispiel TTL (Transistor-Transistor-Logik) ist um einen Faktor 3–4 langsamer als FET, ermin-

maskierung. Auch könnte man an eine kodierte Ausgabe der Übereinstimmungsanzeige denken — allerdings mit dem Nachteil, daß dann Mehrfachübereinstimmungen ausgeschlossen werden müssen. Serie-Parallel-Umwandlung für Eingabe bzw. Parallel-Serie-Wandlung für Ausgabe der Deskriptor-Schreibe- und Leseinfor-



VEREINFACHTES SCHALTBIOD EINES ASSOZIATIVEN ZELLE. Auf einem Chip befinden sich hiervon 8x16=128. (Zeichnung: TMS 4000 IC/Texas Instruments).

Bald nach seinem Entstehen ist der Halbleiter zum Schrittmacher der Entwicklung moderner Datenverarbeitungsanlagen geworden. Vor Jahren schon wurden mit Hilfe von Transistoren Rechenwerke und Steuerlogiken realisiert. Die integrierte Schaltung brachte kompakte Bauweise, erhöhte Zuverlässigkeit und erhöhte Lei-



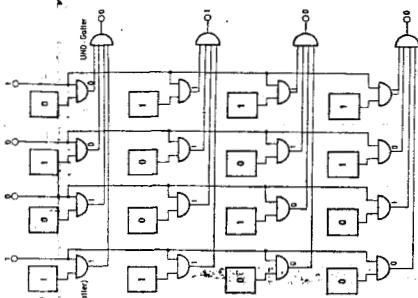
neue Anwendungen als mit zur zukünftigen Entwicklung und zum assoziativen Rechnen brauchbar. Maskiert man z.B. sämtliche Bitkolonnen bis auf eine, dann kann der Inhalt dieser Bitkolonne direkt über die Überstimmungsanzeigeleitungen ausgelesen werden, ähnlich kann über die Adressleitungen in eine Bitkolonne geschrieben werden. Es entsteht so eine Matrix, die neue Anwendungen als mit zur zukünftigen Entwicklung und zum assoziativen Rechnen brauchbar. Maskiert man z.B. sämtliche Bitkolonnen bis auf eine, dann kann der Inhalt dieser Bitkolonne direkt über die Überstimmungsanzeigeleitungen ausgelesen werden, ähnlich kann über die Adressleitungen in eine Bitkolonne geschrieben werden. Es entsteht so eine Matrix, die

neue Anwendungen als mit zur zukünftigen Entwicklung und zum assoziativen Rechnen brauchbar. Maskiert man z.B. sämtliche Bitkolonnen bis auf eine, dann kann der Inhalt dieser Bitkolonne direkt über die Überstimmungsanzeigeleitungen ausgelesen werden, ähnlich kann über die Adressleitungen in eine Bitkolonne geschrieben werden. Es entsteht so eine Matrix, die

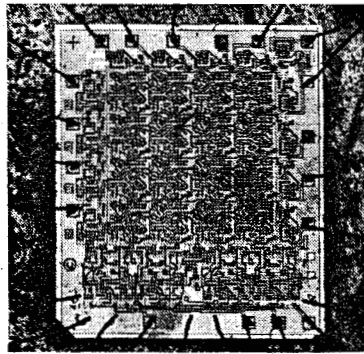
neue Anwendungen als mit zur zukünftigen Entwicklung und zum assoziativen Rechnen brauchbar. Maskiert man z.B. sämtliche Bitkolonnen bis auf eine, dann kann der Inhalt dieser Bitkolonne direkt über die Überstimmungsanzeigeleitungen ausgelesen werden, ähnlich kann über die Adressleitungen in eine Bitkolonne geschrieben werden. Es entsteht so eine Matrix, die

neue Anwendungen als mit zur zukünftigen Entwicklung und zum assoziativen Rechnen brauchbar. Maskiert man z.B. sämtliche Bitkolonnen bis auf eine, dann kann der Inhalt dieser Bitkolonne direkt über die Überstimmungsanzeigeleitungen ausgelesen werden, ähnlich kann über die Adressleitungen in eine Bitkolonne geschrieben werden. Es entsteht so eine Matrix, die

neue Anwendungen als mit zur zukünftigen Entwicklung und zum assoziativen Rechnen brauchbar. Maskiert man z.B. sämtliche Bitkolonnen bis auf eine, dann kann der Inhalt dieser Bitkolonne direkt über die Überstimmungsanzeigeleitungen ausgelesen werden, ähnlich kann über die Adressleitungen in eine Bitkolonne geschrieben werden. Es entsteht so eine Matrix, die



SCHEMATISCHER LOGIKAUFBAU EINES ASSOZIATIV-SPEICHERS mit 4 Worten zu je 4 Bit. Die oben angelegte Merkmalfolge 1 0 0 1 wird durch 18 Vergleichsschaltungen mit den 4 gespeicherten Worten 1 0 1 0, 1 0 0 1, 0 1 0 1 und 0 0 1 1 verglichen. Beim zweiten Wort liegt an jeder Stelle Übereinstimmung vor; über die „UND-Gatter“ wird das Übereinstimmungssignal nach außen abgegeben. Der Einfachheit halber wurden beim Logikaufbau Schaltungssteile für die Adressierung, das Schreiben, Lesen und Maskieren weggelassen. (Zeichnung: Fairchild.)



EINE 16-BIT-ASSOZIATIV-SPEICHER-MATRIX. In der Bildmitte sind die 4 Worte zu je 4 Bit horizontal nebeneinander angeordnet. Die fundierte Bezeichnung im Abstand 4 1 0 2 findet sich oben und damit senkrechtlich / vgl. auch das Teilbild. (Photo: Fairchild.)

Die Gehäusetechnik sorgt für weitere Beschleunigung bei der Konstruktion eines Schaltungsbausteins. Die Zahl der Anschlusspins ist entscheidend für Kosten und Zuverlässigkeit des Elements, je weniger Stifte desto besser. Gerade letztere Einschränkung führt den assoziativen Speicher zu einschneidenden Kompromissen. Ein wirklich flexibler, für viele Anwendungen geeigneter Assoziativspeicherbaustein braucht nämlich Anschlüsse zur Adressierung (einer pro Wort), zum Schreiben und Lesen (je einer pro Bit), zur Ausgabe der Überstimmungsanzeige (einer pro Wort) sowie für Stromversorgung und Steuerung. Soll die assoziative Adressierung wirklich flexibel sein, so ist es wünschenswert, einzelne Speicherzellen für den Informationsvergleich zu maskieren. Dafür sind aber zusätzliche Anschlüsse erforderlich (je 1 pro Bit). Für einen Speicher mit vier Worten zu je vier Bit werden somit schon 23 Anschlüsse benötigt.

Eine der heute wichtigsten Assoziativspeicher-Anwendungen liegt in modernen Datenverarbeitungsanlagen. Leistungssteigerungen in solchen Anlagen sind nämlich z.B. dadurch zu erreichen, daß die Hauptspeicherzugriffszeit verkürzt wird. Da eine solche Erhöhung der Hauptgeschwindigkeit erhebliche Erhöhungen der Kosten und der Verlustleistung mit sich bringt, zieht man ein Verfahren vor, bei dem dem Hauptspeicher ein kleiner, extrem schneller Zwischenspeicher vorgeschaltet ist, in dem die häufigsten gebrauchten Informationen untergebracht werden. Adressiert wird dieser Zwischenspeicher mit Hilfe eines Assoziativspeichers, denn dann braucht beim Hauptspeicherzugriff die ursprüngliche Hauptspeicheradresse nicht in eine neue Zwischenspeicheradresse umgerechnet zu werden. (Der Assoziativspeicher enthält nämlich die ursprüngliche Hauptspeicheradresse). Ein solches Umrechnen der Adresse würde ja den Zeitgewinn wieder zu nichte machen. Systeme dieser Art erzielen Geschwindigkeitsgewinne um einen Faktor 10 bis 100 je nach verwendeter Haupt-Assoziativ- und Zwischenspeicherarchitektur. Leistungssteigerungen dieser Größenordnung in Datenverarbeitungsanlagen wiegen auch relativ hohe Kosten für Assoziativ- und Zwischenspeicher auf.

Es ist daher folgerichtig gedacht, wenn man im Interesse hoher Geschwindigkeit die schnellstmögliche Halbleitertechnik verwendet und Nachteile bei der Komplexität in Kauf nimmt. Oder anders ausgedrückt: Der Kompromiß zwischen Geschwindigkeit und Komplexität hat sich am Gesamtsystem zu orientieren, nicht am einzelnen Teilsystem oder gar Bauteil.

Ein solches Assoziativspeicherelement ist vor einiger Zeit auf den Markt gekommen. Es handelt sich dabei um einen 16-Bit-Speicher, in Technik der in vier Worten zu je 4 Bit organisiert ist. Mit dem Baustein können Speichersysteme gebaut werden für assoziative Zugriffszeiten von etwa 25 Nanosekunden, d.h. in dieser extrem kurzen Zeit kann der Speicher seinen gesamten Inhalt mit einem angelegten Wort vergleichen

Der assoziative Speicher ist — wie im vorhergehenden Beitrag ausgeführt — gekennzeichnet durch seine besondere Art des Datenzugriffs: Der konventionelle Speicher läßt nur sequentielle Datensätze zu, der assoziative Speicher erlaubt ein paralleles, simultanes Ablesen seines gesamten Speicherinhaltes.

Welche Funktionen muß ein assoziativer Speicherbaustein erfüllen?

Neben der schon von der Bezeichnung her selbstverständlichen Fähigkeit, Daten zu speichern, muß ermöglicht werden, daß Daten an vorbestimmten Stellen geschrieben und gelesen werden können. Auf eine Adressiermöglichkeit ist nicht verzichtet werden. Beim assoziativen Auffinden von Informationen müssen außerdem Merkmale für Speicherplätze die angelegten Merkmale mit dem Speicherinhalt verglichen werden. Jeder Speicherzelle ist daher ein exklusives Nor-Gatter zugeordnet, d.h. eine logische Schaltung, deren Ausgang nur dann wahr ist, wenn beide Eingänge denselben logischen Pegel haben. Da eine solche Vergleichsschaltung natürlich nur ein einziges Merkmal (d.h. Speicherbit) auf seine Übereinstimmung hin überprüfen kann, im Regelfall aber nur die Informationen interessieren, die sämtliche angelegten Merkmale gleichzeitig erfüllen, müssen die Ausgänge der Vergleichsschaltungen noch mit Hilfe eines Und-Gatters verknüpft werden. Dieses Und-Gatter erzeugt nur dann einen wahren Ausgang, wenn seine sämtlichen Eingänge „wahr“ sind, d.h. wenn in allen Speicherzellen Übereinstimmung besteht. Dieser wahre Ausgang lokalisiert die gesuchte Information, er entspricht also ihrer Adresse. Häufig besteht der Wunsch, einige Bits pro Wort aus dem Vergleichsvorgang auszuschalten, zu maskieren. Das geschieht zum Beispiel durch Einfügen eines Oder-Gatters zwischen dem Eingang der Vergleichsschaltung und dem entsprechenden Eingang des Und-Gatters am Ausgang. Am zweiten Eingang des Oder-Gatters liegt der Maskierungsanschluß. An diesem wird zum Maskieren eine logische Eins angelegt, das Und-Gatter am Ausgang sieht dann an der betreffenden Speicherzelle immer eine logische Eins, ganz gleich, ob Übereinstimmung herrscht oder nicht, das Vergleichsergebnis an dieser Stelle ist somit maskiert.

Im Rahmen der Halbleitertechnik gibt es verschiedene Prozesse, die erfolgreich zur Herstellung von assoziativen Speichern verwendet werden können. Um den günstigsten auszuwählen zu können, müssen technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte gegeneinander abgewogen werden. Die wichtigsten seien hier dargelegt:

Ungeedrigte bipolare Halbleitertechnik, zum Beispiel ECL (Emitter Coupled Logic) liefert die schnellsten Speicherzugriffszeiten zu, läßt aber andererseits auf Grund ihrer hohen Verlustleistung pro Logikelement nur eine relativ kleine Komplexität (Anzahl Speicherzellen) pro Gehäuse zu.

Der assoziative Speicher ist — wie im vorhergehenden Beitrag ausgeführt — gekennzeichnet durch seine besondere Art des Datenzugriffs: Der konventionelle Speicher läßt nur sequentielle Datensätze zu, der assoziative Speicher erlaubt ein paralleles, simultanes Ablesen seines gesamten Speicherinhaltes.

Welche Funktionen muß ein assoziativer Speicherbaustein erfüllen?

Neben der schon von der Bezeichnung her selbstverständlichen Fähigkeit, Daten zu speichern, muß ermöglicht werden, daß Daten an vorbestimmten Stellen geschrieben und gelesen werden können. Auf eine Adressiermöglichkeit ist nicht verzichtet werden. Beim assoziativen Auffinden von Informationen müssen außerdem Merkmale für Speicherplätze die angelegten Merkmale mit dem Speicherinhalt verglichen werden. Jeder Speicherzelle ist daher ein exklusives Nor-Gatter zugeordnet, d.h. eine logische Schaltung, deren Ausgang nur dann wahr ist, wenn beide Eingänge denselben logischen Pegel haben. Da eine solche Vergleichsschaltung natürlich nur ein einziges Merkmal (d.h. Speicherbit) auf seine Übereinstimmung hinüberprüfen kann, im Regelfall aber nur die Informationen interessieren, die sämtliche angelegten Merkmale gleichzeitig erfüllen, müssen die Ausgänge der Vergleichsschaltungen noch mit Hilfe eines Und-Gatters verknüpft werden. Dieses Und-Gatter erzeugt nur dann einen wahren Ausgang, wenn seine sämtlichen Eingänge „wahr“ sind, d.h. wenn in allen Speicherzellen Übereinstimmung besteht. Dieser wahre Ausgang lokalisiert die gesuchte Information, er entspricht also ihrer Adresse. Häufig besteht der Wunsch, einige Bits pro Wort aus dem Vergleichsvorgang auszuschalten, zu maskieren. Das geschieht zum Beispiel durch Einfügen eines Oder-Gatters zwischen dem Eingang der Vergleichsschaltung und dem entsprechenden Eingang des Und-Gatters am Ausgang. Am zweiten Eingang des Oder-Gatters liegt der Maskierungsanschluß. An diesem wird zum Maskieren eine logische Eins angelegt, das Und-Gatter am Ausgang sieht dann an der betreffenden Speicherzelle immer eine logische Eins, ganz gleich, ob Übereinstimmung herrscht oder nicht, das Vergleichsergebnis an dieser Stelle ist somit maskiert.

Im Rahmen der Halbleitertechnik gibt es verschiedene Prozesse, die erfolgreich zur Herstellung von assoziativen Speichern verwendet werden können. Um den günstigsten auszuwählen zu können, müssen technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte gegeneinander abgewogen werden. Die wichtigsten seien hier dargelegt:

Ungeedrigte bipolare Halbleitertechnik, zum Beispiel ECL (Emitter Coupled Logic) liefert die schnellsten Speicherzugriffszeiten zu, läßt aber andererseits auf Grund ihrer hohen Verlustleistung pro Logikelement nur eine relativ kleine Komplexität (Anzahl Speicherzellen) pro Gehäuse zu.

Der assoziative Speicher ist — wie im vorhergehenden Beitrag ausgeführt — gekennzeichnet durch seine besondere Art des Datenzugriffs: Der konventionelle Speicher läßt nur sequentielle Datensätze zu, der assoziative Speicher erlaubt ein paralleles, simultanes Ablesen seines gesamten Speicherinhaltes.

Welche Funktionen muß ein assoziativer Speicherbaustein erfüllen?