

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 60 (1982)

Heft: 8

Artikel: Die Rolle der Forschung in der Elektronik = La funzione della ricerca nel campo dell'elettronica

Autor: Speiser, Ambros-Paul

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876170>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Rolle der Forschung in der Elektronik¹

La funzione della ricerca nel campo dell'elettronica¹

Ambros-Paul SPEISER, Dättwil

061.6.621.38

Zusammenfassung. Am Beispiel der Erfindung des Transistors zeigt der Autor die enge Verbindung von naturwissenschaftlicher Forschung und technischer Entwicklung auf. Bei der Elektronik geht der technische Fortschritt besonders rasch vor sich. Wenn er beispielsweise in der Energie- und Verkehrstechnik wesentlich langsamer verläuft, so deshalb, weil man hier von den durch die Grundgesetze der Natur gegebenen Grenzen noch weiter entfernt ist. Für die Zukunft zeichnet sich aber auch in der Elektronik ein verlangsamter Fortschritt ab. In der Entwicklung der Systemtechnik und der Software steigen Aufwand und Kosten gewaltig. Hier gilt es, nach neuen Wegen und Mitteln zu suchen.

Le rôle de la recherche en électronique

Résumé. En se fondant, à titre d'exemple, sur l'invention du transistor, l'auteur montre l'étroite relation entre la recherche scientifique et le développement technique. En électronique, les progrès techniques sont particulièrement rapides. S'ils sont sensiblement plus lents, notamment dans les domaines de l'énergie, des transports et des communications, cela provient du fait que l'on est ici plus éloigné encore des limites imposées par les lois fondamentales de la nature. A l'avenir, on observera aussi un ralentissement du progrès en électronique. Dans le développement de la technique de système et du logiciel, les moyens à mettre en œuvre et les coûts s'accroissent considérablement. Il s'agit par conséquent de chercher de nouvelles méthodes et de nouveaux moyens.

Riassunto. Adducendo come esempio l'invenzione del transistor l'autore fa vedere la stretta relazione esistente fra le ricerche che concernono le scienze naturali e lo sviluppo tecnico. Nel campo dell'elettronica il progresso tecnico è particolarmente rapido. Se come per esempio nei campi relativi all'energia e al traffico, l'evoluzione è molto più lenta, è perché in questi campi si è ancora molto più distanti dai limiti posti dalle leggi fondamentali della natura. Per il futuro si prevede anche nel campo dell'elettronica uno sviluppo più lento. Nello sviluppo della tecnica dei sistemi e del software i dispendi e le spese aumentano straordinariamente. Proprio in questa direzione bisogna dunque cercare nuove vie e nuovi mezzi.

Die Frage zu stellen, welche Rolle der Forschung in der Elektronik zukomme, scheint auf den ersten Blick eher überraschend: Es entspricht doch einer verbreiteten Überzeugung, dass die Elektronik eine forschungsinensive Technik ist und dass die Forschung auf diesem Gebiet reiche Früchte trägt; Forschung und Fortschritt in der Elektronik werden oft geradezu als Synonyme betrachtet. Ist diese Haltung gerechtfertigt?

Se si ponesse la domanda: — quale ruolo si attribuisce alla ricerca nell'elettronica —, potrebbe sembrare a prima vista un po' sorprendente. In effetti è diffusa l'opinione che l'elettronica sia una tecnica di ricerca intensiva e che la stessa apporti in questo campo notevoli risultati; ricerca e progresso nell'elettronica sono sovente intesi quali sinonimi. Questo concetto è giustificato?

Geschwindigkeit des technischen Fortschrittes

Die Frage sei anhand zweier Kurven betrachtet. *Figur 1* zeigt ein Diagramm, das in dieser oder einer ähnlichen Form viele Male wiedergegeben worden ist. Es veranschaulicht die Anzahl von Schaltelementen auf einem Chip in einer integrierten Schaltung (IC). Die Kurve beginnt im Jahr 1956 mit 1: Das ist der diskrete Transistor. Heute ist die Zahl 500 000 im Begriff überschritten zu werden. Das entspricht einer Erhöhung um etwa 70 Prozent je Jahr oder einer Verzweihundertfachung in 10 Jahren. Es gibt in der Technik kaum eine Messgröße, die während mehr als eines Vierteljahrhunderts gleichmässig mit einer so hohen Vermehrungsrate gewachsen wäre. Als Gegenstück vermittelt *Figur 2* ein Beispiel aus der Energietechnik: Die Kurve zeigt Materialtemperaturen, es handelt sich um die Temperatur der ersten (also heissesten) Schaufelreihe in Gasturbinen oder Flugzeugtriebwerken. Hohe Temperaturen bedeuten besseren Wirkungsgrad, also Brennstoffersparnis, sind also sehr erstrebenswert. Die Temperatur hat in den letzten 40 Jahren um 280 ° zugenommen, das sind je Jahr etwa 7 ° oder 0,7 Prozent! (In der Thermodynamik muss man,

Rapidità del progresso tecnico

Esaminiamo la domanda con l'ausilio di due curve. La *figura 1* riporta un diagramma già proposto parecchie volte in questa o in altre forme analoghe. Essa rappresenta il numero dei dispositivi elementari su un Chip di un circuito integrato (CI). La curva inizia da 1 nell'anno 1956, cioè con il transistor quale elemento discreto. Oggigiorno si è in procinto di superare 500 000. Ciò corrisponde ad un aumento annuo del 70 % circa, equivalente ad un fattore d'incremento di 200 in 10 anni. Mai fino ad ora una dimensione tecnica ha conosciuto un tasso d'incremento così elevato in un quarto di secolo. Quale riscontro, la *figura 2* riporta un esempio tratto dalla tecnica energetica: la curva si riferisce alla temperatura dei materiali. Nel caso specifico trattasi della temperatura della prima (e quindi della più calda) serie delle palette di turbine a gas oppure di propulsori d'aereo. Le elevate temperature sono auspicabili in quanto presuppongono coefficienti di rendimento più elevati e quindi risparmio di carburante. Negli ultimi 40 anni la temperatura è aumentata fino a 280 °; ciò che corrisponde a 7 gradi annui, ossia allo 0,7 % (Nella termodinamica, per il calcolo della percentuale si considera

¹ Vortrag von Prof. Dr. A.-P. Speiser, Direktor und Chef der Konzernforschung der AG Brown, Boveri & Cie., Baden, gehalten anlässlich der Internationalen Pressetage 1982.

¹ Relazione del Prof. Dr. A.-P. Speiser, Direttore e capo della ricerca della SA Brown Boveri & Co, Baden, tenuta in occasione delle giornate internazionali della stampa 1982.

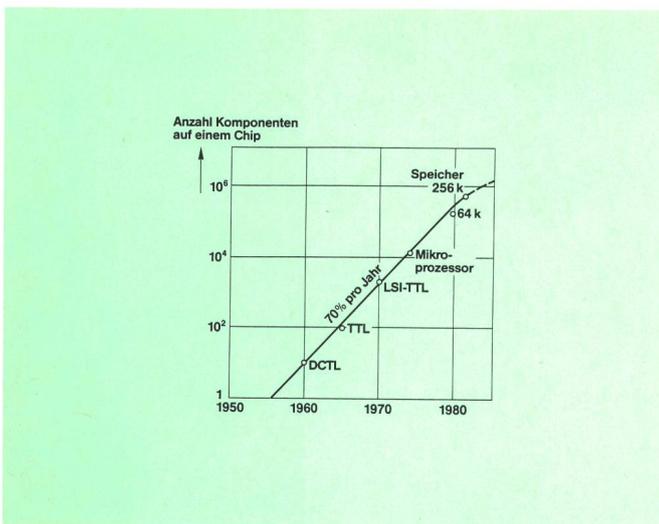


Fig. 1
Anzahl Komponenten auf einem Chip in einem Bauelement der Mikroelektronik. Die Abkürzungen DCTL, TTL, LSI deuten auf die verschiedenen Generationen von Schaltkreisen hin — Numero dei componenti su di un Chip di un elemento costruttivo della microelettronica. Le abbreviazioni DCTL, TTL, LSI indicano le diverse generazioni dei circuiti elettronici
 Anzahl Komponenten auf einem Chip — Numero dei componenti su di un Chip
 Speicher — Memoria
 70 % je Jahr — 70 % all'anno
 Mikroprozessor — Microprocessore

um Prozente zu errechnen, die Temperatur nicht in Celsiusgraden, sondern in Kelvin einsetzen.) Woher kommt dieser grosse Unterschied? Sind die Wissenschaftler, Ingenieure und Unternehmer auf der einen Seite so viel tüchtiger als auf der anderen? Wohl kaum. Alles deutet darauf hin, dass auf beiden Seiten mit Intensität und Sachkunde geforscht wird; und blickt man in die Geschäftsberichte, so findet man, dass die Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen in Prozenten vom Umsatz bei den Flugzeugtriebwerken um einiges höher sind als auf den meisten Gebieten der Elektronik. Der Grund liegt vielmehr darin, dass die Natur ihre Geheimnisse auf der einen Seite leichter preisgibt als auf der anderen, wahrscheinlich deshalb, weil man auf dieser Seite von den endgültigen, durch die Grundgesetze gegebenen Grenzen noch wesentlich weiter entfernt ist als auf der andern.

Es ist eine allgemeingültige Tatsache, dass der technische Fortschritt auf verschiedenen Gebieten sehr verschieden schnell verläuft. Die Technik schreitet schnell voran in allen Bereichen, in denen die Elektronik eine Schlüsselrolle spielt, und dazu gehören Computer-, Nachrichten- und Leittechnik. Demgegenüber ist der Fortschritt besonders langsam auf den Gebieten Energie und Verkehr — sehr zum Verdruss der Mitmenschen, die sich möglichst schnell eine grundlegend neue Energietechnik wünschen!

Kostendegression

Das schnelle Eindringen der Elektronik in mehr und mehr Gebiete der Technik ist aber nicht allein dem technischen Fortschritt zuzuschreiben; auch der Verlauf der Kosten hat massgebend dazu beigetragen. In Figur 1 wurde gezeigt, wie sich die Anzahl Elemente auf einem IC, beginnend mit dem diskreten Transistor, seit 1956

la temperatura in gradi Kelvin e non Celsius). Qual è la causa di quest'enorme divario? Gli scienziati, ingegneri e costruttori sono forse più abili in un campo piuttosto che nell'altro? Certamente no. Tutto fa supporre che in entrambi i rami considerati, la ricerca venga condotta intensamente e con competenza. Basta dare un'occhiata ai resoconti per scoprire come il costo della ricerca e dello sviluppo rappresenti una percentuale del giro d'affari leggermente maggiore nell'industria aeronautica che non nella gran parte dei settori dell'elettronica. Il motivo risiede principalmente nel fatto che la natura offre i suoi segreti a miglior mercato in un settore anziché nell'altro; probabilmente perché in uno dei due si è ancora sostanzialmente lontani dai limiti finali imposti dalle leggi fondamentali.

È infatti una realtà che il progresso tecnico evolve con una rapidità molto differenziata nei diversi rami. La tecnica progredisce velocemente laddove l'elettronica assume un ruolo chiave e in particolare nei settori degli elaboratori, delle informazioni e dei comandi. Per contro, lo sviluppo nei campi dell'energia e del traffico è particolarmente lento — con grande rincrescimento del prossimo, che s'attende al più presto una tecnica energetica fondamentalmente nuova.

Regresso dei costi

La rapida introduzione dell'elettronica in molti campi della tecnica non va attribuita unicamente al progresso scientifico, bensì anche all'evoluzione dei prezzi. Dalla figura 1 si rileva come il numero dei dispositivi elementari in un CI, inizialmente rappresentato dall'unità transistoro quale elemento discreto, sia aumentato a partire dal 1956 di ben 500 000 volte tanto. È notevole come i prezzi di un CI siano stati mantenuti pressoché costanti durante tutto questo periodo e come il costo di un normale CI oggigiorno non sia più elevato — tenendo conto

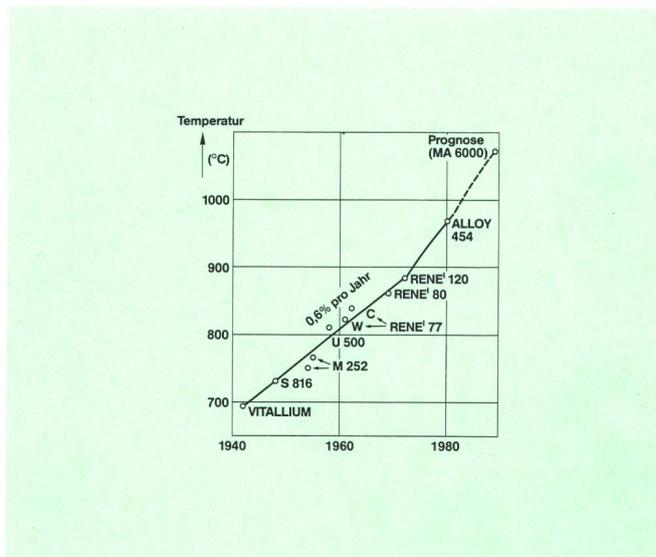


Fig. 2
Temperatur der Werkstoffe der Schaufeln in Gasturbinen und Jet-Triebwerken. Die Namen und Nummern sind Codebezeichnungen von Legierungen — Temperature del materiale delle palette di turbine e dei propulsori d'aerei. Nomi e numeri rappresentano la designazione codificata delle leghe
 Temperatur — Temperatura
 Prognose — Previsione
 0,6 % je Jahr — 0,6 % all'anno

verfünfhunderttausendfach hat. Es ist bemerkenswert, dass während dieser ganzen Zeit die Kosten eines IC ungefähr konstant geblieben sind und dass ein gängiger IC heute — unter Berücksichtigung der Geldentwertung — nicht mehr kostet als damals ein diskreter Transistor der ersten Generation. Für jeden aufgewendeten Franken erhalten wir heute eine unvergleichlich höhere Gegenleistung als ehemals. Ein Vergleich mit Energie- und Verkehrsanlagen, deren Kosten im gleichen Mass steigen wie die Geldentwertung, zeigt, welche grossen Unterschiede zwischen den verschiedenen Domänen bestehen.

Es lohnt sich, hier noch kurz auf eine Besonderheit der integrierten Schaltungen einzugehen, die eng mit der Kostendegression verknüpft ist: nämlich auf die Tatsache, dass es sich bei wesentlichen Stufen der Herstellung um fotolithografische (also fotografieähnliche) Prozesse handelt. Hochentwickelte optische Systeme besorgen die Verkleinerung und die Reproduktion. Man macht sich die Tatsache zunutze, dass optische Systeme im Grunde ungeheuer leistungsfähige Datenverarbeitungsanlagen sind. Die Daten treten dabei nicht als elektrische Signale auf, sondern als Lichtstrahlen, oder — anders ausgedrückt — als Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen. Es ist der folgende etwas simplizistische, aber anschauliche Vergleich gemacht worden: Wer bei einem Fotografen von einem Negativ eine Vergrösserung herstellen lässt, bezahlt einen fixen Preis, unabhängig davon, ob auf dem Bild eine einzelne Person oder eine Menschenmenge abgebildet ist!

Verschiedene Anzeichen deuten darauf hin, dass die Kurve von Figur 1 im Begriff ist, sich abzuflachen. Die Gründe liegen nicht nur in physikalischen Gegebenheiten, sondern auch in der Problematik des Entwurfs und des Systemaufbaus.

Leistungselektronik

Die Elektronik ist nicht nur in die Computer- und Nachrichtentechnik eingedrungen, sondern auch in die elektrische Energietechnik, und es hat sich das Forschungs- und Entwicklungsgebiet der Leistungselektronik gebildet. Ihre Bauelemente sind Dioden und Thyristoren, neuerdings auch Leistungstransistoren. *Figur 3* zeigt, wie diese Bauelemente für immer höhere Leistungen entwickelt werden. Freilich ist die Wachstumsgeschwindigkeit hier langsamer als im Falle der IC; im Jahr beträgt die Zunahme etwa 32 Prozent. Es ist anzunehmen, dass die Zukunft ähnlich verlaufen wird wie die Vergangenheit. Die Kosten solcher Bauelemente, bezogen auf ein Kilovoltampere Schalteleistung, nehmen ebenfalls ab, aber mit einer Degressionsrate, die geringer ist als die 32 Prozent dieser Kurve. Der Leistungselektronik haften eben bereits Merkmale der Energietechnik mit ihrem langsameren Wandel an.

Trotzdem breitet sich die Leistungselektronik schnell aus. Höhere Elektrizitätspreise und vermehrtes Energiebewusstsein tragen mit dazu bei, denn die Leistungselektronik erlaubt es in vielen Fällen, elektrische Energie rationeller zu verwerten und Verluste zu vermindern. Diese Ausbreitung wird sich fortsetzen. Es ist sogar vorausgesagt worden, dass die Zeit kommen werde, da jede erzeugte und verbrauchte Kilowattstunde einmal durch einen Siliziumkristall fliesse.

della svalutazione — di quello praticato a suo tempo per un transistoro della prima generazione. Per ogni franco investito oggi, otteniamo una controprestazione così elevata da non poter essere paragonata a quella d'allora.

Comparando con gli impianti energetici e del traffico, i cui costi aumentano proporzionalmente al tasso di svalutazione monetario, si notano le grandi divergenze esistenti tra i diversi campi. Vale la pena di soffermarci brevemente su una particolarità dei circuiti integrati che è strettamente legata con la diminuzione dei costi. Trattasi del fatto che nei livelli essenziali della produzione si ricorre ai procedimenti fotolitografici (analoghi alla fotografia). Dei sistemi ottici di elevate prestazioni permettono il rimpicciolimento e la riproduzione dell'immagine. Si approfitta del fatto che i sistemi ottici sono dei dispositivi d'elaborazione dei dati enormemente funzionali. I dati non appaiono quali impulsi elettrici, bensì sotto forma di fasci di luce — o altrimenti detto — quali risultati delle equazioni di Maxwell. Il paragone seguente, benché un po' semplicistico, è però molto chiaro: chi desidera un ingrandimento da una negativa pagherà al fotografo un determinato prezzo, indipendentemente se la fotografia è di una singola persona o di un intero gruppo.

Da diversi fattori si può dedurre che la curva della figura 1 tende ad appianarsi. I motivi vanno ricercati non solo nelle particolarità fisiche, ma anche nella problematica della progettazione e dello sviluppo dei sistemi.

Elettronica di potenza

L'elettronica non si è affermata unicamente negli elaboratori e nell'informatica, bensì anche nella tecnica dell'energia elettrica, nel campo della ricerca e dello sviluppo dell'elettronica di potenza. I componenti sono diodi e tiristori e ultimamente anche transistori di potenza. La *figura 3* dimostra come questi elementi siano sviluppati per prestazioni sempre più elevate. Naturalmente in questo settore lo sviluppo è meno rapido rispetto a quello dei CI e si situa al 32 % annuo. Si presuppone che in futuro l'incremento si manterrà sugli stessi valori come in passato. I costi di questi componenti riferiti ad una potenza di carico ammesso di 1 kVA,

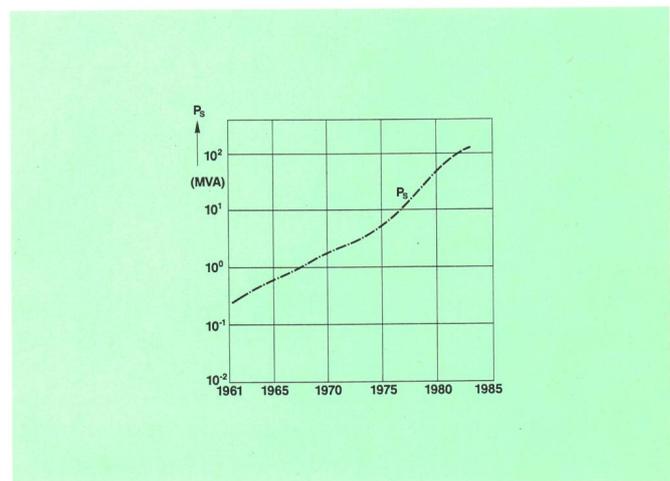


Fig. 3
Schalteleistung (Sperrspannung mal Durchlassstrom) von Thyristoren, effektiv und prognostiziert — Potenza di commutazione effettiva e prognosticata dei tiristori (tensione di blocco per corrente di passaggio)

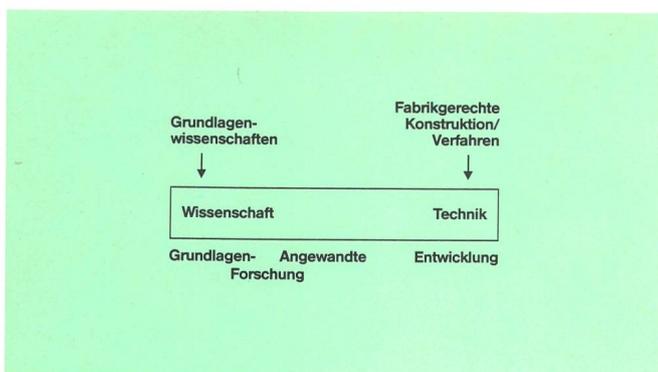


Fig. 4
Der Gesamtprozess der technischen Neuerung von den Grundlagenwissenschaften bis zum fabrikgerechten Ergebnis — L'intera procedura delle novità tecniche a partire dalle conoscenze scientifiche di base fino al prodotto finito

Grundlagenwissenschaften — Conoscenze scientifiche basilari
Wissenschaft — Scienza
Grundlagenforschung — Ricerca di base
Angewandte Forschung — Ricerca impiegata
Fabrikgerechte Konstruktion/Verfahren — Prodotto finito/procedimento di costruzione
Entwicklung — Sviluppo
Technik — Tecnica

Der Transistor

Das gewaltige Gebäude der heutigen Elektronik ruht auf einigen wenigen grossen Tragsäulen, von denen die wichtigste der Transistor ist. Seine Erfindung liegt 35 Jahre zurück. Inzwischen ist er in den hintersten Winkel der Erde vorgestossen, und er durchdringt sämtliche Bereiche unseres beruflichen und privaten Lebens. Angesichts dessen ist es wohl nicht übertrieben, den Transistor als eine der bedeutendsten Erfindungen in der Geschichte der Technik zu bezeichnen. Er ist aber auch das Ergebnis einer bedeutenden wissenschaftlichen Leistung. Die Erfindung des Transistors wird oft als Modellfall für das gute Funktionieren der Verbindung von Wissenschaft und Technik dargestellt, ebenso dafür, wie die naturwissenschaftlich begründete technische Forschung die Welt verändern kann.

Der Vorgang, für den die Erfindung des Transistors ein Modellfall ist, lässt sich am Diagramm von *Figur 4* veranschaulichen. Links ist die Wissenschaft, rechts die Technik. Nahe beim linken Rand finden wir die Grundlagenwissenschaften, am rechten Rand das Endprodukt einer Entwicklung, also eine fabrikgerechte Konstruktion oder ein fabrikgerechtes Verfahren. Eine Idee hat normalerweise irgendwo in der linken Hälfte des Diagramms ihren Ursprung und wandert im Laufe der Jahre nach rechts; sie durchläuft die Phasen der angewandten Forschung, der Grundlagen- und schliesslich der Produktentwicklung.

Die Entstehungsgeschichte des Transistors ist ein Musterbeispiel für diesen Vorgang. Sie fusst auf der Quantentheorie, die 1900 formuliert wurde und die in unserem Diagramm ganz am linken Rand unterzubringen ist. Die Quantentheorie führte zur Quantenmechanik und diese, in den dreissiger und vierziger Jahren, zur Beschreibung der Gesetzmässigkeiten der Kristallgitter und des Verhaltens von Elektronen in solchen Gittern. Auf diesem streng wissenschaftlichen Nährboden konnte der epochemachende Erfindungsgedanke entstehen, der zum Transistor geführt hat. Seine weitere Ausarbeitung bis

diminuiscono ugualmente, ma ad un tasso inferiore a quello del 32 % della curva. L'elettronica di potenza, con il suo più lento progredire, si assimila appunto per questa caratteristica alla tecnica energetica.

Ciò malgrado, le applicazioni dell'elettronica di potenza si estendono rapidamente; l'aumento dei costi dell'energia elettrica e la tendenza al risparmio favoriscono la sua introduzione, in quanto essa permette sovente di razionalizzare i consumi e ridurre le perdite. Questa espansione continuerà sicuramente anche in futuro. Si è perfino pronosticato che verrà il giorno in cui ogni kWh generato e consumato, transiterà almeno una volta attraverso un cristallo di silicio.

Il transistor

L'immensa struttura dell'odierna elettronica si basa su pochi ma grandi pilastri, dei quali il più importante è il transistor. La sua scoperta risale a 35 anni fa. Nel frattempo ha raggiunto i più remoti angoli della terra ed è penetrato in tutti i campi della nostra vita professionale e privata. Non è esagerato definirlo quale una delle più significative scoperte tecniche. È però anche il risultato di importanti conoscenze scientifiche. La scoperta del transistor è sovente indicata quale modello del successo derivato da un buon abbinamento tra scienza e tecnica, paragonabile a quello che le tecniche scaturite dalle scienze naturali hanno sull'ambiente.

Il procedimento grazie al quale la scoperta del transistor è un caso modello, è visibile nel diagramma rappresentato nella *figura 4*. A sinistra vi è la scienza e a destra la tecnica. Vicino al bordo di sinistra troviamo la ricerca fondamentale mentre presso quello di destra il risultato finale di un procedimento, ossia un prodotto pronto per la fabbricazione o un processo conforme alle esigenze costruttive. Un'idea ha la sua origine nella parte sinistra del diagramma e si sposta nel corso degli anni verso la destra; essa attraversa le diverse fasi della ricerca a partire dalle regole fondamentali per terminare con lo sviluppo del prodotto.

La storia della scoperta del transistor è un esempio molto rappresentativo di questa procedura. Essa si basa sulla teoria quantistica, formulata nel 1900 e che dev'essere posta nel nostro diagramma completamente a sinistra. Questa teoria portò alla meccanica dei quanti che a sua volta negli anni trenta e quaranta condusse alla descrizione fondamentale del reticolo cristallino e del comportamento degli elettroni in esso contenuti. In questo contesto strettamente scientifico, avvenne la scoperta d'importanza storica che condusse al transistor. Il suo ulteriore sviluppo fino all'esecuzione di apparecchi e di installazioni è il risultato della stretta cooperazione tra scienza e tecnica, che negli ultimi decenni ha concepito oltre al transistor molte altre importanti innovazioni.

I fronti della scienza e della tecnica si sono mossi in direzioni differenti

Certamente i fatti non smentiranno la seguente constatazione: l'attuale sviluppo dell'elettronica non è più così vicino alla ricerca di base, di quanto non lo fosse alla scoperta del transistor. Il rapido progresso dei nostri tempi consiste meno d'allora nell'adozione e nell'utilizzazione di nuove conoscenze scientifiche, bensì

zu betriebsfertigen Apparaten und Anlagen ist ein Ergebnis der engen Kopplung von Wissenschaft und Technik, die uns in den vergangenen Jahrzehnten nicht nur den Transistor, sondern noch viele weitere bedeutende Neuerungen beschert hat.

Die Front der Wissenschaft und die Front der Technik haben sich auseinanderbewegt

Man tut den Tatsachen wohl keinen Zwang an, wenn man festhält, dass die aktuelle Weiterentwicklung der Elektronik weniger nahe an den Grundlagen verläuft als damals die Erfindung des Transistors. Der rasante Fortschritt der Gegenwart besteht weniger aus der Aufnahme und Verwertung grundsätzlich neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse als vielmehr aus einer bis aufs äusserste perfektionierten Ausnützung des grossen Wissensschatzes in Physik, Chemie, physikalischer Chemie, Materialkunde und anderen Gebieten. Hinzu kommt eine hochentwickelte Apparatechnik, ohne die die heutigen IC nicht hergestellt werden könnten. Die heutige Fotolithografie erfordert optische Geräte von einer Perfektion, die es vor einigen Jahren noch nicht gab. Der optischen Technik sind aber Schranken gesetzt, die durch die Wellenlänge der Lichtstrahlen festgelegt sind. Um sie zu überwinden und um Strukturen mit einer noch feineren Auflösung zu schaffen, beginnt man jetzt Apparate für die Elektronenstrahl- und Röntgenlithografie zu verwenden. Für die Entwicklung und Herstellung dieser differenzierten (und teuren) Hilfsapparaturen haben sich ganze Industriezweige gebildet, die man in ihrer Gesamtheit als «Mikroelektronische Sekundärindustrie» bezeichnen könnte.

Alle diese Tätigkeiten umfassen heute weniger die Schaffung neuer wissenschaftlicher Erkenntnis als vielmehr die perfektionierte technische Realisierung. Die Front des wissenschaftlichen Forschens und jene der technischen Verwirklichung, die in den fünfziger und sechziger Jahren so nahe beieinander verlaufen sind, haben sich voneinander weg bewegt. Einmal werden sie sich wieder nähern, daran ist kaum zu zweifeln, und es werden daraus Ergebnisse entstehen, die wir uns heute gar nicht vorstellen können. Wann wird das eintreten? In 5, 10, 15 Jahren oder erst im nächsten Jahrhundert? Niemand kann das voraussagen.

Die Elektronenröhre

Der Siegeszug des Transistors lässt uns gelegentlich vergessen, dass der eigentliche Wegbereiter der Elektronik nicht der Transistor, sondern die Elektronenröhre war, die 1906 erfunden wurde und die während eines halben Jahrhunderts allein das Feld beherrschte. Sogar die ersten Computer waren mit Röhren ausgerüstet: Der Computergedanke kam zu früh für den Transistor, und die erste, sehr erfolgreiche Computergeneration musste das Kunststück vollbringen, die Röhren in einer Aufgabe einzusetzen, für die sie sich im Grunde nicht besonders gut eigneten.

Heute sind die Elektronenröhren beinahe, aber nicht vollständig vom Transistor verdrängt worden. Dort, wo zugleich hohe Spannungen, hohe Leistungen und hohe Frequenzen vorkommen — beispielsweise in Rundfunksendern —, beherrschen sie auch heute noch das Feld

s'orienta verso il perfezionamento dei procedimenti d'applicazione del grande bagaglio scientifico nel campo della fisica, chimica, chimico-fisica, ricerca dei materiali ed altri. A questo si aggiunge la disponibilità di una sofisticata tecnica delle apparecchiature, senza la quale gli odierni CI non potrebbero essere costruiti. L'attuale fotolitografia esige degli strumenti ottici di una perfezione tale, quali alcuni anni or sono non erano ancora disponibili. Nell'ottica vi sono però dei limiti imposti dalla lunghezza d'onda dei fasci luminosi; per superarli e per sviluppare delle strutture ancora più raffinate, s'inizia ora con l'introduzione della litografia a raggi elettronici e Röntgen.

Per lo sviluppo e la fabbricazione di queste differenti (e costose) apparecchiature ausiliarie, si sono sviluppati dei settori industriali che nel loro assieme potrebbero essere denominati «industria secondaria della microelettronica». Tutte queste attività concernono oggi in minor misura la ricerca di nuove conoscenze scientifiche che non l'affinamento delle tecniche esecutive. Il fronte della ricerca scientifica e quello della realizzazione tecnica, tanto vicini negli anni cinquanta e sessanta, si sono separati. Certamente in futuro si riuniranno di nuovo e daranno dei risultati per ora inimmaginabili. Quando accadrà? Fra 5, 10, 15 anni, oppure solo nel secolo venturo? Nessuno lo può prevedere.

Il tubo elettronico

Il successo del transistor ci fa sovente dimenticare che il capostipite dell'elettronica non fu il transistor, bensì il tubo elettronico. Dalla sua scoperta, avvenuta nel 1906 e per mezzo secolo fu l'indiscusso dominatore del campo. Perfino i primi elaboratori erano provvisti di tubi. La filosofia dell'elaborazione giunse troppo presto per il transistor e nella prima generazione di elaboratori, che ebbero grande successo, si compì un vero capolavoro nell'impiegare i tubi per dei compiti a loro non molto congeniali.

Oggi i tubi elettronici sono stati quasi completamente rimpiazzati dai transistori. Laddove vi sono alte tensioni, potenze ed elevate frequenze (ad esempio nelle emittenti radio), dominano però ancora. Si prevede che per molti anni questa situazione rimarrà invariata. Il vuoto ha delle caratteristiche elettriche tali, quali un semiconduttore non può avvicinare.

Hardware e Software

Fino ad ora ci siamo occupati di procedimenti e di oggetti di carattere materiale, basati sulle leggi fisiche e chimiche. Essi appartengono alla hardware. Se ora affermo che parallelamente a questa esiste la software, che in fatto d'importanza (e dispendio richiesto) la sta superando, se non lo ha già fatto, non è una novità.

È strano che si parli della separazione fra hardware e software quasi solo nell'elaborazione di dati e nella tecnica di comando. Questa suddivisione ha però un valore generale comune. Il compositore di un pezzo musicale, in fondo scrive la software, ma la melodia risuona poi solo con gli strumenti — la hardware. Anche le prestazioni di un architetto che progetta una costruzione rientrano nella software: il risultato del suo lavoro non è ma-

vollständig. Es ist anzunehmen, dass sich daran noch während vieler Jahre nichts ändern wird. Das Vakuum hat eben elektrische Eigenschaften, an die kein Halbleiter herankommt!

Hard- und Software

Bis hierher haben wir uns durchwegs mit Vorgängen und Objekten befasst, die materiellen Charakter haben und die sich auf die physikalischen und chemischen Gesetze stützen. Sie gehören zur Hardware. Wenn ich jetzt erwähne, dass daneben die Software existiert und dass sie an Bedeutung (und an Aufwand, den sie erfordert) die Hardware zu übertreffen beginnt oder bereits übertroffen hat, so ist dies keine Neuigkeit.

Es ist eigentümlich, dass man von der Trennung zwischen Hard- und Software fast nur in der Datenverarbeitung und der Leittechnik spricht. Diese Zweiteilung hat nämlich viel allgemeinere Gültigkeit. Der Komponist, der ein Musikstück komponiert, schreibt im Grunde die Software, die nachher mit den Instrumenten — der Hardware — zum Erklängen gebracht wird. Auch die Arbeit des Architekten, der einen Bau entwirft, ist — auf einer etwas anderen Ebene — die Erstellung von Software: Das Ergebnis seiner Arbeit ist nicht etwas Materielles, sondern etwas, das auf dem Zeichnungspapier als Datenträger festgehalten und übermittelt werden kann.

Forschung und Entwicklung in der Software

Ein wachsender Teil des technischen Fortschrittes spielt sich heute an der Software-Front ab, und es ist allgemein bekannt, dass in den Gestehungskosten einer Anlage der Software-Anteil jenen der Hardware weit übersteigen kann. Es ist klar, dass nicht nur die Erarbeitung von neuen Konzepten, sondern auch die Erstellung der eigentlichen Software (sofern es sich nicht um rein anwendungsspezifische Programme handelt) dem Vorgang von Forschung und Entwicklung zuzurechnen ist. Aber wie ist der Vorgang strukturiert? Was ist Forschung, was ist Entwicklung? Welches sind die Grundlagen, auf die man aufbaut? Muss man sie der Wissenschaft oder der Technik zurechnen? Was ist patentierbar, was fällt unter das Urheberrecht, und was lässt sich — ähnlich wie Ergebnisse der Mathematik — überhaupt nicht schützen? Das sind Fragen, die erst allmählich einer Klärung entgegengehen werden.

Gerne würde man den technischen Fortschritt in der Software ebenfalls, so wie in der Hardware, in das Diagramm von Figur 4 einpassen. Doch das gelingt höchstens nach einem erheblichen Umdenken und ist wohl überhaupt nur begrenzt möglich.

Von-Neumann-Maschine und Programmiersprachen

Unter Software im engeren Sinn werden Computerprogramme verstanden. Im weiteren Sinn muss man auch die Theorie bestehender und die Schaffung neuer Programmiersprachen dazurechnen. Besonders komplex sind die gegenseitigen Einflüsse zwischen Hard- und Software. Fortschritte in den Programmiersprachen

teriale, bensì, quanto è riportato sulla carta da disegno (portatore di dati) può venir trasmesso per l'esecuzione.

Ricerca e sviluppo nel campo della software

Una parte crescente del progresso tecnico appartiene alla software; è generalmente risaputo che nei costi di produzione di un impianto, la voce software può superare notevolmente la hardware. È chiaro che non solo l'elaborazione di nuovi concetti, ma anche la produzione della software (in quanto non si tratti di uno specifico programma d'uso generale), dev'essere considerata parte dei procedimenti di ricerca e sviluppo. Ma come è strutturato questo procedimento? Cosa si intende per ricerca e cosa per sviluppo? Quali sono le fondamenta su cui si costruisce? Si devono attribuire alla scienza o alla tecnica? Cosa si può brevettare, cosa cade sotto i diritti d'autore e cosa — analogamente ai risultati di sviluppi matematici — non si può assolutamente proteggere? Queste sono domande a cui si potrà rispondere solo gradualmente.

Volentieri si vorrebbe adattare anche la raffigurazione della software al diagramma della figura 4, come lo si è fatto per la hardware. Ciò è possibile solo in seguito a considerazioni sostanzialmente diverse e in modo limitato.

Dalla macchina di von Neumann ai linguaggi di programmazione

Con il termine «software» si intende in senso ristretto il programma per gli elaboratori. Nel senso più ampio si deve anche includervi la teoria dei linguaggi di programmazione e la creazione di nuovi linguaggi. Molto complessa risulta l'influenza reciproca tra soft e hardware. I progressi nel campo dei linguaggi di programmazione conducono a cambiamenti nell'architettura degli elaboratori. Questo campo specifico vien definito tecnica dei sistemi.

La macchina von Neumann è da considerare una delle tappe più significative e marcati nel campo della tecnica dei sistemi. Essa consiste in un dispositivo di calcolo, uno di comando e di una memoria con due particolari caratteristiche: gli ordini possono essere immessi nella memoria sotto forma di cifre e trasformati nel dispositivo di calcolo; e la loro esecuzione può venire condizionata da risultati intermedi. *John von Neumann* pubblicò questo concetto nel 1946. Oggi, i suoi ragionamenti ci sembrano assolutamente ovvi. Allora non fu però il caso, poiché si trattava di idee rivoluzionarie, il cui significato non venne riconosciuto ovunque. Ancora diversi anni dopo si progettarono degli elaboratori che prevedevano formati diversi per gli ordini e le cifre, memorie e canali dati separati. Solo oggi, con il progresso della hardware e dell'informatica si delinea la necessità d'allontanarsi dalle architetture d'elaboratori previste secondo il principio di von Neumann.

Alcuni anni dopo seguì un ulteriore passo di basilare e ampio significato: i linguaggi di programmazione. Questo avvenimento può essere definito una scoperta? Oppure trattasi forse di un concetto? Questa domanda rimane aperta. Delle aggiunte ai linguaggi di programmazione furono realizzate in luoghi diversi e circa nello

führen zu Änderungen in der Rechnerarchitektur und umgekehrt. Dieses Gebiet bezeichnet man als Systemtechnik.

Zu den bedeutendsten und weitesttragenden Gedanken auf dem Gebiet der Systemtechnik gehört die von Neumann-Maschine. Sie besteht aus einem Rechenwerk, einem Steuerwerk und einem Speicher, mit zwei wesentlichen Merkmalen: Befehle können wie Zahlen im Speicher untergebracht und im Rechenwerk verändert werden, und die Ausführung von Befehlen kann von Zwischenergebnissen abhängig gemacht werden. *John von Neumann* publizierte das Konzept im Jahre 1946. Heute erscheinen uns diese Gedanken absolut selbstverständlich. Damals waren sie es nicht; es handelte sich um revolutionäre Ideen, deren Bedeutung nicht überall erkannt wurde. Noch Jahre später gab es Computerprojekte, die für Befehle und Zahlen verschiedene Formate, getrennte Speicher und getrennte Datenkanäle vorsahen. Erst heute zeichnet sich durch Fortschritte in der Hardware und in der Informatik die Notwendigkeit von Rechnerarchitekturen ab, die vom Von-Neumann-Prinzip abweichen.

Einige Jahre später erfolgte ein weiterer Schritt von grundlegender und weitreichender Bedeutung: die Programmiersprachen. Soll man das eine Erfindung nennen? Oder ein Konzept? Diese Frage muss offenbleiben. Ansätze zu Programmiersprachen gab es ungefähr gleichzeitig an verschiedenen Orten, aber jedenfalls gehört das in der Schweiz und in Deutschland von *Bauer*, *Rutishauser* und *Samelson* erarbeitete Algol zu den frühesten und gleichzeitig wegweisenden Ergebnissen dieser Art. Auch bei den Sprachen wurden seitdem laufend neue Generationen mit neuen Fähigkeiten entwickelt. Auf Algol folgte Pascal, zurzeit ist Ada in der Einführung begriffen. Insgesamt beläuft sich die Zahl der Programmiersprachen, die geschaffen wurden, auf mehrere hundert.

Von-Neumann-Maschine und Programmiersprachen waren zweifellos Ergebnisse der Forschung. Aber sie waren anders geartet als das, was man gewohnt war. Man hatte sich daran gewöhnt, dass Mathematik, Physik und Chemie ein festgefügtes Gebäude bilden, das auf einem soliden Fundament steht und das über Jahrhunderte aufgebaut wurde. Zu diesem Gebäude ist ein Forschungsergebnis ein neuer Baustein, der genau an seinen vorbestimmten Platz passt. Die Front der Forschung — also die Grenze zwischen Bekanntem und Unbekanntem — ist definiert. Aber Neuerungen wie die Programmiersprachen und die Von-Neumann-Maschine passen nicht in dieses Schema. Die Systemtechnik ist nicht in gleicher Weise ein strukturiertes Gebiet. Es existiert kein über lange Zeit gebautes und gefestigtes Fundament, auf dem sie ruht. Vorläufig müssen wir uns mit Begriffen wie Systemtechnik und Software begnügen und uns damit abfinden, dass die Grundlagen dazu erst im Entstehen begriffen sind, uns aber gleichzeitig darüber freuen, dass eine ununterbrochene und reiche Ernte von bedeutenden und nützlichen Ergebnissen auf uns zukommt. Für die Gesamtheit des Wissens um den Computer ist die Bezeichnung «Informatik» geschaffen worden, die sowohl die Hardware als auch die Systemtechnik enthält. Im Englischen ist die Bezeichnung «computer science» geläufig. Die Informatik ist heute ein etabliertes Lehr- und Forschungsgebiet; es gibt Hochschulab-

stesso periodo; spetta in ogni modo all'Algol sviluppato in Svizzera e Germania da *Bauer*, *Rutishauser* e *Samelson*, il merito d'essere tra i primi ad ottenere risultati indicativi in questo campo. Da allora furono sviluppate in continuità altre generazioni di linguaggi con nuove caratteristiche. All'Algol seguì il Pascal e attualmente è in procinto d'essere introdotto l'Ada. In complesso, i linguaggi finora elaborati sono parecchie centinaia.

La macchina von Neumann e i linguaggi di programmazione furono indubbiamente dei risultati della ricerca. Essi erano però di un altro genere di quelli ai quali eravamo abituati. Infatti si considerava correntemente che matematica, fisica e chimica costituissero gli incastri di un unico edificio costruito su solide fondamenta nel corso dei secoli. In questo edificio, il risultato della ricerca di un nuovo elemento, vi trova esattamente lo spazio che gli è predestinato. Il fronte della ricerca — ovvero i confini tra il sapere e l'ignoto — è ben definito. Delle novità quali i linguaggi di programmazione e la macchina di von Neumann, non s'adattano però a questo schema. La tecnica dei sistemi non è un campo strutturato nel modo usuale. Non esistono in effetti vecchie fondamenta sulle quali si possa costruire. Per ora dobbiamo accontentarci di concetti quali tecnica dei sistemi e software e con questo accettare che le loro basi siano sorte solo, ma per nostra fortuna, quale raccolta ricca ed ininterrotta di risultati utili e significativi. Per l'insieme delle conoscenze sugli elaboratori si è coniata la denominazione «informatica», comprendente sia la hardware, sia la tecnica del sistema. In inglese è designata correntemente «computer sciences». L'informatica è oggi un campo di studio e di ricerca affermato; vi sono delle divisioni delle scuole superiori che si occupano di questa materia; vi è perfino il titolo d'ingegnere in informatica.

L'organizzazione della ricerca e dello sviluppo

Il procedimento strutturalmente diverso dei processi d'innovazione nel campo della software e della tecnica dei sistemi, impone nuovi compiti alla direzione della ricerca e dello sviluppo. Per organizzare e condurre un grande laboratorio di ricerca nella fisica o nella chimica, ci si può riferire alla esperienza decennale in questo campo o in particolare ai parecchi esempi coronati da successo. Questo non è però il caso della tecnica dei sistemi e della software. Agli inizi, i processi innovativi si basavano sull'attività di singole persone o di piccoli gruppi; conduzione e organizzazione della ricerca non ponevano alcun problema. Oggigiorno sono impiegate centinaia o perfino più di mille persone per risolvere dei compiti collettivi. Come dev'essere strutturata e diretta tale organizzazione — si parla di vere e proprie fabbriche di software — è un problema la cui soluzione ottimale è ben lungi dall'essere trovata.

Compiti attuali della ricerca

Nel campo della tecnica della software e dei sistemi, quali sono i compiti attuali e più urgenti della ricerca? In altre parole: dove corre il confine tra ciò che già è conosciuto e ciò che dev'essere oggetto di ricerca? L'enunciazione e le motivazioni degli attuali compiti potrebbero essere l'argomento di un esteso rapporto; in

teilungen für Informatik, es gibt den Titel des Informatikingenieurs.

Die Organisation von Forschung und Entwicklung

Entsprechend dem andersgearteten Vorgang des Neuerungsprozesses auf den Gebieten Software- und Systemtechnik stellen sich uns neue Aufgaben in der Führung von Forschung und Entwicklung. Wie ein grosses Forschungslaboratorium in Physik oder Chemie zu organisieren und zu führen ist, weiss man aufgrund einer jahrzehntealten Erfahrung, und es gibt dafür viele erfolgreiche Vorbilder. Anders ist es in der System- und Software-Technik. In den Anfängen bestand dieser Neuerungsprozess aus der Tätigkeit von Einzelpersonen oder kleinen Gruppen; Fragen der Führung und Organisation warfen keine Probleme auf. Die Zeiten haben sich gewandelt. Heute müssen Hunderte oder sogar mehr als tausend Personen für die Lösung gemeinsamer Aufgaben eingesetzt werden. Wie eine solche Organisation — man spricht von eigentlichen Software-Fabriken — zu gliedern und zu führen sei, ist eine Frage, deren optimale Lösung noch längst nicht gefunden ist.

Aktuelle Forschungsaufgaben

Welche sind nun auf dem Gebiet der Software- und Systemtechnik die aktuellen und drängenden Forschungsaufgaben — mit anderen Worten: Wo verläuft die Front zwischen dem Bekannten und dem Gesuchten? Eine Aufzählung und Begründung von aktuellen Forschungsaufgaben müsste Gegenstand eines umfangreichen Berichtes sein; hier fehlt der Raum dazu, wir müssen uns auf Stichworte beschränken.

Zu den aktuellsten Entwicklungsrichtungen gehören zweifellos die Multicomputersysteme, ihre Architektur und ihre Programmierung. Das Entstehen von solchen Systemen ist das Ergebnis der Fortschritte sowohl auf dem Gebiet der integrierten Schaltkreise als auch bei der Beherrschung von parallelen anstelle von sequentiellen Programmabläufen. Die sinkenden Kosten und die schrumpfenden Abmessungen erlauben heute den Aufbau von Systemen, in denen der simultane Ablauf von Verarbeitungsvorgängen in grossem Umfang verwirklicht wird. Solche Systeme werfen aber Fragen auf, die in der von-Neumann-Maschine nicht einmal andeutungsweise existierten. Einige Stichworte sind: Multiprozessoren und Mehrfach-Betriebssysteme; Rechner-netze; zuverlässige und fehlertolerante Systeme; Programmierungssprachen für gleichzeitige, kooperierende Abläufe; theoretische Modelle. Diese und ähnliche Fragen sind heute Gegenstand von weltweit tätigen Forschungs- und Entwicklungsgruppen und gehören zu den Forschungszielen mit Priorität.

Der Kreis schliesst sich

Ich habe schon darauf hingewiesen, dass sich die Kurve von Figur 1 abzuflachen beginnt und dass die Gründe dafür nicht nur in physikalischen Gegebenheiten, sondern auch in der Problematik des Entwurfs der IC zu suchen sind.

Die Feststellung, dass die Kosten eines einzelnen IC trotz gewaltiger Vermehrung der Schaltelemente unge-

questo contesto manca lo spazio necessario, per cui ci limiteremo ad alcuni richiami.

L'indirizzo più recente dello sviluppo verte indubbiamente verso i sistemi di multielaboratori, la loro architettura e programmazione. Il nascere di sistemi di questo tipo è il risultato del progresso raggiunto nel campo dei circuiti integrati e della perfetta conoscenza dello svolgimento dei programmi paralleli anziché sequenziali. La riduzione dei costi e il contrarsi delle dimensioni permettono oggi la costruzione di sistemi nei quali lo svolgimento simultaneo delle procedure d'elaborazione abbraccia una vasta area. Questi sistemi pongono però dei problemi che indubbiamente non erano conosciuti nella macchina von Neumann. In termini generici: multiprocessori e sistemi d'esercizio multipli; reti di elaboratori; affidabilità e tolleranza d'errore dei sistemi; linguaggi di programmazione per sequenze contemporanee e cooperative; modelli teorici. Questi ed altri problemi sono oggi l'oggetto generalizzato di ricerca e di sviluppo di attivi gruppi di lavoro, in quanto fanno parte degli obiettivi prioritari della ricerca.

Il cerchio si chiude

Come già citato in precedenza, la curva della figura si appiattisce per delle ragioni che non sono esclusivamente fisiche, bensì anche fondate sulla problematica posta dalla progettazione di nuovi CI.

La constatazione che i costi del singolo CI, malgrado l'enorme incremento dei dispositivi elementari che lo compongono, siano rimasti pressoché costanti, è valida per ciò che concerne la fabbricazione, ma non lo è per la sua progettazione. In questo settore il loro aumento è preoccupante. Si valuta che un progetto di un CI costi circa 100 dollari per ogni dispositivo elementare. Di conseguenza, l'investimento per la progettazione sarebbe addirittura proporzionale al loro numero! Il fattore di calcolo risulterebbe ridotto solo quando si presentassero strutture in gran parte ripetitive, oppure nel caso in cui si facesse uso di sottounità già esistenti. Il numero dei dispositivi elementari posti su un CI si avvia verso il milione. È pertanto ovvio che la progettazione debba seguire altre vie. Ci troviamo oggi in circostanze tali, che richiamano stranamente l'evoluzione vissuta 30 anni fa dagli utilizzatori degli elaboratori.

I primi elaboratori venivano programmati in linguaggio macchina; nei primissimi modelli si doveva perfino redigere il programma in codice binario (o eventualmente secondo il sistema ottale) e introdurlo con la tastiera. Questa situazione non era considerata particolarmente disagiata; la possibilità di risolvere dei compiti per il tramite dell'elaboratore anziché a mano, giustificava ampiamente questo inconveniente. Seguì poi l'introduzione dei linguaggi di programmazione e dei compilatori, senza i quali oggi non potremmo certamente lavorare.

Per ciò che concerne il procedimento realizzativo di un CI siamo confrontati con i seguenti problemi: finora si doveva progettare dapprima il circuito logico, indi quello elettrico; seguiva poi il trasferimento sulle diverse maschere, le cui copie venivano completate con grande precisione sul tavolo da disegno. Ora si esamina l'opportunità di automatizzare non solo l'allestimento dei circuiti di connessione, bensì di tutto il lavoro grafico e

fähr konstant geblieben sind, gilt wohl für die Herstellung, nicht aber für den Entwurf. Die Kosten des Entwurfs steigen in beängstigender Weise. Es ist abgeschätzt worden, dass der Entwurf eines IC ungefähr 100 Dollar für jedes Schaltelement kostet. Danach wären die Entwurfskosten sogar proportional zur Anzahl Schaltelemente! Diese Zahl wird nur dann unterschritten, wenn hochgradig repetitive Strukturen vorkommen oder wenn bereits vorhandene Submoduln verwendet werden können. Die Zahl der Schaltelemente auf einem IC geht bald in Richtung einer Million. Es ist offenkundig, dass für den Entwurf grundlegend neue Wege beschritten werden müssen. Wir befinden uns heute mitten in einem Vorgang, der in seltsamer Weise einer Entwicklung ähnelt, die die Computerbenutzer vor 30 Jahren miterlebt haben.

Die frühen Computer wurden in Maschinensprache programmiert; in den allerersten Modellen musste man das Programm sogar im Dualsystem (oder allenfalls im Oktalsystem) niederschreiben und eintasten. Man empfand diesen Zustand nicht einmal als besonders unbequem: Die Möglichkeit, die gestellte Aufgabe mit Computer statt von Hand zu lösen, rechtfertigte diese Mühe bei weitem. Dann kamen die Programmiersprachen und die Compiler, ohne die wir heute gar nicht mehr arbeiten könnten.

cioè di eseguirlo mediante un elaboratore. I lavori di disegno concernenti i circuiti di connessione e le strutture delle maschere vengono automatizzati. Con questo e per una volta ancora, si trasferisce alla macchina un lavoro noioso per l'uomo, che in questo caso non si riferisce alla produzione della software, ma alla progettazione e alla fabbricazione della hardware.



Im Vorgang, der zu einem IC führt, erleben wir heute folgendes: Bisher musste zuerst der logische, dann der elektrische Schaltkreis entworfen werden; dann erfolgte die Übertragung auf die verschiedenen Masken, deren Vorlage auf einem Zeichentisch mit grosser Genauigkeit aufgezeichnet wurde. Nun entwickelt sich die Möglichkeit, nicht nur den Entwurf der Schaltkreise, sondern auch die gesamte Grafik zu automatisieren, das heisst, durch einen Computer ausführen zu lassen. Die Zeichenarbeit sowohl für die Schaltkreise als auch für die Maskenstrukturen wird automatisiert. Damit wird ein weiteres Mal eine mühsame Arbeit vom Menschen auf die Maschine übertragen, diesmal aber nicht in der Erstellung von Software, sondern im Entwurf und in der Herstellung der Hardware.