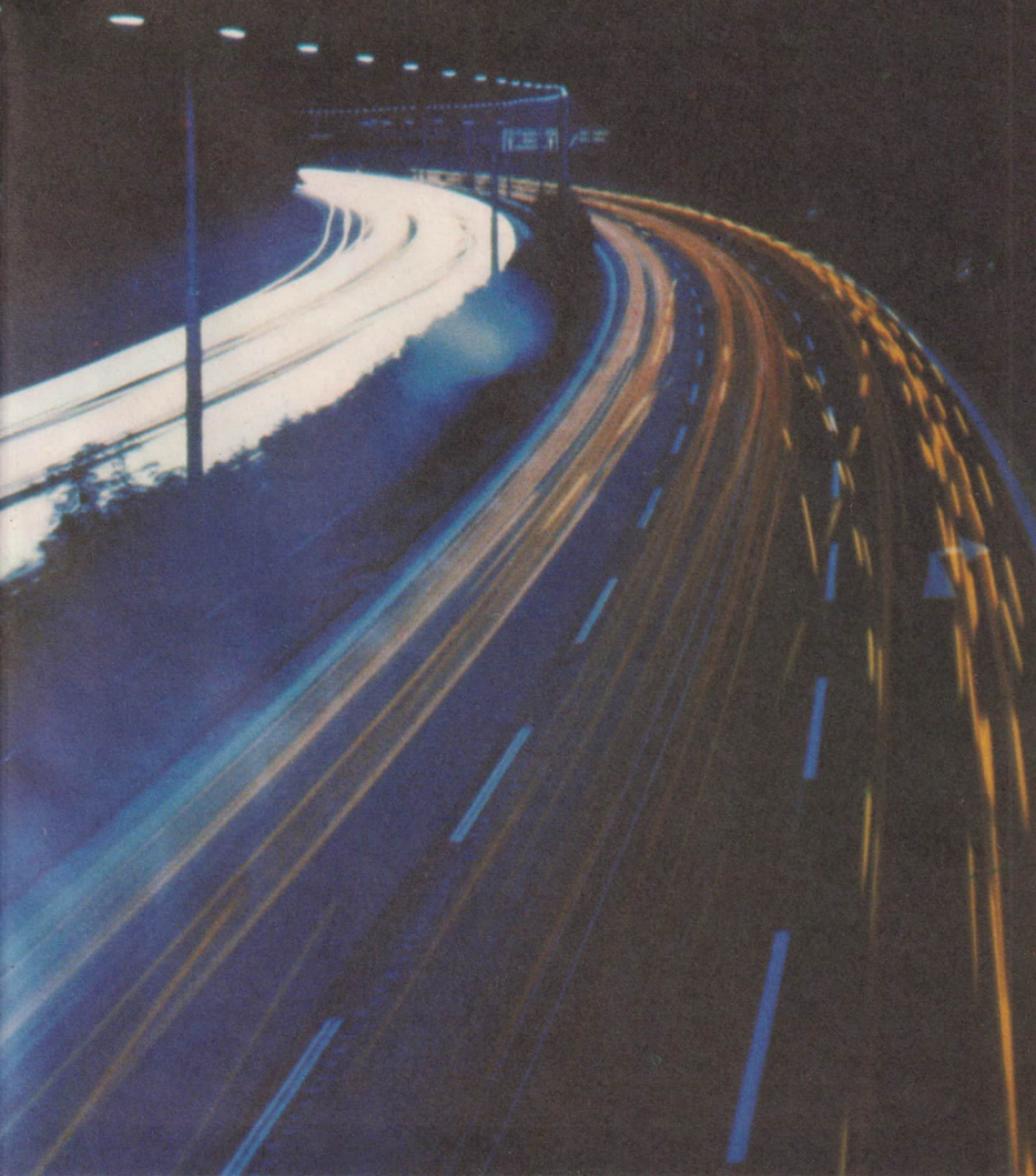


# Elektrizität im Blickpunkt

Walter Conrad







# Elektrizität

VEB Fachbuchverlag Leipzig

Walter Conrad

Von Kraftwerken  
und Verbundnetzen  
zur  
Mikroelektronik

**im  
Blickpunkt**

Mit 109 Bildern

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort 7

## Zwischen Megawatt und Gigawatt 9

- Muskeln und Turbinen 9
- Warum Suche nach neuen Wegen? 10
- 27. Juni 1954 11
- Der Reaktor brühet ... 12
- TOKAMAK – die Sonne im Labor 13
- Plasmastrahl statt Turbine und Generator 17

## Schaltpult für 160 Millionen Kilowatt 20

- Vom Insel- zum Verbundbetrieb 20
- Nützlichtes Netz 22
- Die Spannungen stiegen 23
- Es gibt keinen absoluten Isolator 24
- Zurück zum Gleichstrom? 25
- Unterkühlte Leitungen, Mikrowellen, Laser 26

## Strom vom Hausdach – und aus der Petroleumlampe 28

- Auch Energie-«Zwerge» sind unentbehrlich 28
- Sonnenenergie im Meinungsstreit 28
- Gute Aussichten für «trübe Stunden» 29
- Thermoelemente – Thermobatterien 31
- Radionuklidbatterien 41
- Die älteste Stromquelle bleibt jung 42

## Leiter ohne Widerstand 44

- In der Nähe des absoluten Nullpunktes 44
- Ziel: das supraleitende Kabel 45
- Supermagneten durch Supraleitung 47

## Vielseitiger Elektronenstrahl 49

- Katodenstrahlen – «Licht» der Elektronenoptik 49
- Elektronenoptik in jeder Wohnung 50
- Kleinste wird sichtbar 52
- Werkzeug Elektronensonde 54
- Elektronen schweißen und schmelzen 55

## Information steuert Leistung 57

- Messen – eingreifen – steuern 57
- Gasentladungsröhren – ein nützliches «Zwischenspiel» 58
- Halbleiter holen auf und überholen 61
- Neue Lösungen – neue Wege 62

## Klein, kleiner, am kleinsten 65

- Kompliziertheit bringt Komplikationen 65
- Gedruckte Schaltungen 67
- Schaltungen auf Glasplättchen 68
- Filme, Dämpfe, Masken 69
- Schaltungen in Halbleiterplättchen 71
- Mikroelektronik ist Elektronik auf neue Art 81

## Zwischen Bildtelefon und Glasfaserübertragung 83

- Altes, ewig junges Telefon 83
- Eine Leitung – zahlreiche Nachrichten 85
- Koaxialkabel und Hohlleiter 86
- «Gläserne Kabel» 88
- Nachrichten, portionsweise übermittelt 89
- Wellenbündel statt Kabel 90
- «Klassische» Nachrichtenverbindungen – modernisiert 92

## **Bis in den letzten Winkel der Erde 95**

- Notwendiger Umweg über den Weltraum 95
- Intersputnik – Intelsat 96
- Regionale Satellitensysteme 98
- Fernsehsatelliten in «Sicht» 100
- Satelliten für die Seefahrt 103

## **Vor Lautsprecher und Bildschirm 105**

- Eine Technik erobert die Welt 105
- Stereo – Kunstkopf – Quadro 106
- Der Hörrundfunk-Empfänger wird  
«automatisch» 109
- Der Fernsehempfänger kann mehr 111
- Auf Dächern – unter Straßen 112
- Kabelfernsehen – nur Einbahnstraße? 124

## **Funkwellen aus dem Weltraum 125**

- Die hellhörigsten Ohren der Welt 125
- «Himmelsgeflüster» 127
- C E T I 131

## **Auf Straßen und Schienen 133**

- Tankstelle Steckdose 133
- Von der Raumfahrt stimuliert 135
- Schranken, Signale, Weichen 145
- Ist der Lokführer entbehrlich? 146
- Helfer für Autobahn und Straße 148

## **ENIAC . . . Mikroprozessor – 150 und weiter?**

- Vier Jahrzehnte – vier Generationen 150
- Vom Taschen- zum Mikrorechner 152
- Hören – Sehen – Sprechen 155

## **Sachwortverzeichnis 156**

Bildnachweis 160

# Vorwort

Wissenschaft und Technik haben uns «verwöhnt». Ihre Hilfe ist in allen Bereichen unseres Lebens und Tätigseins fast selbstverständlich geworden. Herausgegriffen wird in diesem Buch die Thematik Elektrizität. Ihre Möglichkeiten und Leistungen werden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten – auf Grund der gegenwärtigen Energiesituation im Weltmaßstab – im Blickpunkt stehen. Sie werden verstärkt eine Rolle spielen, sei es von der Energieversorgung bis zur weltweiten Kommunikation, von der Steuerungs- und Regelungstechnik bis zur Mikroelektronik.

Ist es somit nicht einmal des Nachdenkens und der Betrachtung wert,

- daß die gleiche Energieform auf Knopfdruck Licht und Wärme spendet, die Motoren des Ventilators und des Elektrorasierers ebenso treibt wie die der leistungsstärkeren Lokomotiven
- daß in Kraftwerken Arbeitsvermögen bereitgestellt wird, wie Millionen es nicht mit ihren Muskeln aufbringen können
- daß diese Energie über Hunderte von Kilometern fortgeleitet und beliebig fein verteilt werden kann, so daß sie auf Abruf jederzeit bereitsteht
- daß die elektrische Nachrichtentechnik Entfernungen sowie Zeiten schrumpfen ließ
- daß uns Ton und Bild ohne Zeitverzug davon unterrichten, was in anderen Teilen der Welt vor sich geht

- daß zahlreiche Geräte in den vergangenen Jahrzehnten tausendfach kleiner und leichter, zugleich tausendfach leistungsfähiger und zuverlässiger wurden
- daß heute Energiequellen Forschungsthemen sind, die dazu beitragen, daß unsere Nachfahren keinen Energiemangel haben
- daß Taschenrechner das mühsame und langwierige Rechnen mit Papier und Stift zu einem Kinderspiel werden ließen?

Vor 300 Jahren galt die «Naturkraft» Elektrizität vielen wirklich als unerklärbares Wunder; noch vor 200 Jahren galt z. B. der Blitzableiter als «Ketzertange».

Wir sehen heute bei der Elektrizität vor allem die großartigen wissenschaftlichen und technischen Leistungen, die mit ihrer Hilfe möglich wurden oder sich anbahnen.

Von einigen wichtigen Entwicklungen soll in diesem Buch die Rede sein. Wir wollen sie vorstellen, wollen zeigen, wie und warum sie zustande kamen, wollen Wegen nachgehen, die in die Zukunft weisen.

Wir wenden uns nicht an einen speziellen Leserkreis und keinesfalls nur an Fachleute, sondern an alle, die der Technik aufgeschlossen gegenüberstehen. Was die Leser zum Verständnis brauchen, lernen sie in unseren Polytechnischen Oberschulen. Sie können dem Text aber auch folgen, wenn sie jener Generation angehören, die diese Kenntnisse noch nicht erwerben konnte.

Die Technik schreitet heute schneller voran, als Bücher geschrieben und gedruckt werden. Daher wird vielleicht manche Zahl, die beim Abfassen des Manuskripts als Spitzenwert galt, beim Erscheinen des Buches überholt, heute im Werden Befindliches bereits eingeführt sein.

Es kann keinen deutlicheren Beweis dafür geben, welcher Leistungen Wissenschaft und Technik fähig sind, wenn sie zu unser aller Nutzen gefördert und vorangetrieben werden!

Verfasser und Verlag

# Zwischen Megawatt und Gigawatt

Muskeln und Turbinen 9  
Warum Suche nach neuen Wegen? 10  
27. Juni 1954 11  
Der Reaktor brütet . . . 12  
TOKAMAK – die Sonne im Labor 13  
Plasmastrahl statt Turbine und Generator 17

## Muskeln und Turbinen

Müßten wir eine 100-W-Glühlampe durch Drehen einer Handkurbel zum Leuchten bringen, gäben wir bald erschöpft auf. Aber selbst nach 10 Stunden hätten wir nur eine Kilowattstunde «geschaft»

- die gleiche Energie, für die wir wenige Pfennige zahlen.

Die Leistung jedes der 10 Generatoren im sibirischen Wasserkraftwerk Sajano-Schuschenskoje entspricht der Muskelkraft von über 8 Millionen Menschen.

Wahrscheinlich wird die Menschheit im nächsten Jahrhundert mehr Energie benötigen als in ihrer ganzen bisherigen Geschichte. Diese Energie bereitzustellen, ist eine der vordringlichsten Aufgaben für Wissenschaft und Technik.

Der weitaus größte Teil der Elektroenergie stammt gegenwärtig aus Wasser- und Wärmekraftwerken. Es gäbe sie nicht ohne zwei Erfindungen des 19. Jahrhunderts:

- die Dynamomaschine, den Generator, der mechanische in elektrische Energie umwandelt,
- die Turbine, die den Generator antreibt.

Turbine und Generator vervielfachten die Bedeutung der traditionsreichen Wasserkraftnutzung. Sie erfordert zwar in heute üblichen und notwendigen

Ausmaßen sehr hohe Investitionen; doch Energie, erzeugt aus strömendem Wasser, ist sehr ökonomisch. Sie regeneriert sich durch den von der Sonne in Gang gesetzten Wasserkreislauf von selbst. Es muß weder Brennstoff noch Asche transportiert werden; es gibt weder Abgabe noch Schadstoffe.

Wasserkraftwerke entstanden noch im 19. Jahrhundert. Eines der ersten, bei Schaffhausen am Rhein errichtet, gab mit zwei Turbinen/Generatorsätzen 450 kW ab. Etwa 14000mal «Schaffhausen» müßte man parallelschalten, um die Leistung von Sajano-Schuschenskoje zu erreichen.

Bei den gigantischen Wasserkraftwerken unserer Tage denkt man unwillkürlich an die Sowjetunion. Jeder kennt Namen wie Bratsk, Krasnojarsk, Ust-Ilim, vor allem Sajano-Schuschenskoje am Jenissei. Mit einer Leistung von 6400 MW ist es gegenwärtig das größte Wasserkraftwerk der Welt. Weitere Großprojekte nehmen in der Sowjetunion und in anderen Ländern Gestalt an (z. B. ein 12600-MW-Kraftwerk am Paraná nahe den Iguazu-Wasserfällen in Südamerika). Nächste Seite oben nennt einige der größten Kraftwerke.

Wenige Tausende Glühlampen speiste 1882 das erste New Yorker Wärmekraftwerk. In Berlin entstanden 1885/86 «Blockzentralen», so benannt, weil sie Gleichstrom niedriger Spannung für wenige Häuserblocks erzeugten. Größere Entfernungen ließen sich wegen der erheblichen Leitungsverluste

Wasserkraftwerke		Wärme- kraftwerke		Kernkraftwerke	
Standort	Leistung (MW)	Standort	Leistung (MW)	Standort	Leistung (MW)
Sajano-Schuschenskoje, SU	6400	Berjosowskaja, SU	6400	Leningrad, SU	4000
Krasnojarsk, SU	6000	Kostroma, SU	4800	Ingalsinsk, SU	6000
Urubupunga, Brasilien	4400				
John Day, USA	2700				

nicht überbrücken. Der Leistungsbedarf betrug z. B. während der ersten 2 Jahrzehnte der «Elektrifizierung» in Berlin:

31. 12. 1885	244 kW
31. 12. 1890	4600 kW
31. 12. 1895	15000 kW
31. 12. 1900	48000 kW
31. 12. 1905	105000 kW

Der rasch ansteigende Energiebedarf war so nicht zu decken. Man mußte höhere Leistungen konzentriert erzeugen und über größere Entfernungen fort-leiten können.

Die Wechselstromtechnik, etwa ab 1890 eingeführt, ermöglichte es, niedrige und in Generatoren leicht zu beherrschende Spannungen zu erzeugen, zum verlustarmen Transport über größere Entfernungen hochzutransformieren und am Verbrauchsort – ebenfalls mit Transformatoren – wieder auf relativ ungefährliche und einfach zu handhabende Werte herabzusetzen. Unter anderem wurde in den Berliner Kraftwerken «Moabit» und «Oberspree» diese neue Technik, die sich auch mit der schnell-laufenden Dampfturbine gut vertrug, zuerst angewandt.

Die Generatorleistungen stiegen rasch. Galten einst 50-MW-Aggregate als Weltspitze, so sind heute dutzendumfänglich höhere Leistungen an der Tagesordnung. Nur einige Gründe hierfür seien genannt:

- Zwei Turbinen/Generator-Aggregate gleicher Leistung beanspruchen mehr Raum als ein Aggregat doppelter Leistung.
- Die spezifischen Energieerzeugungskosten sinken mit steigender Leistung – bei einem 1000-MW-Aggregat im Vergleich zu einem 100-MW-Aggregat um mehr als 40%. Ähnliches gilt für die spezifischen Investitionskosten.
- Zur Führung und Wartung eines Großaggregats sind weit weniger Arbeitskräfte erforderlich als für mehrere kleine Aggregate gleicher Gesamt-leistung.

Das gleiche Leningrader Werk, in dem 1937 der erste 100-MW-Generator entstand, entwickelte auch den z. Z. größten Generator der Welt. Er übertrifft seinen Vorläufer von 1937 um das Zwölffache an Leistung; 1600-MW-Aggregate nehmen in Konstruktionsbüros bereits Gestalt an.

## Warum Suche nach neuen Wegen?

Gewaltige Wasserkraftanlagen, riesige Wärme- kraftwerke werden in vielen Teilen der Welt betrieben, gebaut oder projektiert – und doch beschäftigt man sich allenthalben mit der Erschließung und Nutzung «neuer» Energiequellen.

Der Grund dafür ist seit Jahrzehnten bekannt und durch zahlreiche Untersuchungen belegt:

Wasser- und Wärmekraftwerke können den wachsenden Bedarf an Elektroenergie auf die Dauer nicht decken.

Rund ein Fünftel der in Kraftwerken gewonnenen elektrischen Leistung (etwa 300 GW) entstammt gegenwärtig Wasserkraftwerken. Diese Leistung wird weiter steigen; der Anteil an der Elektrizitätserzeugung insgesamt jedoch geht allmählich zurück.

Besonders in Industrieländern sind die nutzbaren Wasserkräfte weitgehend ausgebaut oder in Planungen einbezogen. In industriell weniger entwickelten Staaten werden zwar noch zahlreiche große Wasserkraftanlagen, oft für komplexe Aufgaben wie Energiegewinnung, Bewässerung usw., entstehen. Bei dem hohen Zeit- und Kostenaufwand für ihre Errichtung (oft in abgelegenen Gegenden) sind aber auch dort vor allem Lösungen interessant, die den dringenden Energiebedarf schnell decken helfen.

Bereits das Kraftwerk Zschornowitz bei Bitterfeld, um die Mitte der zwanziger Jahre größtes Wärmekraftwerk der Welt, verbrannte Tag für Tag 7 Güterzugladungen Braunkohle. Heutige Großkraftwerke benötigen ein Vielfaches davon. Lange Transportwege wären unvermeidbar.

Deshalb liegen z. B. die großen Wärmekraftwerke der DDR dort, wo es Braunkohle – wichtigster einheimischer Primärenergieträger – gibt, und deshalb entstehen auch in anderen Ländern zahlreiche neue Wärmekraftwerke in Gebieten mit reichen und leicht zugänglichen Brennstoffvorkommen.

Die Weltvorräte an fossilen Brennstoffen – besonders an Kohle – sind erheblich; ständig werden neue Vorkommen erkundet und erschlossen. Obgleich die Schätzungen der Experten erheblich differieren und wir gegenüber der Zeit um die Jahrhundertwende ein Vielfaches an Brennstoffen verbrauchen, liegt insbesondere die (seit über 100 Jahren) immer wieder heraufbeschworene Erschöpfung der Kohlevorräte noch in weiter Ferne.

Das ändert jedoch nichts daran, daß wir durch Nutzung fossiler Brennstoffe fortgesetzt ein «Konto» belasten, dem so gut wie nichts wieder zufließt. Mehr noch: Wir «verschleudern» den größten Teil

der «abgehobenen Beträge», indem wir sie verbrennen und damit auch noch Umweltschäden anrichten, statt sie den viel nützlicheren Stoffumwandlungen zuzuführen, wie sie uns die Chemie in reichem Maße anbietet.

Daher suchen und erproben Wissenschaftler Wege, die diese Vergeudung fossiler Brennstoffe beenden können. Einer erwies sich als besonders wichtig.

## 27. Juni 1954

Ein Datum, das man sich – wie das des ersten Sputnik-Starts – merken sollte: An jenem Tage wurde in Obninsk, nahe bei Moskau, das erste Kernkraftwerk der Welt in Betrieb genommen. Seine Leistung, 5 MW, war bescheiden – doch sie markiert den Beginn des dritten Weges der Elektroenergiegewinnung in großer, den der Kernkraftwerke.

Über 300 Kernkraftwerke gibt es gegenwärtig auf der Welt. Monat für Monat kommen weitere hinzu. Nachstehend die abgegebene bzw. geplante Leistung von Kernkraftwerken auf der Welt:

1975	76 GW
1980	170 bis 200 GW
1990	600 bis 900 GW
2000	anzunehmen über 1 500 GW

Dabei wächst der Elektroenergieanteil aus Kernkraftwerken im Vergleich zu dem aus anderen Kraftwerken deutlich schneller.

In allen Kernkraftwerken finden wir die tausendfach bewährten Turbinen und Generatoren. Zur Dampferzeugung jedoch dient nicht die chemische Energie fossiler Brennstoffe, sondern die bei Kernspaltungen auftretende Wärme. Sie wird in Kernreaktoren freigesetzt.

Zahlreiche Reaktortypen und -varianten wurden untersucht und erprobt, einige wenige behaupteten sich. Zu ihnen zählen vor allem die technisch ausgereiften Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren. In der Sowjetunion z. B. werden Druckwasserreaktoren in Serie produziert, wie die Typen

WWER 440 und WWER 1000 für Leistungen von 440 MW bzw. 1000 MW. Wir finden sie auch in den Kernkraftwerken der DDR und anderer sozialistischer Staaten.

Der «Brennstoff»transport ist für Kernkraftwerke kein Problem. Wo in Wärmekraftwerken stündlich ein Güterzug Brennmaterial benötigt wird, genügt einem Kernkraftwerk gleicher Leistung für die gleiche Zeit eine Menge an spaltbarem Material, die sich in einem Reisekoffer unterbringen ließe (der Reaktor WWER 440 benötigt für ein Betriebsjahr etwa 7 t Kernbrennstoff).

### Der Reaktor brütet . . .

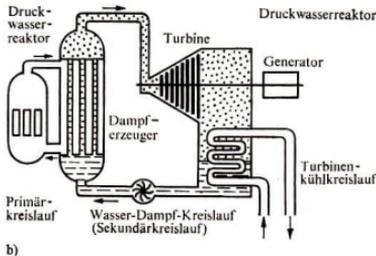
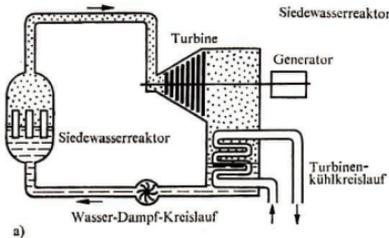
In der Natur vorkommendes Uran ist ein Gemisch aus mehreren Isotopen. Den weitaus größten Teil stellt das Isotop «U 238». Es ist an den energie-liefernden Vorgängen im Reaktor nicht unmittelbar beteiligt. Nutzbar ist zunächst das spaltbare Isotop U 235, dessen Anteil im Gemisch aber nur 0,7% beträgt. Die «Anreicherung» dieses Isotops U 235 ist jedoch nur durch aufwendige Prozesse möglich. Trotzdem wird gegenwärtig meistens angereichertes spaltbares Material verwendet.

Eine vielfach bessere Nutzung der natürlichen Uranvorräte ermöglicht ein Reaktortyp, zu dessen Entwicklung vor allem in der Sowjetunion, in Frankreich und England große Anstrengungen unternommen werden. Es ist der «Brutreaktor», der «schnelle Brüter».

An der Kernspaltung nicht beteiligte U-238-Atome können Neutronen hoher Geschwindigkeit, «schnelle» Neutronen, einfangen. Dabei entsteht das Element Plutonium, und dieses ist ebenso spaltbar wie U 235. Plutoniumbildung erfolgt, allerdings in geringem Maße, auch in anderen Kernreaktoren.

Der «Kunstgriff» beim schnellen Brüter besteht darin, durch schnelle Neutronen möglichst viele U-238-Atome in Plutonium umzuwandeln. Wie das geschieht, können wir hier nicht erörtern. Äußerst wichtig ist:

Der Brutreaktor liefert nicht nur Energie, son-



Schematische Darstellung von Leistungsreaktoren

- a) Siedewasserreaktor  
b) Druckwasserreaktor

den «brütet» Plutonium, also neuen Brennstoff. Man kann dabei erreichen, daß mehr an spaltbarem Plutonium erzeugt wird, als ursprünglich an U 235 eingesetzt wurde. Wir haben es mit einem echten Brutvorgang zu tun (der Satz von der Erhaltung der Energie wird dabei nicht verletzt; lediglich die in anderen Reaktoren ungenutzten Energiereserven des U 235 werden ausgeschöpft).

Im Sommer 1973 wurde das erste Kernkraftwerk am Kaspischen Meer mit schnellem Brüter in Betrieb genommen. Seine 350 MW dienen vor allem dazu, täglich über 100000 m<sup>3</sup> Meerwasser zu entsalzen; der Rest fließt der Energieversorgung zu.

Schnelle Brüter werden auch in anderen Staaten erprobt. Um die Jahrtausendwende wird vermutlich, so schätzen Fachleute ein, der Brutreaktor in den meisten Kernkraftwerken vertreten sein und wesentlich dazu beitragen, die natürlichen Uranvorräte der Welt besser zu nutzen. Diese sind allerdings gewaltig: Allein das im Meerwasser enthaltene Uran könnte weit mehr Energie liefern als alle heute bekannten fossilen Brennstoffe. Allerdings liegt seine technische Nutzbarkeit noch in weiter Ferne.

## TOKAMAK – die Sonne im Labor

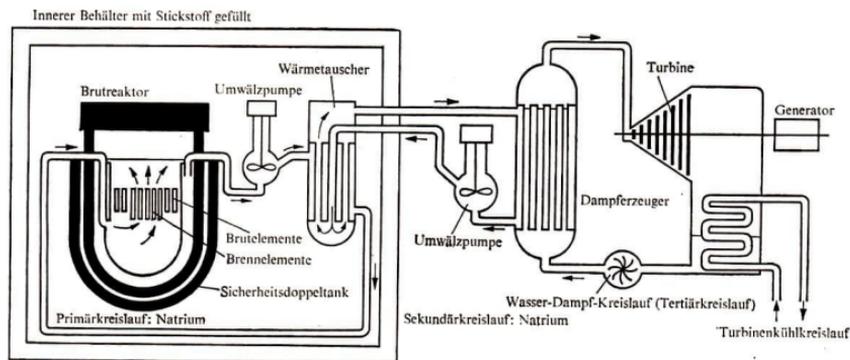
Noch ehe der Vorrat an spaltbaren Materialien merklich abgenommen hat, werden wir Kernkraftwerken nähergekommen sein, die weder Uran noch Plutonium benötigen.

Wir meinen Kernfusionskraftwerke. In ihnen wird Energie nicht durch Spaltung schwerer Atome, sondern durch gesteuertes «Verschmelzen», d. h. gesteuerte Fusion, von leichten Atomkernen gewonnen.

Ungesteuerte Kernfusion vollzieht sich seit Milliarden Jahren in Gestirnen. Auch die Sonnenstrahlung und damit unsere Existenz verdanken wir ihr.

Forscher vieler Nationen trugen zur Erkenntnis der Fusionsvorgänge bei. Das Ziel rechtfertigt größte Anstrengungen:

- Ausgangsmaterial für die Kernfusion sind die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium. Sie sind in Wasser in solchen Mengen enthalten, daß nach Verwirklichung der Kernfusion kein Mangel an Energierohstoff mehr eintreten kann.

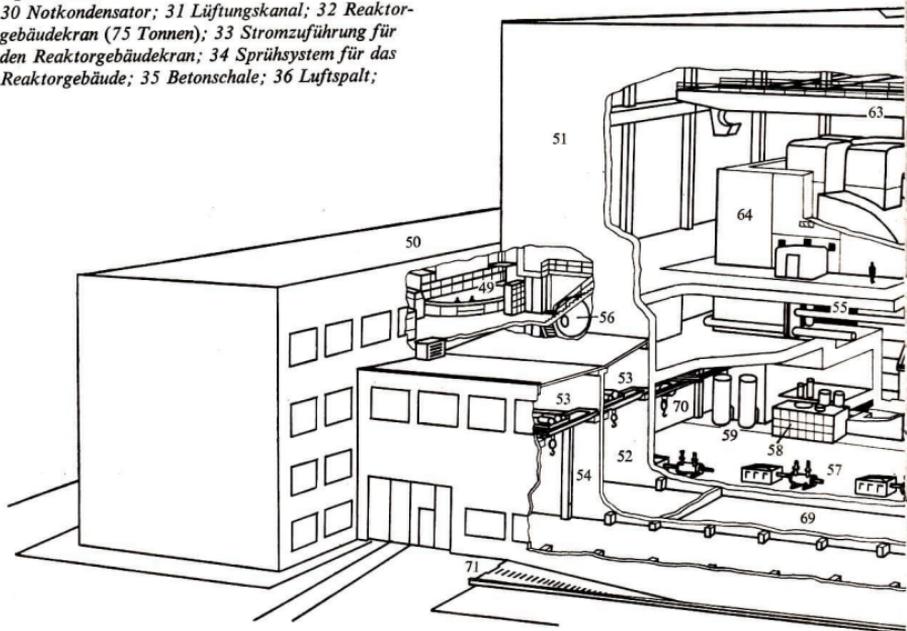


Schema eines «schnellen Brütlers»

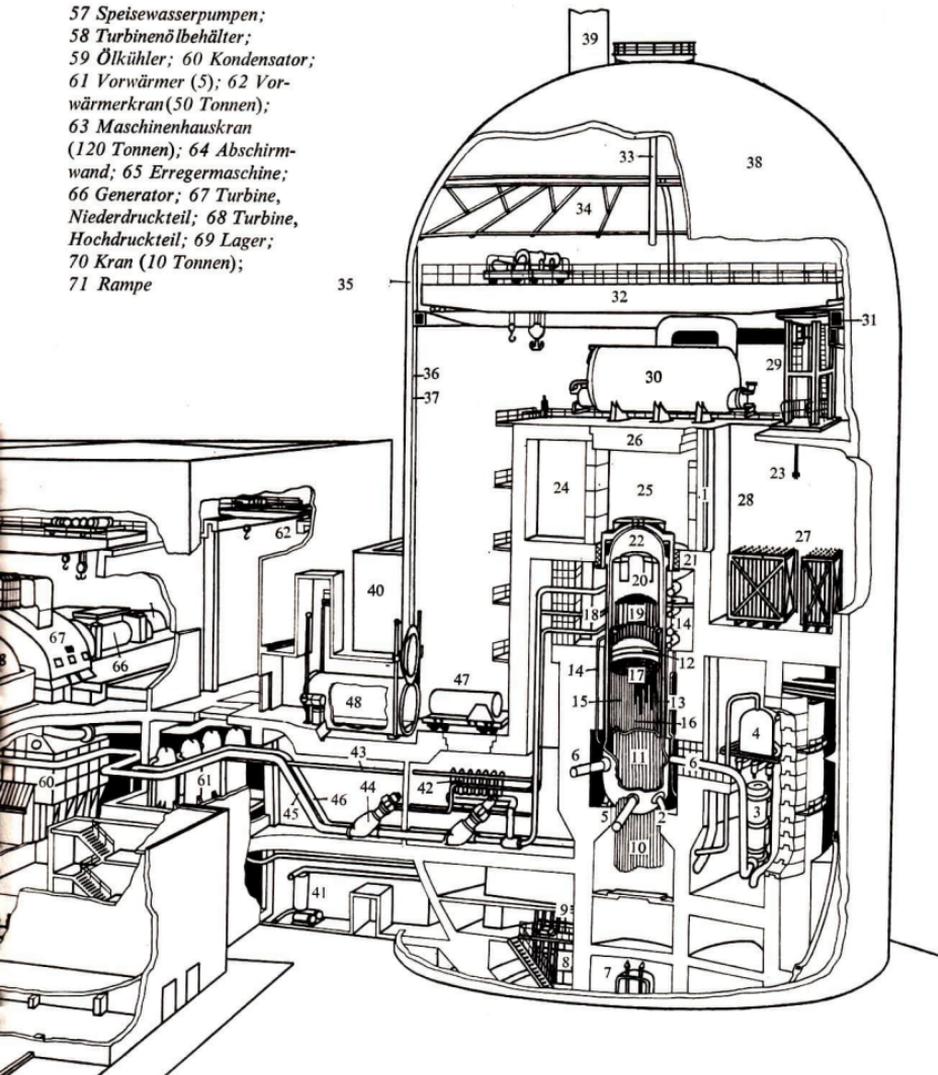
### Kernkraftwerk vom Siedewasserreakortyp

1 Schleuse zum Brennelementlagerbecken; 2 Reaktordruckgefäß, 3 Umwälzpumpen (3); 4 Sekundärdampfherzeuger (3); 5 Umwälzschleife (Eintritt); 6 Umwälzschleife (Austritt); 7 aktiver Sammelbehälter; 8 Druckspeicher für Steuerstabantriebssystem; 9 Steuerstabantriebssystem; 10 Steuerstabantriebe; 11 Führungsrohre für Steuerstäbe; 12 Ringleitung für Kernsprühsystem; 13 Kanäle für Neutronenflußmessungen; 14 Schildkühler; 15 Brennstoffelemente; 16 Steuerstäbe; 17 Reaktorkern; 18 Speisewasserverteiler; 19 Wasserabscheider; 20 Dampftrockner; 21 Kompensator; 22 Reaktordruckgefäßdeckel; 23 Abstreifmaschine; 24 Lagerbecken für Wasserabscheider und Dampftrockner-einheit beim Brennelementwechsel; 25 Flutraum für den Reaktor; 26 Betonabschirmplatte; 27 Gestelle für Brennelemente; 28 Brennelementlagerbecken; 29 Brennelementwechsellmaschine; 30 Notkondensator; 31 Lüftungskanal; 32 Reaktor-gebäudekran (75 Tonnen); 33 Stromzuführung für den Reaktor-gebäudekran; 34 Sprühsystem für das Reaktor-gebäude; 35 Betonschale; 36 Luftspalt;

37 Stählernes Umschließungsgehäuse; 38 Reaktor-gebäude; 39 Abluftkamin vom Aufbereitungs- und Lüftungsgebäude; 40 Aufbereitungs- und Lüftungsgebäude; 41 Nebenkühlwasser-Druckerhöhungspumpe; 42 Primärdampf-Sicherheitsventile; 43 Speisewasserleitung; 44 Absperrventile; 45 Primärdampfleitung; 46 Sekundärdampfleitung; 47 Brennstofftransportbehälter; 48 Materialschleuse; 49 Hauptschaltwarte; 50 Betriebsgebäude; 51 Maschinenhaus; 52 Dekontaminierungsraum; 53 Werkstattkräne (15 Tonnen); 54 Werkstattgebäude; 55 Reduzier- und Umleitstation; 56 Kondensatorvorratsbehälter;



57 Speisewasserpumpen;  
 58 Turbinenölbehälter;  
 59 Ölkühler; 60 Kondensator;  
 61 Vorwärmer (5); 62 Vor-  
 wärmerkran(50 Tonnen);  
 63 Maschinenhauskran  
 (120 Tonnen); 64 Abschirm-  
 wand; 65 Erregermaschine;  
 66 Generator; 67 Turbine,  
 Niederdruckteil; 68 Turbine,  
 Hochdruckteil; 69 Lager;  
 70 Kran (10 Tonnen);  
 71 Rampe

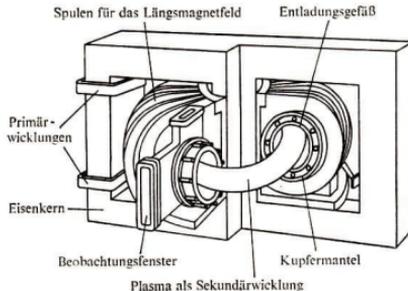


- Die Kernverschmelzung ist sogar im Vergleich zur Kernspaltung ein äußerst energieintensiver Vorgang: Aus 1 g Deuterium ließe sich etwa soviel Energie gewinnen wie aus 10 t Kohle.
- «Verbrennungsprodukt» der Kernfusion ist Helium. Es ist nicht, wie die Abfallprodukte der Kernspaltung, radioaktiv und überdies äußerst wertvoll für andere Bereiche der Technik.
- Die beim Prozeß nebenbei auftretende radioaktive Strahlung bleibt verhältnismäßig gering.

Die Schwierigkeiten, die der gesteuert ablaufenden Kernfusion entgegenstehen, sind jedoch noch erheblich.

Um Deuterium- und Tritiumkerne trotz der zwischen ihnen wirkenden elektrischen Abstoßungskräfte zur Vereinigung zu zwingen, müssen sie auf Temperaturen von 50 bis 100 Millionen K gebracht und räumlich zusammengehalten werden. Bei solchen Temperaturen jedoch befinden sich alle Stoffe im sogenannten Plasmazustand. Das Plasma würde sich sofort nach allen Seiten ausdehnen, und damit wäre eine Vereinigung der Reaktionspartner ausgeschlossen.

Ein so heißes Plasma kann nicht in ein normales Gefäß eingeschlossen werden. Jedes Wandmaterial würde augenblicklich verdampfen. Weil hoch erhitztes Plasma jedoch aus elektrisch geladenen Teilchen (Elektronen und positiven Atomkernen) besteht, bietet sich eine andere Lösung an. Elektrisch geladene Teilchen lassen sich durch Magnetfelder auf bestimmte Bahnen zwingen (dies geschieht z. B. in jeder Fernsehbirne) oder durch Zusammenwirken geeigneter angeordneter Magnetfelder auf begrenztem Raum zusammendrängen, in einer «magnetischen Flasche» einschließen, mit deren «stofflichen» Wänden sie dann überhaupt nicht in Berührung kommen. Dieser Gedanke wurde für zahlreiche Versuche aufgegriffen. Als aussichtsreich erwiesen sich die in der Sowjetunion entwickelten «TOKAMAK»-Anlagen. (Dieser Ausdruck entstand aus den Wörtern «tok», Strom; «kamera», Kammer; «magnitnija katuschki», Magnetspulen. Er ging auch in andere Sprachen ein.)



*Schematischer Aufbau einer TOKAMAK-Anlage*

Eine Skizze dieser Anlage läßt unschwer erkennen, daß es sich um einen abgewandelten Transformator handelt. Seine Sekundärwicklung wird durch einen Rohring dargestellt, der z. B. ein Gemisch aus Deuterium und Tritium enthält. Fließt Strom durch die Primärwicklung, wird das Deuterium/Tritium-Gemisch ionisiert und elektrisch leitend. Es wirkt wie die kurzgeschlossene Windung einer Transformatorwicklung, durch die ein sehr hoher Strom fließt.

Durch den Stromfluß erhitzt sich das Plasma. Durch sein eigenes Magnetfeld wird es in Richtung auf die Ringrohr längsachse komprimiert, die Temperatur steigt weiter an. Das Plasma berührt die Ringwandung nicht mehr. Spulen, die ein Magnetfeld in Längsrichtung des Ringes erzeugen, stabilisieren den Plasmaring zusätzlich.

Mit TOKAMAKS – der Ringdurchmesser der größten liegt derzeit bei 10 m – wurden bereits Plasmatemperaturen von 60 Millionen K und eine Lebensdauer des Plasmarings von mehreren 10 ms erreicht. Das scheint wenig, zeigt aber, daß man sich auf aussichtsreichem Wege zu Kernfusionsreaktoren befindet.

Eine andere Forschungsrichtung untersucht Möglichkeiten, Deuterium und Tritium durch intensive Laserstrahlung aufzuheizen. Doch befinden sich auch diese Experimente noch im Anfangsstadium.

Bis heute gibt es nirgends einen Kernfusionsreaktor. Wann Kernfusionskraftwerke ihren Betrieb aufnehmen werden, ist umstritten. Optimisten schätzen in 20, Vorsichtiger in 40 bis 50 Jahren. Daß sie eines Tages Energie liefern werden, bezweifelt niemand ernstlich.

## Plasmastrahl statt Turbine und Generator

Kraftwerke mit Dampfturbine und Generator erreichen maximal Wirkungsgrade nahe 40%. Verbesserungen liefern vor allem auf Erhöhung der Dampftemperatur hinaus. Doch je höher diese ist, desto schwieriger zu meisternde Werkstoffprobleme

treten auf, z. B. an den mit hoher Geschwindigkeit umlaufenden Turbinenschaufeln. Heute gebräuchliche Dampftemperaturen um 550 °C werden kaum überschritten werden.

Im «magnetohydrodynamischen Generator», kurz «MHD-Generator» genannt – Gegenstand zahlreicher Forschungen, Projekte und Versuche – gibt es keine bewegten Maschinenteile. Elektrisch geladene Teilchen eines Plasmastromes übernehmen gewissermaßen die Rolle von Turbine und Generator. Die kinetische Energie des Plasmastrahls wird unmittelbar in elektrische Energie umgesetzt.

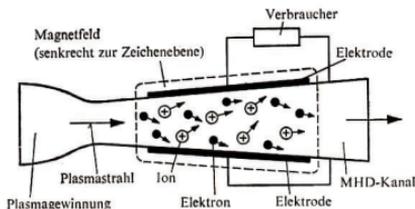
Ein Plasma besteht aus positiven Gasionen, Elektronen und – abhängig von seiner Temperatur – mehr oder weniger vielen neutralen Gasteilchen. Im MHD-Generator wird ein elektrisch leitender Plasmastrahl durch ein Magnetfeld geführt. Nach einem Gesetz der Elektrizitätslehre werden bewegte geladene Teilchen im Magnetfeld senkrecht zu dessen Richtung und senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt; über die Seite der Ablenkung entscheidet das Ladungsvorzeichen.

In der vereinfachten Skizze werden die positiven Ionen nach oben, die negativen Elektronen nach unten auf Elektroden gelenkt. Verbindet man diese über einen Verbraucherwiderstand, gleichen sich die Ladungen aus. Es fließt Gleichstrom. Man kann ihn in Wechselstrom umwandeln und dem Energieversorgungsnetz einspeisen.

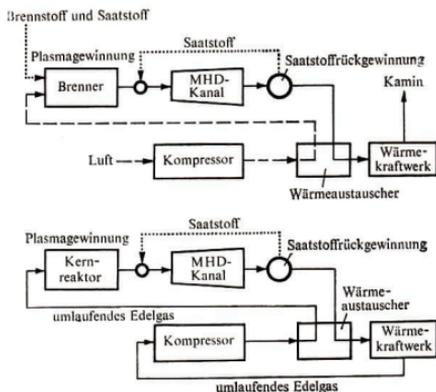
Leider bereitet die Realisierung dieses so einfach erscheinenden Prinzips noch erhebliche Schwierigkeiten. Es können nur die wichtigsten angedeutet werden.

Damit sich das Gas in ein gutleitendes Plasma verwandelt und durch Strömen aus einer Düse auf Geschwindigkeiten im Bereich der Schallgeschwindigkeit und darüber gebracht werden kann, muß es hoch erhitzt werden. Doch selbst Temperaturen von «nur» 2500 °C sind mit fossilen Brennstoffen erst zu erreichen, wenn diese in reinem Sauerstoff verbrannt werden oder die Verbrennungsluft auf 1000 °C und darüber vorgewärmt wird.

Selbst bei solchen Temperaturen jedoch bleibt die Ionisierung des Plasmas gering. Man hilft sich, in-



*Schnitt durch einen MHD-Generator (schematisch)*



*MHD-Generator mit offenem (oben) und geschlossenem Kreislauf (unten)*

dem man ihm leicht ionisierbare «Saatstoffe» zu setzt, wie Kaliumverbindungen. Saatstoffe sind zwar kostspielig, können aber zurückgewonnen und dem Kreislauf erneut zugeführt werden.

Hohe Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des Plasmas sowie chemische Aggressivität der Kaliumverbindungen bringen komplizierte Werkstoffprobleme mit sich. Auch bei höchsten Temperaturen sowie im Dauerbetrieb muß der Plasmakanal seine Isolierfähigkeit, Gasundurchlässigkeit und Festigkeit bewahren, während die Elektrodenoberflächen elektrisch gut leitend bleiben müssen und nicht korrodieren dürfen.

Für die Leistung des MHD-Generators ist die Stärke des Magnetfeldes mit entscheidend. Trotz hoher Feldstärke aber soll der für seine Aufrechterhaltung erforderliche Energieanteil gering bleiben. Das setzt möglichst niedrigen Widerstand der Magnetspulen voraus. Man erreicht ihn durch starke Unterkühlung der Spulen oder aber, indem man – wie bei der sowjetischen Anlage «U 25 B» – auf supraleitende Magneten, wie wir noch erfahren werden, zurückgreift.

Bei Verlassen des MHD-Kanals haben die Gase noch immer eine Temperatur um 1000 °C. Sie nicht weiter zu nutzen, wäre Verschwendung. Im allgemeinen geschieht diese Nutzung in zwei Stufen. Einmal wärmt man mit ihnen die Verbrennungsluft vor, zum anderen durchströmen sie einen Dampferzeuger, dem eine Turbine mit Generator nachgeschaltet ist.

Während der Wirkungsgrad des MHD-Generators gegenwärtig bei 20% bis 25% liegt, sind durch die Kopplung MHD-Generator-Dampfturbine/Generator Wirkungsgrade bis 60% erreichbar.

Diese Kopplung finden wir gegenwärtig in allen Projekten und Versuchsanlagen. Für ihre Betriebsweise ergeben sich zwei Varianten:

Im MHD-Generator mit «offenem» Kreislauf kann das Plasma nach Durchströmen des MHD-Generators und der Nachfolgeeinrichtungen nicht weiterverwendet werden. Das gilt vor allem für die Verbrennungsgase fossiler Brennstoffe. Nachdem sie den MHD-Kanal passiert, Restwärme zur

Luftvorwärmung und Dampferzeugung abgaben und schließlich von den Saatstoffen befreit wurden, entweichen sie ins Freie. Diese Betriebsweise ist am weitesten fortgeschritten.

Bei «geschlossenem» Kreislauf bewegt sich ständig das gleiche Plasmamaterial. Es darf sich daher durch Erhitzen nicht bleibend verändern. MHD-Generatoren mit geschlossenem Kreislauf scheinen besonders geeignet für die Verbindung mit Kernreaktoren. Im Reaktor oder einem nachgeschalteten Wärmeaustauscher wird Helium oder ein anderes Edelgas auf Plasmatemperatur erhitzt. Das Plasma durchströmt den MHD-Generator, gibt seine Restwärme ab und wird erneut durch Reaktor bzw. Wärmeaustauscher gepumpt.

Versuche mit MHD-Generatoren setzten zu Beginn der 60er Jahre ein. Bereits 1970 existierten in der Sowjetunion Versuchsanlagen mit Leistungen von einigen Kilowatt. 1971 nahm eine MHD-Anlage für 25 MW ihren Betrieb auf. Sie arbeitet mit Erdgas und vorgewärmter Luft bei einer Verbrennungstemperatur von 2450 °C. Dem MHD-Generator ist ein Dampfturbinen/Generator-Aggregat für 80 MW nachgeschaltet. Eine 500-MW-Anlage, kohlebeheizt, ist in Vorbereitung, in Serie produzierte Einheiten von 1000 bis 2000 MW sollen folgen.

So könnten sich MHD-Generatoren künftig in zweierlei Hinsicht für die Energieversorgung nützlich machen: Zum einen würden die Vorräte an fossilen Brennstoffen durch bessere Ausnutzung gestreckt, zum anderen würde die in Kernreaktoren freiwerdende Wärme ohne «mechanische Umwege» in Elektroenergie umgesetzt.

# Schaltpult für 160 Millionen Kilowatt

Vom Insel- zum Verbundbetrieb 20  
Nützlichtes Netz 22  
Die Spannungen stiegen 23  
Es gibt keinen absoluten Isolator 24  
Zurück zum Gleichstrom? 25  
Unterkühlte Leitungen, Mikrowellen, Laser 26

## Vom Insel- zum Verbundbetrieb

1891, «Frankfurter Internationale Elektrische Ausstellung»: Inmitten der Maschinen und Anlagen plätscherte ein künstlicher Wasserfall. Er galt als Sensation, entstammte die Antriebsenergie für seine Pumpe doch einem natürlichen, 175 km entfernten «Wasserfall».

In Lauffen durchströmte angestautes Neckarwasser eine Turbine und setzte so einen Drehstromgenerator in Gang. Seine Spannung wurde auf 14000 V transformiert und der Strom nach Frankfurt am Main geleitet. Nur 4 mm waren die Kupferdrähte der Leitung dick; Porzellanisolatoren an 3000 Holzmasten trugen sie. Etwa 200 kW standen auf dem Ausstellungsgelände zur Verfügung.

Dies war die erste echte Elektroenergie-«Fernübertragung».

30 m in der Länge mißt das Schaltpult in der Moskauer Zentrale des Einheitlichen Energiesystems der Sowjetunion. 160000 MW aus mehr als 900 Kraftwerken sind den Ingenieuren und Dispatchern anvertraut, die von diesem Pult aus das größte und leistungsfähigste Elektroenergieverbundsystem der Welt leiten und kontrollieren. Es erstreckt sich von Brest bis Tjumen, von Kaliningrad bis Nordkasachstan, von Murmansk bis Batumi über ein Gebiet, in dem über 200 Millionen Menschen wohnen.

Ein ähnliches Schaltpult gibt es in Prag, am Sitz der «Zentralen Dispatcherverwaltung der vereinigten Energiesysteme der Mitgliedsstaaten des RGW». Hinter diesem langen Namen verbirgt sich das Verbundsystem MIR («Frieden»), dem die europäischen sozialistischen Staaten und Teile der Sowjetunion angehören. 85000 MW werden gegenwärtig diesem Netz eingespeist und fließen ungezählten Verbrauchern zu. Etwa 110 Millionen Menschen ziehen Nutzen daraus. Weder wissen noch merken wir, ob der Strom für Waschmaschine, Beleuchtung, Kühlschrank aus der DDR, aus der VR Polen, der ČSSR oder gar der Westukraine stammt.

Ein westeuropäisches Verbundnetz schließt Frankreich, Belgien, Luxemburg, die Niederlande, die BRD, Italien, die Schweiz und Österreich ein.

Verbundbetrieb bedeutet: Die für die Energieerzeugung wichtigen Kraftwerke und die Verbrauchszentren eines oder mehrerer Länder sind in einem Leitungs- und Anlagennetz miteinander verknüpft und werden gemeinsam gesteuert.

Fernleitungen führen die Elektroenergie Umspannwerken zu, Knotenpunkten, von denen aus sie – über weitere Umspannwerke – verteilt und schließlich den Endverbrauchern zugeführt wird, ähnlich, wie Blut durch Tausende immer feinerer Verästelungen an alle Stellen unseres Körpers gelangt.

Kaum jemand bleibt unbeeindruckt von den weitausladenden Masten der Flüsse, Täler, sogar Meerengen überspannenden Elektroenergie-Fernleitungen oder von den gewaltigen Transformatoren und übermannshohen Isolatoren der Freiluft-Umspannwerke.

Bau und Betrieb solcher Einrichtungen sind in keiner Weise einfach. Die Frage liegt daher nahe: Wäre «Inselbetrieb», bei dem – wie einst in Lauffen – ein Kraftwerk seine und nur seine Abnehmer versorgt, nicht günstiger?

Dichtbesiedelte Länder sind weitgehend elektrifiziert. Reibungsloses Funktionieren von Produktion, Transport- und Nachrichtenwesen, ja des täglichen Lebens setzt zuverlässige und ökonomische Versorgung mit Elektroenergie voraus. «Inselbetrieb» kann dies nicht geben und auch nicht leisten.

Stellen wir uns ein Kraftwerk vor, das ein Gebiet auf diese Weise versorgt.

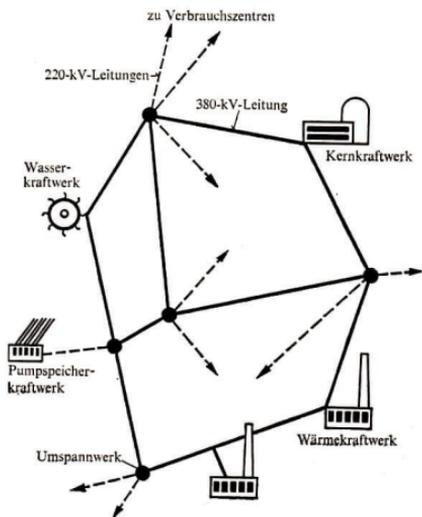
Kommt es zu einer Havarie, machen sich größere Instandsetzungsarbeiten oder eine Generalüberholung erforderlich, erlöschen bei den Verbrauchern die Lampen, «stehen alle Räder still», die der Werkzeugmaschinen ebenso wie die von Straßenbahn und Obus.

Eine Trockenperiode setzt ein. Verbraucher, auf ein Flußkraftwerk angewiesen, bekämen es bald zu spüren; denn Turbinen und Generatoren müßten abgeschaltet werden. Anhaltender Regen oder Perioden strengen Frosts könnten die Arbeit eines aus einem Tagebau versorgten Wärmekraftwerks beeinträchtigen.

Aber auch unter normalen Betriebsbedingungen ist «Inselbetrieb» zur zuverlässigen Energieversorgung ungeeignet.

Man kann Elektroenergie nicht in nennenswerten Mengen speichern. Sie ist zum sofortigen Verbrauch bestimmt. Dieser Nachteil zwingt, solange kein Großspeicher für Elektroenergie gefunden wird, unter anderem zu so aufwendigen Umwegen wie dem der Pumpspeicherwerke.

Andererseits schwankt der Elektroenergiebedarf ständig und erheblich. Er hängt vom Arbeits-



Zusammenschluß mehrerer Kraftwerke zum Verbundnetz

rhythmus der Verbraucher ab, von der Jahres- und vor allem der Tageszeit, sogar vom Wetter. Am frühen Morgen und in den Abendstunden z. B. gibt es die bekannten Spitzenbelastungszeiten, in denen besonders viel Elektroenergie benötigt wird, während nachts der Bedarf stark zurückgeht.

Ein Kraftwerk im «Inselbetrieb» müßte den Spitzenbedarf jederzeit decken können und außerdem über eine erhebliche Havariereserve verfügen. Während der meisten Zeit aber blieben wertvolle Aggregate ungenutzt.

## Nützliches Netz

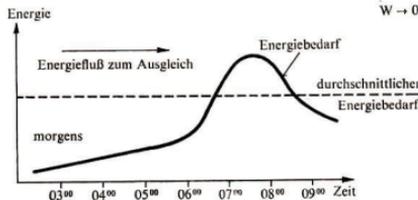
Verbundbetrieb kann diese Probleme zwar nicht völlig beseitigen, doch er vermag sie entscheidend zu beeinflussen.

Eine Betriebsunterbrechung in einem Kraftwerk kann bei Verbundbetrieb meistens durch zusätzliche Belastung der übrigen so abgefangen werden, daß schwerwiegende Folgen ausbleiben. Weil Reservekapazitäten nicht mehr starr an ein Kraftwerk gebunden sind, können sie reduziert und rationeller eingesetzt werden.

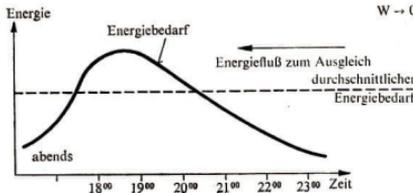
Überholungspausen lassen sich unter den Netzpartnern so abstimmen, daß die Energieversorgung nicht gestört wird. Moderne Kraftwerke mit hohem Wirkungsgrad oder solche, deren Rohenergie ökonomisch günstig ist, decken die stets vorhandene Grundlast, während ältere oder mit teurem Energierohstoff arbeitende Anlagen vor allem für zusätzliche Bedarfsdeckung oder bei Havarien angefahren werden.

Die Unterwegsverluste der Elektroenergie hängen (s. u.) nicht zuletzt von der Übertragungsentfernung ab. Im Verbundbetrieb kann man den Energiefluß so steuern, daß Transportwege kurz bleiben. Nicht nur die Elektroenergieerzeugung, sondern auch der Elektroenergie-transport wird wirtschaftlicher. Besonders bewährt sich Verbundbetrieb, um den Spitzenbedarf zu decken.

Man schaltet sogenannte Spitzenkraftwerke in das Netz, Anlagen, die schnell anlaufen und ebenso



W → 0



W → 0

*Abflachung der Morgen- und Abendspitze in einem Verbundnetz*

schnell wieder stillgesetzt werden können. Hierfür eignen sich z. B. Pumpspeicherwerke, kleinere Tal-sperrenkraftwerke und Gasturbinenanlagen.

Ein weiträumiges Verbundnetz kommt der Dek-king des Spitzenbedarfs aber auch von« Natur aus» entgegen.

Die Spitzenbelastung hängt, wie erwähnt, auch von der Tageszeit ab. Denken wir uns ein Verbund-netz, das sich über Tausende Kilometer in Ost-West-Richtung erstreckt:

Während im östlichen Teil die Menschen auf- stehen, zur Arbeit fahren, die Betriebe anlaufen, kurz, der Stromverbrauch seine Morgenspitze zeigt, herrschen in seinen westlichen Gebieten noch tiefe Nacht und damit Energieüberschuß. Im Verbund-netz kann man den Überschuß von einem zum anderen Teil leiten und so den Spitzenbedarf ab- decken helfen. Am Abend wiederholt sich das Spiel umgekehrt.

Ein solcher Energieaustausch erspart im Verbund-netz «Frieden» den Bau mehrerer Spitzenkraft- werke. In Ländern, die sich über mehrere Zeitzeonen erstrecken, ist sein Nutzen enorm. So ergeben sich in der Sowjetunion Energieeinsparungen, die der Leistung mehrerer Großkraftwerke entsprechen.

Es versteht sich, daß auch Schwankungen im Energieangebot (Trockenperioden, Hochwasser usw.) im Verbundnetz nicht so störend wirken wie bei «Inselbetrieb».

Nicht zuletzt erleichtert Verbundbetrieb den Import oder Export von Elektroenergie. Staaten, denen es an Rohenergiequellen mangelt, können Elektroenergie einführen. Länder, die – und sei es nur zeitweise – Überschuß an Elektroenergie haben, können sie exportieren.

Die Vorzüge des Verbundbetriebes werden um so deutlicher, je größer ein Verbundnetz nach geo- grafischer Ausdehnung und elektrischer Leistung ist. Bereits die Planung ist alles andere als einfach, muß sie doch Hunderte Faktoren berücksichtigen – von Industriestandorten bis zum Klima, von nötigen Reserven bis zu Bedarfsschwankungen u. v. a. Meist ist es nur mit Rechnern möglich, optimale Varianten zu finden.

## Die Spannungen stiegen

Energie-Transportwege jedes Verbundnetzes sind die Fernleitungen. Ihre Entwicklung läßt eine klare Tendenz erkennen: Die Übertragungsspannung steigt mit wachsender Leistung und zunehmender Entfernung. Die 14000 V der Lauffener Übertra- gung bildeten nur den Anfang.

Bereits 25 Jahre später waren Fernleitungsspan- nungen von über 100 kV nicht selten. In den zwanziger Jahren wurde die heute verbreitete Span- nung von 220 kV eingeführt. Jetzt sind wichtige Übertragungsstrecken in Verbundnetzen für 380 kV und darüber ausgelegt.

Der Übergang zu immer höheren Spannungen hat physikalische Ursachen. In jeder elektrischen Leitung treten Verluste auf, vor allem durch Um- wandlung von Elektroenergie in Wärme. Die dabei umgesetzte Verlustleistung  $P_v$  errechnet sich zu

$$P_v = I^2 \cdot R,$$

worin  $I$  den Strom und  $R$  den Leitungswiderstand bedeuten.

Zur Verringerung des Widerstandes wählt man große Leiterquerschnitte und Material geringen spezifischen Widerstandes. Kupfer wäre besonders gut geeignet; für die Fernleitung Lauffen-Frankfurt konnte man davon noch 60 t aufwenden. Für Fern- leitungen hoher Übertragungslistung jedoch ist es auf der ganzen Welt zu knapp – und auch zu schwer. Ein Verbundnetz mit «Kupferschienen» als Leitern wäre konstruktiv unmöglich.

Die Fernleitung großer Leistungen übernehmen besonders Aluminium-Stahlseile, bestehend aus Aluminiumdrähten als den eigentlichen Leitern und einer Stahldrahtseele vor allem zur Aufnahme der mechanischen Kräfte. Auch ihr Querschnitt aber kann nicht beliebig vergrößert werden. Bereits 1 m des verbreiteten Aluminium-Stahlseils von 21 mm Durchmesser hat eine Masse von rund 1 kg. Doch zieht nicht allein das Gewicht an den Tragmasten und Isolatoren. Wind-, Reif- und Eisbelastung kommen hinzu. Der Widerstand der Übertragungs- leitungen ist so nicht beliebig zu verringern.

Aber es gibt noch eine andere Lösung. Elektrische Leistung ist das Produkt aus Spannung und Stromstärke:

$$P = U \cdot I$$

Eine vorgegebene elektrische Leistung läßt sich durch hohe Stromstärke und niedrige Spannung oder umgekehrt durch hohe Spannung bei niedriger Stromstärke übertragen.

Man kann daher die Verlustleistung durch Übergang zu höheren Übertragungsspannungen und entsprechend niedrigeren Stromstärken senken.

Dieser Übergang setzt die Lösung eines umfangreichen Forschungs- und Arbeitsprogramms voraus. Je höher die Spannung, je größer die zu übertragenden und umzuwandelnden Leistungen sind, desto härteren Anforderungen müssen sämtliche Elemente der Übertragungsstrecke genügen.

Die aktiven Teile – Kern, Wicklungen – der Transformatoren z. B. sind im Inneren eines mit Öl gefüllten Behälters untergebracht. Das Öl isoliert und führt zugleich die Verlustwärme ab. In jüngster Zeit nehmen seine Stelle Flüssigkeiten ein, die bei ähnlich isolierenden und wärmeableitenden Eigenschaften unbrennbar sind.

Die Isolatoren, an denen die Leiterseile befestigt sind, müssen – von ihrer mechanischen Belastung abgesehen – sicherstellen, daß es weder durch Verschmutzung noch durch Tau usw. zu Kriechströmen kommt, die Überschläge und Kurzschlüsse einleiten können.

Um den Kriechweg zu verlängern bzw. zu unterbrechen, erhielten die (mitunter über 3 m langen) Isolatoren ihre charakteristische, an Tellerstapel erinnernde Form. Als Material dienen vorwiegend Spezialporzellan, Keramik und Glas.

Beim Abschalten hoher Leistungen entsteht durch das Öffnen der Kontakte ein elektrischer Lichtbogen. Er muß schnellstens gelöscht werden, sonst würde der Schalter durch die Hitze des Bogens zerstört. Man kühlt und «erstickt» den Lichtbogen in Öl, «bläst» ihn durch Druckluft aus oder auch durch Gase, die sich aus leicht verdampfenden Materialien erst in der Bogenhitze entwickeln.

Mit einer Spannung von 110 kV können bis zu 80 MW etwa 100 km weit wirtschaftlich übertragen werden. Bei 220 kV steigen Leistungs- und Entfernungsgrenzen auf etwa 150 MW bzw. 200 km, eine 380-kV-Leitung kann über 600 MW bis 500 km weit fortleiten.

Alle diese Spannungen und sogar noch einige darunter, wie 10 kV, 20 kV, 30 kV, werden verwendet und von Umspannwerken sowie -stationen bereitgestellt. Leser werden vielleicht über diese verschiedenen «Spurweiten» in einer Zeit überrascht sein, da Standardisierung, Vereinheitlichung und Baukastensysteme von Wichtigkeit sind. Hier muß gesagt werden, daß erstens auf Grund internationaler Absprachen die Zahl der verwendeten Spannungen bereits erheblich reduziert wurde, daß zweitens die noch vorhandenen Spannungsabstufungen sich als notwendig und nützlich erwiesen haben.

Je höher eine Spannung ist, desto aufwendiger sind die Transporteinrichtungen. Selbst der Platzbedarf der Leitungen, die z. B. durch Waldschneisen geführt werden müssen, spielt eine Rolle, mißt doch bereits der «lange» Querarm eines (48 m hohen) 380-kV-Mastes fast 28 m. Die Trassenführung ist bei solchen Dimensionen alles andere als einfach.

Ferner treten, wie gleich ausgeführt werden soll, neben den Wärmeverlusten, die durch die hohe Spannung vermindert werden, andere Verluste auf, die mit der Spannung steigen.

Ebensowenig, wie man etwa eine Autobahn zu einem kleinen Dorf führen würde, wäre es sinnvoll und vertretbar, die höchste Spannung bis in die feinsten Äste eines Energienetzes zu leiten. Für jede Entfernung und für jeden Leistungsbedarf stehen geeignete Spannungen zur ökonomischen Übertragung zur Verfügung.

## Es gibt keinen absoluten Isolator

Für sehr weiträumige Verbundnetze oder für Magistralen zwischen ihnen ist eine Spannung von 380 kV noch zu niedrig. Man mußte sie weiter erhöhen.

Schon sind, neben 525-kV-Leitungen, solche für 750 kV in Betrieb, z. B. zwischen Moskau und Leningrad, vom Donbass in die West-Ukraine, als Zubringer im Verbundnetz MIR zwischen Winniza in der Sowjetunion und dem 860 km entfernten Albertirsa in der Ungarischen VR. Weitere 750-kV-Leitungen, wie West- und Südukraine/VR Polen bzw. VR Bulgarien, sind vorgesehen. Bei dieser Spannung sind Leistungen um 2000 MW übertragbar. Spannungen bis 1150 kV, sie wären z. B. für eine Energiemagistrale Ostsibirien-Kasachstan wichtig, werden erforscht und auf einer etwa 300 km langen Versuchsstrecke erprobt.

Mit dieser Spannung allerdings scheint die Grenze der Drehstromübertragung erreicht zu sein. Der Grund dafür sind die mit wachsender Spannung zusätzlich auftretenden und wachsenden Energieverluste.

Es gibt keinen absoluten Isolator, über jeden Isolator fließt ein zwar sehr geringer, mit steigender Spannung jedoch zunehmender Leckstrom. Schon bei 380 kV treten außerdem erhebliche «Korona-verluste» auf. Durch Wirkung des elektrischen Feldes um die Leiterseile entweicht, besonders an Kanten und Spitzen, Elektrizität in die Atmosphäre, auch diesmal steigend mit der Spannung. Abhilfe brächten sehr große Leitungsdurchmesser, bei denen die Oberflächenkrümmung der Leiterseile gering wäre.

Da solche Seile nicht vertretbar sind, hilft man sich mit sogenannten Bündelleitern. Sie bestehen aus 2, 3 oder 4 Leiterseilen, die durch Distanzstücke in annähernd gleichem Abstand gehalten werden und dann fast wie ein Leiter großen Durch-

messers wirken. Trotzdem sind die Koronaverluste bei den höchsten heute üblichen Spannungen beträchtlich.

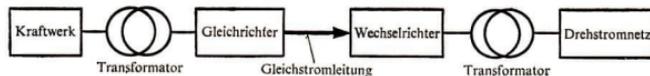
Bei Übertragungsentfernungen, die 1000 km wesentlich überschreiten, kommen weitere Schwierigkeiten hinzu. Sie sind aber in den Gesetzmäßigkeiten und Eigenschaften des Wechselstroms selbst begründet. Eine Erklärung würde hier zu weit führen. Wichtig sind die Folgerungen: Man kann Drehstrom nicht stabil über Tausende Kilometer übertragen.

## Zurück zum Gleichstrom?

Bereits 1940 suchte man einen Ausweg. Was Wechselstrom nicht schafft – könnte das Gleichstrom leisten? Heute ist man dabei, auf einer anderen Ebene zur Gleichstromübertragung zurückzukehren. Hochspannungs-Gleichstromübertragung heißt das «Zauberwort», das bedeutet, daß durch Fernleitungen Gleichstrom von 1 MV bis 2 MV fließt.

Abkehr also vom bisherigen System? Keineswegs – die bestehenden Wechselstromnetze bleiben erhalten. Nach wie vor wird Drehstrom an die Verbraucher verteilt. Nur dort, wo große Energiemengen über Tausende Kilometer transportiert werden sollen, hat die Hochspannungs-Gleichstromübertragung ihr Einsatzfeld.

Der in Kraftwerken erzeugte Drehstrom wird zunächst auf 1 bis 2 Millionen Volt hochtransformiert und anschließend in Gleichstrom umgewandelt. Das geschieht in Gleichrichteranlagen, deren Konstruk-



*Prinzip der Hochspannungs-Gleichstromübertragung*

tion keine unüberwindlichen Schwierigkeiten mehr bietet und deren Elemente vor allem von der Leistungselektronik beigesteuert werden. Am Ende der Übertragungsstrecke gelangt der Gleichstrom in Wechselrichter. An ihrem Ausgang steht wieder Drehstrom zur Verfügung. Er wird in das Netz eingespeist.

Das klingt sehr kompliziert, doch haben Berechnungen ergeben sowie Versuche bestätigt, daß sich bei der Übertragung großer Leistungen auf Strecken von 1000 km und mehr die Hochspannungs-Gleichstromübertragung rasch «bezahlt» macht.

Zur Übertragung sind nur noch zwei Leiterseile erforderlich. Erhebliche Werkstoffmengen werden eingespart. Die Koronaverluste sind niedriger als bei Drehstrom, die bei einer Wechselstromübertragung in allen isolierenden Teilen auftretenden sogenannten dielektrischen Verluste entfallen.

Versuchsstrecken arbeiten in mehreren Staaten. Man nimmt an, daß die Hochspannungs-Gleichstromübertragung bald erheblich an Bedeutung gewinnen wird.

## Unterkühlte Leitungen, Mikrowellen, Laser

Schon sind weitere Möglichkeiten zumindest im Gespräch. Der Leitungswiderstand läßt sich nämlich auch auf andere Art und Weise als durch Vergrößern des Querschnitts verringern. Der spezifische Widerstand metallischer Leiter sinkt mit der Temperatur, ein kalter Draht leitet besser als ein warmer. Diese Erscheinung untersucht man auf ihre Möglichkeit, hohe Leistungen bei sehr geringen Verlusten durch sogenannte Kältekabel zu übertragen, zumindest auf kurze Strecken, z. B. von den Generatoren eines Kraftwerks bis zu den Transformatoren.

Die Leitfähigkeit von Aluminium etwa steigt gegenüber derjenigen bei normaler Außentemperatur nahezu auf das Zehnfache, wenn man das Kabel mit flüssigem Stickstoff auf Temperaturen um 80 K kühlt. Man arbeitet an rohrähnlichen Kabeln, durch

die ständig ein geeignetes Kühlmittel zur Leitfähigkeitserhöhung zirkuliert.

Kabel, die überhaupt keinen Widerstand mehr haben, ließen sich durch Ausnutzen der Supraleitfähigkeit konstruieren. Von ihnen wird später noch berichtet.

Seit es die Funktechnik gibt, fasziniert der Gedanke der drahtlosen Energieübertragung Laien und Fachleute. Jede Funkverbindung ist ja nebenbei auch eine Energieübertragung zwischen Sender und Empfänger, obgleich der den Empfänger erreichende Energieanteil gegenüber der vom Sender ausgestrahlten Energie minimal ist. Läßt sich das nicht ändern?

In manchen utopischen Romanen spielt die drahtlose Energieübertragung seit Jahrzehnten eine Rolle. Für ihre Helden fliegen Flugzeuge und Raumschiffe mit drahtloser Energiezufuhr, Öltanks oder Kernreaktoren der Schiffe sowie Überlandleitungen sind längst verschwunden. Aus Antennengebilden bezogen, steht überall auf der Welt Energie zur Verfügung.

Schon vor Jahren stieg in den USA ein Hubschraubermodell auf, dessen Elektromotor über einen Mikrowellenstrahl vom Boden aus angetrieben wurde. Ähnliche Experimente gab es auch in anderen Ländern.

Wir haben gelernt, Mikrowellen zu «bündeln», und es gibt für diesen Wellenbereich Sender, deren Strahlleistung bereits nach Megawatt zählt. Doch vorerst besteht wenig Hoffnung, auf diese Weise größere Leistungen bei entfernten Empfängern nutzbar werden zu lassen. Der Wirkungsgrad ist noch denkbar gering, die Verluste bei atmosphärischer Ausbreitung sind hoch. Auch läßt sich die Energie noch nicht annähernd so gut in einem Strahl zusammenhalten, wie dies für die Energieübertragung im Großen notwendig wäre, und schließlich müßte die ganze Strahltrasse hindernisfrei verlaufen.

Günstiger lägen die Dinge, wenn man die Mikrowellenenergie durch metallische Rohre, durch Hohlleiter, gebündelt fortführt. Solche Hohlleiter von allerdings nur wenigen Metern Länge werden z. B.

in der Radartechnik verwendet. Theoretische Erwägungen zeigen, daß sich auf diese Weise Leistungen von mehreren 10 GW durch einen Hohlleiter übertragen lassen würden.

Damit sind wir allerdings wiederum bei einem Leitungsnetz angelangt; und diese Leitungen würden es uns sogar besonders schwer machen. Der Hohlleiter, durch den sich Mikrowellenenergie fortleiten läßt, muß nämlich sehr exakt gearbeitet sein. Jede Veränderung des Durchmessers, jede ungewollte Krümmung hat zur Folge, daß sich die Verluste sehr erhöhen und die Übertragung versagt. Daß man trotzdem weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet anstellt, zeigt, daß Wissenschaftler den erwähnten (und vielen anderen) Schwierigkeiten nicht ausweichen.

Das gilt übrigens auch in gewissem Umfange für den Laser. Laserlicht läßt sich weit schärfer bündeln als Mikrowellen und kann höchste Leistungen übertragen – bei atmosphärischer Ausbreitung aber sind die Verluste noch weit höher als bei Mikrowellen. Man wäre ebenfalls auf genauestens gearbeitete Rohrleitungen angewiesen, die das Laserlicht einschließen. Daher bleibt auch die Laser-Energieübertragung noch Zukunftsmusik.

Im atmosphärelosen Weltraum allerdings könnte man eher daran denken, Mikrowellen und Laserstrahlen nicht nur als Signalträger, sondern zur Energieübermittlung auszunutzen. Die Frage allerdings, ob und wann das sein wird, ist heute noch nicht zu beantworten.

# Strom vom Hausdach- und aus der Petroleumlampe

## Auch Energie-«Zwerge» sind unentbehrlich

Aus Kraftwerken stammt der weitaus größte Teil der Elektroenergie – und der Rest?

Da steht, irgendwo im Süden, ein Bungalow. Weder Freileitungen noch Kabel verbinden ihn mit dem Energienetz; nirgends surrt ein Stromaggregat. Die elektrische Beleuchtung aber brennt, ein Empfänger musiziert, der Kühlschrank kühlt.

Da war vor Jahren auf Messen und Ausstellungen eine Petroleumlampe zu sehen, an deren Zylinder ein Kragen aus strahlenförmig angeordneten Metall-Lamellen auffiel. Sobald die Lampe brannte und der Zylinder sich erwärmte, begann ein an den Kragen angeschlossener Rundfunkempfänger zu «spielen». Abfallwärme der Lampe wurde in Strom verwandelt.

Unsere Wanduhr blieb stehen. Wir wechselten eine Monozelle aus; schon lief sie für ein weiteres Jahr.

Wir sollten über den Elektroenergiegiganten nicht die «Kleinen» vergessen, Stromquellen mit Leistungen zwischen Bruchteilen eines Watt bis zu mehreren 10 kW. Sie sind an vielen Stellen unentbehrlich. Sie versorgen Taschenlampen, -rechner, Radioempfänger, den Anlasser des Kraftwagens, Meßgeräte, kleinere Siedlungen, Baustellen, Wetterstationen, Leuchtfeuer u. v. a. mit Elektroenergie.

Auch Energie-«Zwerge» sind unentbehrlich 28  
Sonnenergie im Meinungsstreit 28  
Gute Aussichten für «trübe Stunden» 29  
Thermoelemente – Thermobatterien 31  
Radionuklidbatterien 41  
Die älteste Stromquelle bleibt jung 42

## Sonnenergie im Meinungsstreit

Kehren wir zum Bungalow zurück. Woher seine Elektroenergie stammt, ist nicht schwer zu erraten. Schließlich ist Nutzung der Sonnenergie heute eines der wissenschaftlich-technischen Themen, um die am meisten gestritten, über die am meisten publiziert wird. Nutzung der Sonnenergie beschreitet zwei Hauptwege:

Bei dem einen wird Wärme gewonnen, indem man in sogenannten Kollektoren die Sonnenstrahlung zum Aufheizen einer Flüssigkeit oder eines Gases heranzieht. Diesen Weg weiter zu beschreiben, ist für unser Buch nicht wichtig, weil die Elektrizität bei dieser Variante nicht im Spiel ist.

Der andere ist die Umwandlung der Sonnenergie in Elektrizität mit Hilfe von Fotoelementen, Sonnenzellen, Solarzellen oder wie immer man diese zu Batterien zusammenschalteten Halbleiterbauelemente nennt.

Die Gangbarkeit dieses Weges haben seit «Sputnik 3» (Mai 1958) zahlreiche Raumflugkörper erwiesen. Ihre Stromversorgung – mit Leistungen bis um 10 kW – übernehmen Sonnenbatterien, die einmal die Geräte unmittelbar speisen und zum anderen Akkumulatoren laden. Diese werden für die Zeit im Erdschatten genutzt.

Für höhere Leistungen und bei Raumfahrtunter-

nehmen über große Entfernungen genügen Sonnenzellen nicht. Bereits auf dem Mars würde die gleiche Sonnenbatterie knapp halb soviel Energie abgeben wie in der Erdumlaufbahn.

Wie ist die Lage auf der Erde? Eine der Sonne zugewandte Fläche an der Obergrenze der Erdatmosphäre empfängt die beachtliche Strahlungsleistung von 1,4 kW. In der Atmosphäre wird rund ein Drittel davon absorbiert. Trotzdem bleibt, allerdings nur günstigenfalls, für den Quadratmeter Erdoberfläche 1 kW übrig.

Das klingt verlockend, denn wenige Quadratmeter Elementenfläche auf dem Dach sollten genügen, ein Wohnhaus voll zu elektrifizieren; ein 1000-MW-Kraftwerk benötigte nur 1 km<sup>2</sup> Elementenfläche. Leider können sich die meisten Gebiete der Welt dieses «günstigen» Falles nur selten oder nie erfreuen.

So gilt die genannte Zahl von 1 kW/m<sup>2</sup> für senkrechten Strahleneinfall, bei allen anderen Winkeln ist die Leistung geringer. Das macht zunächst einmal die Nachführeinrichtungen erforderlich, wie sie von den Sonnenzellenauslegern vieler Raumflugkörper bekannt sind.

Sonnenscheindauer und Sonnenhöhe hängen von Jahreszeit und geographischer Breite ab, müssen also in die Berechnungen einbezogen werden.

Wolken, schlechtes Wetter lassen die Wirkung der Sonnenzellen erheblich absinken, nachts ruht

das Sonnenkraftwerk ohnehin. Das Problem der Sonnenenergienutzung ist daher unlösbar mit der Frage der Elektrizitätsspeicherung verknüpft. Sie ist, wie wir wissen, noch nicht befriedigend gelöst.

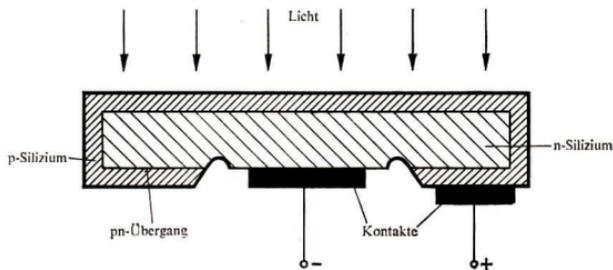
Vor allem aber läßt der Wirkungsgrad der Sonnenzellen zu wünschen übrig. Sie können bis heute höchstens 15% der sie erreichenden Strahlungsenergie in Elektroenergie umwandeln. Um die DDR mit Sonnenenergie zu versorgen, müßte man ein Zehntel ihres Territoriums mit Sonnenzellen bedecken.

Das Sonnen-Großkraftwerk auf der Erdoberfläche – sollte es Wirklichkeit werden – dürfte nur für geographisch sowie klimatisch günstig gelegene Gebiete Bedeutung erhalten, und auch das nur dann, nachdem geeignete Speichermöglichkeiten gefunden wurden.

Auch Projekte, Sonnenkraftwerke im Weltraum zu montieren und die Energie drahtlos zur Erde zu übertragen, dürften in naher Zukunft kaum zu verwirklichen sein.

## Gute Aussichten für «trübe Stunden»

Einen örtlich und leistungsmäßig begrenzten Energiebedarf allerdings könnte und kann Sonnenenergie sehr wohl decken oder wenigstens wirkungsvoll unterstützen.



*Schnitt durch eine Solarzelle. Am Übergang vom p- zum n-Silizium werden bei Lichteinfall Ladungsträgerpaare gebildet*

Wüste – Sonne – Wasserknappheit sind scheinbar untrennbare Begriffe. Dabei gibt es in der Tiefe oft genug Wasser unter dem Wüstenboden. Hier eröffnet sich ein wichtiges Einsatzgebiet für Sonnenenergieanlagen. Sie können den für Pumpenmotoren nötigen Treibstoff ersetzen.

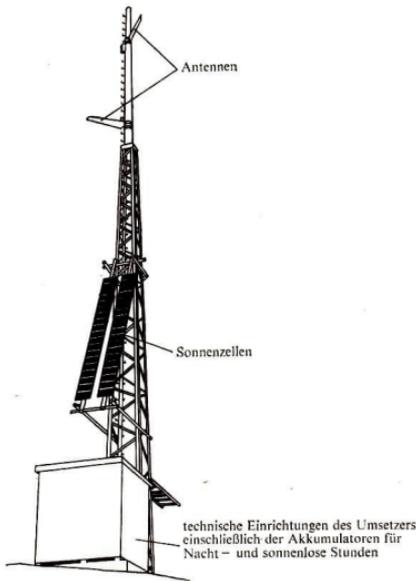
An Beispielen für solche Anlagen ist kein Mangel. In der Karakum-Wüste scheint die Sonne bis zu 350 Tagen im Jahr, und unter der Karakum gibt es Wasser. Sowjetische Techniker stellten «sonnengetriebene» Pumpenaggregate auf. Sie fördern in einer verbreiteten Ausführung stündlich 1500 l Wasser aus 20 m Tiefe. Größere Anlagen werden vorbereitet. Auch in libyschen und algerischen Oasen, am Niger und in New Mexico arbeiten Sonnenpumpen anstelle früher üblicher Windmotoren. Auch die Kombination Sonnenenergieanlage/Windmotor kann nützlich sein, wie französische Entwicklungen ergaben.

Als Stromquelle für Nachrichtengeräte und -richtungen haben Sonnenbatterien einen festen Platz errungen. So speisen sie in Australien die Relaisstationen einer etwa 600 km langen Richtfunkstrecke. Jede Station benötigt eine Leistung von 125 W, bei hohem Sonnenstand erzeugt ihre Sonnenbatterie ein Mehrfaches davon. Mit dem Überschuß werden Akkumulatoren für die Nacht und für «trübe Stunden» geladen. 3000 Ferngespräche können gleichzeitig über die Strecke geführt werden. Zur Stromversorgung von Fernsehumsetzern haben sich Sonnenbatterien ebenfalls bewährt.

In den «Heliovolta-Anlagen» schufen sowjetische Techniker Sonnenbatterien, die sich auf einfache Weise zu Leistungen von 7,5 W bis 500 W zusammenschalten lassen.

Daß es dabei nicht ausschließlich um Anwendungen in sonnigen Gebieten geht, zeigen sonnen gespeiste Leuchtbojen, Flugzeugwarnlampen, Blinkfeuer, die an der Ostsee und am Ladogasee aufgestellt wurden: in Gegenden also, in denen die Sonne keineswegs immer scheint und überdies nicht sehr hoch am Himmel steht.

Die Speisung von Funkgeräten, Rundfunk-



Aus mehr als 1200 Sonnenzellen gespeister Fernsehumsetzter mit 20 W Sendeleistung

empfängern usw. aus Sonnenbatterien ist seit Jahren bekannt. Der Raumfahrttechnik wurden zusammenrollbare Sonnenbatteriematten entlehnt, die je nach Größe Leistungen von 100 W und darüber abgeben. Sie können im Pufferbetrieb mit einer speichernden Batterie Funkgeräte, Expeditionslager usw., aber auch automatische Wetterstationen mit Energie speisen oder zur Notstromversorgung bereitstehen. Auch zum Destillieren von Trinkwasser, zum Betreiben einer Kühlbox usw. sind sie einsetzbar.

Eine kleinere Ausführung ist sozusagen im Taschenformat verfügbar. Eine etwa 100 cm<sup>2</sup> große Fläche von Siliziumsolarzellen, mit Akkumulatoren kombiniert, gibt genügend Leistung ab, um wahlweise einen Rundfunkempfänger oder ein Kassetten-Tonbandgerät zu versorgen.

Es gibt auch Anwendungen von Sonnenelementen, die von Firmen des westlichen Auslands auf den Markt gebracht werden, über deren Nutzen man jedoch geteilter Ansicht sein kann.

So ist es sicher nicht unbedingt erforderlich, die Armbanduhr mit einer Sonnenzelle zu betreiben, die den Preis ansteigen läßt und den eingebauten Kleinstakkumulator trotzdem nicht überflüssig macht. Ob Taschenrechner und Tischfeuerzeuge unbedingt aus Sonnenzellen gespeist werden müssen, bleibt zumindest fraglich. Vernünftiger erscheinen da schon gleichfalls angebotene Taschenlampen, die über Sonnenzellen einen eingebauten Akkumulator laden und so wirklich immer betriebsbereit sind.

Eine völlig neue Situation könnte sich allerdings ergeben, wenn es gelänge, den Preis für die in ihrer Technologie noch komplizierten Sonnenzellen entscheidend zu senken oder ihren Wirkungsgrad erheblich zu steigern. Daran wird heute in der ganzen Welt gearbeitet, wobei neben Silizium auch andere Halbleiterstoffe, wie Galliumarsenid, aussichtsreich erscheinen.

Um manche Projekte wurde es inzwischen wieder still: Das jahrelang immer wieder auftauchende «Sonnenauto», dessen Dach die Energiequelle in Gestalt von Solarzellen tragen sollte, ist aus den Zeitungsspalten verschwunden und wahrscheinlich für immer abgetan.

## Thermoelemente – Thermobatterien

Die eingangs vorgestellte Petroleumlampe beruht auf einem anderen Effekt. Entdeckt wurde er vor über 150 Jahren von dem deutschen Physiker *Th. J. Seebeck*:

Verlötet man zwei Leiterstücke aus verschiedenen Materialien zu einer geschlossenen Schleife, wird daraufhin die eine Lötstelle erwärmt, die andere gekühlt, fließt in dem entstandenen Kreis Strom. Die ihn antreibende Spannung hängt von den Materialien und vom Temperaturunterschied zwischen den Lötstellen ab.

Bei Metallen und Temperaturunterschieden um 100 K beträgt die Thermospannung allerdings nur Millivolt. Versuche, das Thermoelement zur Energiegewinnung zu verwenden, erwiesen sich zunächst als aussichtslos. Lange Zeit diente der Seebeck-Effekt (auch Thermoeffekt genannt) nur zur Konstruktion von elektrischen Thermometern und Meßfühlern.

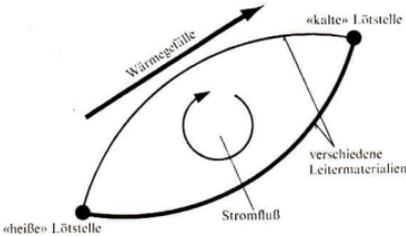
Ganz aus dem Auge verlor man das Thermoelement als Elektrizitätsquelle trotzdem nicht, entsprach es doch einem Lieblingsprojekt aller Energietiker: der unmittelbaren Gewinnung von Elektroenergie aus Wärme ohne den umständlichen und verlustreichen Umweg über Turbine und Generator.

Fortschritte der Festkörperphysik und Halbleitertechnik, insbesondere die Möglichkeit, Halbleiterstoffen durch gezieltes Einbringen von Fremdstoffen vorgegebene Eigenschaften zu verleihen, führten ein Stück näher an dieses Ziel. Bei gleichen Temperaturunterschieden stiegen die Thermospannungen gegenüber Metallen bis zum Hundertfachen. Theoretisch ließ sich ein Wirkungsgrad der Umwandlung bis 20% errechnen. Die praktisch erreichten Werte liegen gegenwärtig bei 10%. Das ist noch nicht viel, für manche Aufgaben aber durchaus vertretbar.

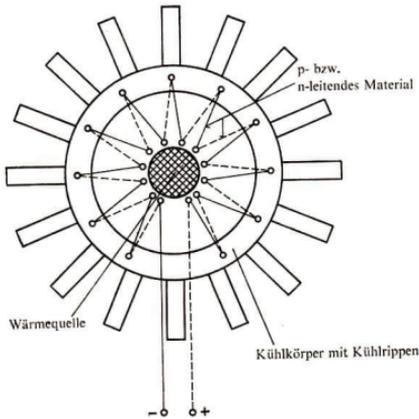
Der prinzipielle Aufbau eines Halbleiter-Thermoelements ist einfach. Zwei Schenkel aus unterschiedlich vorbehandeltem Halbleitermaterial sind durch eine Metallbrücke miteinander verbunden. Der eine Schenkel ist n-leitend, d. h., er enthält «überschüssige» negative Elektronen, der andere p-leitend,

ihm «fehlen» Elektronen, was sich so auswirkt, als enthielte er Überschuss an positiven Ladungen.

Wird die Metallbrücke erhitzt, entsteht in den mit ihr verbundenen Schenkelenden gewissermaßen ein Überdruck an elektrischen Ladungsträgern. Elektronen bzw. «Elektronen-Fehlstellen» bewegen sich zu den kühlen Schenkelenden; zwischen diesen tritt eine Thermospannung auf. Verbindet man die Enden, fließt Strom.



*Schematischer Aufbau eines Thermoelements*



*Hintereinanderschalten von Thermoelementen zur Thermobatterie*

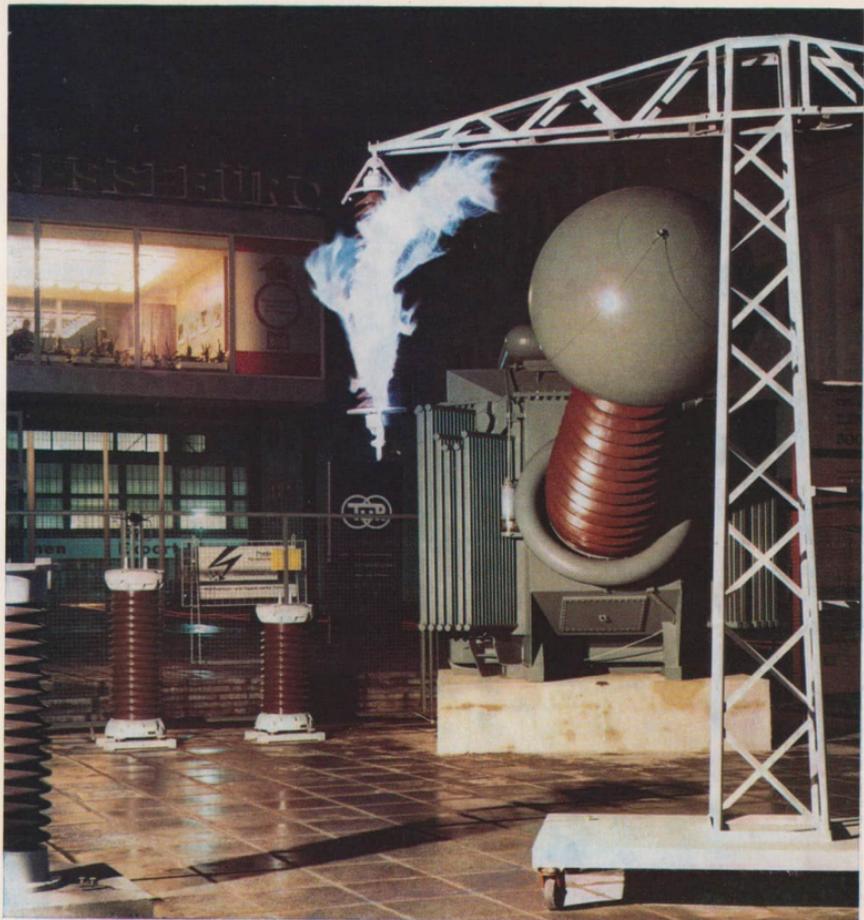
Durch Hintereinanderschalten mehrerer Thermoelemente läßt sich die Spannung vervielfachen. Das Zusammenschalten zu einer Thermobatterie zeigt z. B. die schematische Darstellung des Petroleumlampenkragens. Die heißen Verbindungsstellen umfassen den Lampenzylinder, die kalten zeigen radial nach außen.

Die relativ großen Kühlbleche zur Wärmeabstrahlung weisen auf ein Problem hin, das sich bei allen Thermoelementen und -batterien stellt:

Zwischen heißen und kalten Schenkelenden muß ein möglichst großer Temperaturunterschied nicht nur herbeigeführt, sondern aufrechterhalten werden, obwohl sich die Schenkel von den heißen Enden her erwärmen. Die Kühlung wird vor allem bei größeren Leistungen und hohen Temperaturen schwierig.

Die Petroleumlampe sollte Möglichkeiten demonstrieren. Ähnliche Anordnungen wurden diskutiert und untersucht, ohne bis heute Bedeutung erlangt zu haben. Zu ihnen zählen z. B. Thermobatterien zur Nutzung der Abwärme von Verbrennungsmotoren, Thermoelemente an Dampfkondensatoren, am Ausgang von MHD-Generatoren.

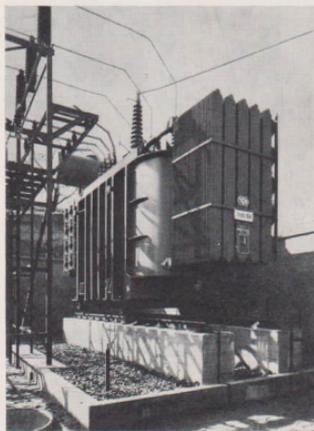
Als einfache und aussichtsreiche Möglichkeit gelten sogenannte thermoelektrische Schichtplatten. Zahlreiche kleine Thermoelemente sind zwischen zwei Metallfolien angeordnet. Die Folie, die mit den heißen Verbindungsstellen in Berührung kommt, wird der Sonne zugewandt. Die Folie an der Rückseite der Thermoelemente strahlt als Kühlfäche Wärme ab. Die ganze Anordnung läßt sich so ausführen, daß man sie zusammenrollen oder -falten kann. Man könnte sie unter anderem statt Sonnenbatterien in der Raumfahrt einsetzen, zumal vermutet wird, daß sie langlebiger, leichter und billiger sein könnten.



*Überschlag eines Langstabisolators für  
das Energieverbundnetz in einer TuR-Wechsel-  
spannungsprüfanlage 600 kV, 3,33 A*



*TuR-Wechselspannungsprüfanlage 1800 kV, aufgestellt im Hochspannungsversuchsfeld des Instituts für Gleichstrom Leningrad*

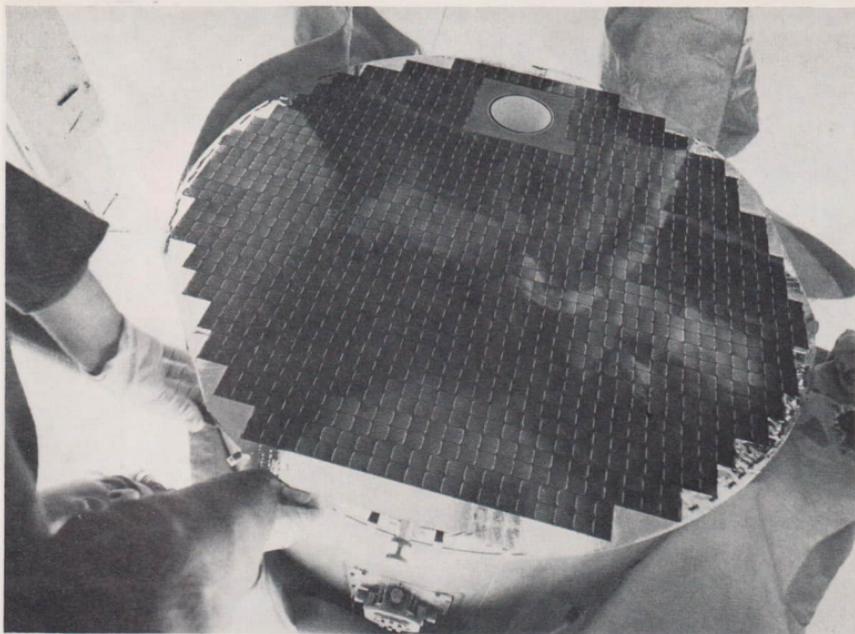


*TuR-Leistungstransformator 40000 kVA, 110 kV in einem Umspannwerk*



*Die erste Pulsationsspannungs-Prüfanlage der Welt mit einer Spannung von 1600 kV während der Montage*





*Über 1000 Sonnenzellen, zu einer «Batterie»  
vereint, für die Stromversorgung eines Erdsatelliten*

*Die riesigen Maschinenhallen von Kraftwerken  
sind gekennzeichnet durch Großaggregate, die von  
nur wenigen Wartungsingenieuren betreut werden*





*Auch im Operationssaal unentbehrlich: elektrische und elektronische Geräte und Hilfsmittel*

*Laserstrahl in der Augenheilkunde – auch eine Leistung der Elektrizität*



*Dank der Mikroelektronik sind auch Farbfernsehkameras handlicher geworden*

## Radionuklidbatterien

Als nützlich und zukunftssträftig haben sich vor allem Verbindungen von Thermoelementen mit Wärmequellen erwiesen, deren Wärme kernphysikalischen Prozessen entstammt.

Zwei Hauptrichtungen sind vertreten: Radionuklidbatterien für Leistungen bis um 100 W und Kernreaktoren mit thermoelektrischer Energieumwandlung für den Leistungsbereich bis  $> 10$  kW.

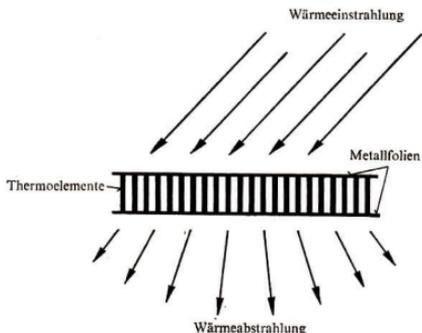
Radioaktive Nuklide (unter Nukliden versteht man eine Menge gleichartiger Atomkerne) senden fortwährend sowie nach bekanntem Zerfallsgesetz eine Teilchen- oder/und Wellenstrahlung aus, wie Alphateilchen, Betateilchen oder Gammastrahlungsquanten. Treffen Teilchen oder Quanten auf Stoff, werden sie abgebremst. Ihre Bewegungsenergie verwandelt sich in Wärme. Sie dient zum Heizen von Thermoelementen.

Radionuklid-Batterien existieren in zahlreichen Varianten. Ihr grundsätzlicher Aufbau erinnert stets an die berühmte Petroleumlampe.

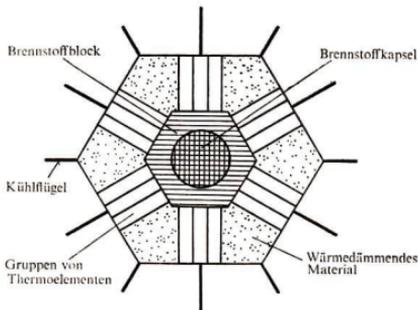
Hauptteil ist der Brennstoffblock. In seinem Inneren befindet sich, z. B. in einer Kapsel, das strahlende Material. Der Block selbst bremst die Strahlung ab und erhitzt sich, oft auf Temperaturen bis  $> 1000$  K.

Um den Brennstoffblock sind Thermoelemente angebracht. Erschwerend gegenüber der Petroleumlampe ist, daß keine Strahlung nach außen dringen und die Umwelt gefährden darf. Das gesamte Aggregat muß strahlensicher abgeschirmt sein, die Abschirmung macht einen erheblichen Teil der Aggregatmasse aus.

Eine wichtige Größe für die Wahl der Brennstoffe ist ihre Halbwertszeit, d. h. die Zeitspanne, in der die Hälfte der jeweils vorhandenen Atomkerne zerfällt. Stoffe, die sich durch hohe Wärmeleistung auszeichnen, haben eine geringe Halbwertszeit, mit ihnen ausgestattete Radionuklidbatterien arbeiten nur für Monate, Wochen oder Tage. Brennstoffe hoher Halbwertszeit dagegen können eine Radionuklidbatterie jahrelang versorgen; allerdings ist ihre Leistung, bezogen auf die Brennstoffmasse,



*Aufbau eines Schichtplattengenerators (schematisch)*



*Schnitt durch eine Radionuklidbatterie*

gering. Die Radionuklidbatterie gibt es daher nicht. Man muß je nach Leistungsbedarf und geforderter Betriebsdauer ein geeignetes Material wählen. An Stoffen dafür fehlt es nicht. Häufig verwendete sind nachstehend aufgeführt:

Material	Halbwertszeit
Plutonium 238	86,4 Jahre
Strontium 90	28,0 Jahre
Promethium 147	2,7 Jahre
Cerium 144	0,8 Jahre
Polonium 210	0,4 Jahre

Radionuklid-Batterien werden seit Mitte der sechziger Jahre betrieben. Da sie vorerst noch teuer sind, haben sie ihre Hauptanwendung auf Gebieten gefunden, in denen ihre hervorstechendste Eigenschaft besonders gefragt ist: die Möglichkeit ununterbrochenen, jahrelangen und wartungsfreien Betriebs.

Vor allem in der Sowjetunion und in den USA wurden Radionuklidbatterien entwickelt und eingesetzt. Sie begegnen uns in automatischen Wetterstationen der Polargebiete, in Leuchtfeuern abgelegener Inseln oder Riffe, in Forschungs- sowie Meßbojen auf den Weltmeeren.

Bei diesen Anwendungen ist die Masse nicht ausschlaggebend. Ausführungen bis zu 4 t sind vertreten. An ihnen sammelte man Erfahrungen für den Einsatz leichterer Aggregate im Weltraum, Radionuklidbatterien von 15 kg Masse und darunter halfen z. B. bei Mondlandeunternehmen, übernehmen die Stromversorgung von Satelliten der Kosmosserie sowie von Navigationssatelliten.

Extrem verkleinerte Radionuklidbatterien werden auf Einsatzmöglichkeiten im medizinischen Bereich, z. B. für Herzschrittmacher, erprobt.

Thermoelektrische Kernreaktoren sind ebenso alt wie Radionuklidbatterien. Bekannt wurde vor allem die sowjetische Anlage «Romaschka». Der aktive Teil ihres Reaktors hat bei 1 m Höhe und 0,5 m Durchmesser eine mit rund 1500 Thermo-elementen belegte zylindrische Oberfläche. Es wird eine elektrische Leistung bis 800 W abgegeben. Amerikanische Anlagen weisen ähnliche Parameter auf.

## Die älteste Stromquelle bleibt jung

Zu den «Kleinstkraftwerken» zählen auch Stromquellen, in denen chemische Energie unmittelbar in elektrische Energie umgewandelt wird. Sie sind seit Beginn des 19. Jahrhunderts bekannt. Bis zur Erfindung der Dynamomaschine waren sie einzige Quellen stetig fließender Ströme.

Elektrotechniker waren mit ihnen nicht sonderlich zufrieden; denn ihre Leistungsfähigkeit blieb gering. Zahlreiche erkannte Anwendungsmöglichkeiten der Elektrizität kamen so nicht über das Laborstadium hinaus und mußten vorerst zurückgestellt werden. Auch heute wären fast 20 kg Taschenlampenbatterien nötig, um nur 1 kW zu erhalten.

Die Anwendung chemischer Stromquellen blieb daher auf Sonderzwecke beschränkt wie Signalanlagen («Klingelement»), Taschenlampen, Feldfernsprecher. Oder sie übernahmen, wie in der Anfangszeit des Rundfunks, eine eng leistungs-begrenzte Stromversorgung, solange Speisung aus einem öffentlichen Netz nicht möglich war.

Die Halbleitertechnik führte zu einer Renaissance der chemischen Stromquellen. Halbleiterbestückte Geräte begnügen sich mit wenigen Volt Spannung und geringer Leistungsaufnahme. Sie können daher ohne zu große Kosten aus chemischen Stromquellen versorgt werden.

Bekannte Elementarten wurden in ihrem Wirkungsgrad verbessert. Vor allem wurden flüssigkeits- und gasdichte Ausführungen entwickelt, um der Korrosionsgefahr durch austretende Chemikalien zu begegnen. Daneben entstanden neue Elementarten, die zwar teurer waren als ihre Vorläufer, dies aber durch höhere Energiedichte und damit geringere Abmessungen aufwogen. Zu ihnen zählen Elemente auf der Grundlage von Quecksilberoxid oder von Lithium, die sich bis auf weniger als Pfennigröße verkleinern lassen und den Betrieb von elektronischen Armbanduhren, extrem miniaturisierten Hörhilfen, Taschenrechnern usw. erst ermöglichen haben.

Diese Fortschritte ändern allerdings nichts an der Tatsache, daß ein Element ausgewechselt werden

muß, wenn die in ihm enthaltenen Chemikalien verbraucht, die energieliefernden Reaktionen abgelaufen sind. Ein Regenerieren ist nicht möglich.

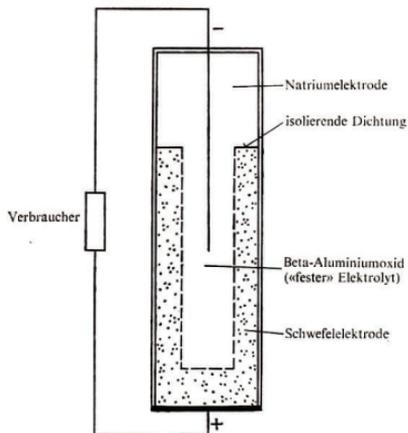
In diesem Punkt schneiden die gleichfalls lange bekannten Akkumulatoren besser ab. Die chemischen Vorgänge während der Stromentnahme können durch die Zufuhr elektrischer Energie wieder rückgängig gemacht werden («Laden» des Akkumulators). Das Wechselspiel Entladen/Laden läßt sich vielfach wiederholen.

Die Energiedichte allerdings ist gering. Beim bekanntesten «Akku», dem Bleiakкумуляtor, beträgt sie etwa 25 Wh/kg, d. h., auf eine Kilowattstunde kommen etwa 40 kg Akkumulatorenmasse.

Auch hier gibt es Fort- und Neuentwicklungen, z. B. den gasdichten und daher in jeder Lage betriebsfähigen Nickel-Cadmium-Akkumulator, den wir in vielen Kleingeräten finden, gegen Monozellen austauschen und über ein Zusatzgerät am Lichtnetz immer wieder aufladen können, oder die Luft-Zink-Akkumulatoren.

Der gegenwärtig in Entwicklung befindliche Natrium-Schwefel-Akkumulator mit Elektroden aus geschmolzenem Schwefel erscheint wegen seiner gegenüber dem Bleiakкумуляtor bis sechsfach höheren Energiedichte aussichtsreich, obwohl er nur bei Temperaturen um 300 °C betriebsfähig ist. Den seit langem gesuchten Großspeicher für Elektroenergie kann er allerdings auch nicht darstellen.

Mit einer ganz anderen Möglichkeit, chemische in elektrische Energie zu verwandeln, werden wir uns noch an anderer Stelle befassen.



*Aufbau eines Natrium-Schwefel-Akkumulators (schematisch)*

# Leiter ohne Widerstand

In der Nähe des absoluten Nullpunktes 44  
Ziel: das supraleitende Kabel 45  
Supermagneten durch Supraleitung 47

## In der Nähe des absoluten Nullpunktes

Jeder Leiter setzt dem elektrischen Strom Widerstand entgegen. Stets verwandelt sich durch ständige «Zusammenstöße» der im Leiter wandernden Elektronen untereinander und mit dessen Atomen ein mehr oder weniger großer Teil der elektrischen Energie in Wärme.

Diese Widerstandswärme hat zwei Seiten. Der einen verdanken wir Glühlampe, Bügeleisen, Schmelzsicherung und zahlreiche technologische Verfahren. Zum anderen verursacht sie überall Energieverluste, wo Strom fließt. Diese beiden Seiten müssen in technische und ökonomische Überlegungen einbezogen werden und zwingen, wenn größere Mengen solcher Verlustwärme abzuführen sind, zu besonderen Kühlmaßnahmen.

Je nachdem, welche «Seite» des Widerstandes interessiert, ist man bestrebt, ihn zu vergrößern (z. B. durch Schaffen spezieller Widerstandsmaterialien) oder zu verringern (z. B. durch Leitermaterial geringen spezifischen Widerstands und durch Erhöhen des Leiterquerschnittes).

Im zweiten Fall gelangt man an Grenzen, vorgezeichnet vor allem durch verfügbares Material, Preis und Konstruktionsbedingungen. Dezimeterdicke Leiterseile zur Fernübertragung von Elektroenergie wären ebenso ökonomisch verfehlt wie technisch kaum ausführbar.

Für die Verminderung des Leitungswiderstandes gibt es noch eine andere Möglichkeit: Der Widerstand metallischer Leiter sinkt mit abnehmender Temperatur. Ein Leiter, auf Temperaturen von 100, 150 oder mehr Grad Celsius unter Null abgekühlt, kann ein Mehrfaches der Leitfähigkeit von derjenigen bei Zimmertemperatur erreichen. In den erwähnten Kältekabeln wird diese Erscheinung genutzt.

Weitergehende Möglichkeiten eröffnet die «Supraleitung», die «Supraleitfähigkeit». 1911 stellte der niederländische Physiker *H. Kamerlingh-Onnes* zu seiner Überraschung fest, daß der Widerstand von Quecksilber bei Abkühlung auf 4,2 K sprunghaft auf einen unmeßbar geringen Wert fiel. Das Quecksilber war «supraleitend» geworden.

Als man andere Stoffe auf Supraleitfähigkeit zu untersuchen begann, zeigte sich: Nicht nur Quecksilber, sondern zahlreiche Substanzen können supraleitend werden. Heute sind 30 supraleitende chemische Elemente sowie über 1000 supraleitende Legierungen und Verbindungen bekannt. Die «Sprungtemperatur», bei der der Widerstand verschwindet, liegt bei Elementen unter 10 K, während bei der zweiten Gruppe Sprungtemperaturen bis über 20 K gemessen wurden.

Den Mechanismus der Supraleitung können wir hier nicht darlegen. Die Erklärung ergibt sich aus inner- und zwischenatomaren Vorgängen, wobei

noch manches einer endgültigen Deutung und Erklärung harrt.

In einem widerstandslosen, geschlossenen Stromkreis müßte ein einmal ausgelöster Strom sozusagen bis in alle Ewigkeit weiterfließen, sofern ihm nicht anderweitig Energie entzogen wird. Daß dies tatsächlich so ist, wurde experimentell bestätigt. Erregt man in einem Stromkreis einen Stromfluß, senkt man darauf die Stromkreistemperatur unter die Sprungtemperatur des Leiters, fließt der Strom auch nach Abschalten der Spannungsquelle weiter. Über drei Jahre lang konnte man so «verlustlose» Ströme aufrechterhalten.

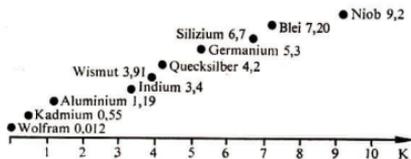
## Ziel: das supraleitende Kabel

Verlustfreier Energietransport durch Leiter! Das mußte die Elektrotechniker auf den Plan rufen, die trotz vieler Mühen 10% und oft weit mehr der zu übertragenden Energien als Transportverluste abzubuchen gezwungen waren. Hier bot sich eine verlockende Möglichkeit, diese Verluste zu vermeiden. Ein supraleitendes Kabel würde, wie Berechnungen ergaben, ausreichen, einem großen Industriegebiet nach Gigawatt zählende Energie auch über große Entfernungen zuzuführen.

Ein weiterer Aspekt kommt hinzu: Supraleitende Drähte vertragen – eben wegen des fehlenden Widerstandes – vielfach höhere Ströme als Normalleiter gleichen Durchmessers. Ein Blei-Wismut-Draht von nur 1 mm Durchmesser z. B. kann im supraleitenden Zustand mit weit über 1000 A belastet werden – oberhalb der Sprungtemperatur würde ihn der gleiche Strom augenblicklich verdampfen lassen.

Supraleitende Kabel sind daher seit Jahrzehnten Gegenstand von Studien und Untersuchungen. In jüngster Zeit haben sie das Experimentierstadium erreicht.

Das Baurezept scheint denkbar einfach: Man nehme supraleitfähiges Material, fertige daraus Leiter und kühle diese bis unter die Sprungtemperatur. Doch der Schein trügt. Ehe Energie über weite



Wichtige supraleitende Elemente

Strecken mit Hilfe der Supraleitung übertragen werden kann, sind zahlreiche technisch-technologische Probleme zu lösen.

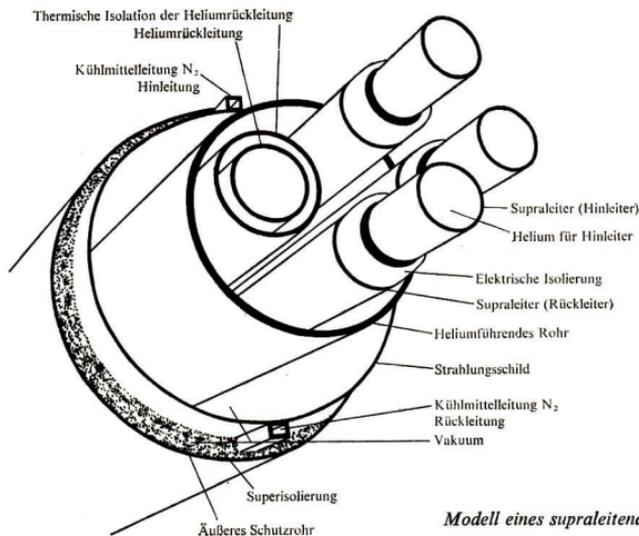
Sie beginnen bei der Materialauswahl. Um das Kühlen zu vereinfachen, ist ein Leiterwerkstoff hoher Sprungtemperatur wünschenswert. Bewährte Leitermaterialien, z. B. Aluminium mit einer Sprungtemperatur von 1,19 K, scheiden von vornherein aus.

Im Vordergrund des Interesses stehen gegenwärtig Legierungen aus Niob und Blei oder aus Niob und Zinn. Untersucht werden auch Legierungen aus Niob, Aluminium und Germanium, die mit 21,8 K den derzeitigen «Sprungtemperaturrekord» halten.

Das Verarbeiten dieser Materialien ist nicht einfach. Zinn-Niob-Legierungen sind sehr spröde. Um

trotzdem biegsame Drähte zu erhalten, stellt man zunächst einen Kupferdraht mit zahlreichen eingebetteten Niobfasern her. Er wird verzinkt und gegläht. Dabei dringt Zinn in das Kupfer und legiert sich mit dem Niob.

Die Sprungtemperaturen der gegenwärtig anwendbaren supraleitfähigen Materialien zwingen dazu, verflüssigtes Helium als Kühlmittel einzusetzen. Seine Gewinnung ist aufwendig; da die gesamte Übertragungsstrecke unter der Sprungtemperatur gehalten werden muß, sind große Mengen nötig. Längs der Leitungstrasse sind daher, im Abstand von höchstens 10 km, Kälteaggregate aufzustellen, durch thermische Isolierung der Leitung «Kälteverluste» zu verhindern und zusätzliche Sicherungen gegen einen plötzlichen Kälteabfall vorzuziehen; denn dieser hätte, sofern dabei die Sprung-



*Modell eines supraleitenden Drehstromkabels*

temperatur überschritten würde, eine sofortige Zerstörung des Kabels zur Folge.

Dies alles sind technische Probleme, die zwar noch nicht zufriedenstellend gelöst sind, jedoch nicht unüberwindbar erscheinen.

Versuchskabel von vorerst mehreren 10 m Länge werden in verschiedenen Forschungseinrichtungen z. B. im Krshishanowski-Energieforschungsinstitut der UdSSR, betrieben und auf ihr Verhalten getestet.

Die drei Stromleiter sind als Röhren ausgebildet. Ihre Oberfläche ist mit einer Niobschicht überzogen, das Rohrinne wird von Helium durchströmt. Jeder Leiter ist von einer gleichfalls in supraleitfähigem Zustand befindlichen Hülle umgeben. Das ganze System, einschließlich der Heliumrückleitung, ist in einem Rohr größeren Durchmessers untergebracht. Alle übrigen Teile, einschließlich einer zusätzlichen Stickstoffkühlung, dienen ausschließlich der Wärme- oder besser dem Kälteschutz. Der Außendurchmesser des Kabels liegt bei 0,5 m.

Mit den Leiterseilen einer Hochspannungsübertragungsleitung hat das supraleitende Kabel also kaum noch etwas zu tun. Trotzdem würde sich der Aufwand für die Übertragung sehr großer Leistungen lohnen, wobei man sogar an eine Verknüpfung von Supraleitfähigkeit und Hochspannungs-Gleichstromübertragung denkt.

Bereits mit supraleitenden Materialien, deren Sprungtemperatur deutlich über 20 K läge, ergäbe sich eine völlig veränderte Situation; man könnte von Helium- zu Wasserstoffkühlung übergehen, was eine bedeutende Vereinfachung aller mit der Kühlung zusammenhängenden Fragen zur Folge hätte. Auch ökonomisch wäre diese Version günstiger.

Gelänge es schließlich gar, supraleitendes Material mit einer Sprungtemperatur nahe der Zimmertemperatur zu finden (ein Wunsch, dessen Erfüllung nicht prinzipiell aussichtslos erscheint), hätte dies eine Umwälzung der gesamten Energieübertragungstechnik zur Folge; denn alle Fragen und Probleme, die sich aus Energieverlusten ergeben, würden nahezu gegenstandslos.

## Supermagneten durch Supraleitung

Soweit bekannt, ist bis heute noch kein supraleitendes Kabel im Einsatz. Andere Anwendungen der Supraleitfähigkeit dagegen gibt es seit Jahren.

Zur Lösung bestimmter Aufgaben benötigen Physiker und Elektrotechniker sehr leistungsfähige Magnete, Elektromagnete sehr hoher Feldstärke. In Beschleunigern von Kernforschungsinstituten z. B. zwingen sie elektrisch geladene Teilchen auf vorgeschriebene Bahnen; für die Trennung der Ladungsträger in MHD-Generatoren sind sie unentbehrlich.

Konstruiert man Elektromagnete in konventioneller Weise, gelangt man an folgende Grenzen:

- Die «verstärkende» Wirkung des Eisenkerns erreicht einen Sättigungswert und trägt dann nicht mehr zur Erhöhung der Feldstärke bei.
- Weder Windungszahl noch Stromstärke lassen sich zur Erhöhung der Feldstärke beliebig vergrößern. Abgesehen vom Raumbedarf wäre der Eigenverbrauch der Magnetspulen zu hoch, die Verlustwärme nicht abzuführen.

«Wickelt» man dagegen eine Magnetspule aus supraleitendem Material, das unter der Sprungtemperatur gehalten wird, kann man bei gleichem Leiterdurchmesser mit tausendfach höheren Stromstärken arbeiten; Wicklungsverluste entfallen, der Eigenverbrauch ist minimal.

Leider gibt es bei supraleitfähigen Magneten einen «Haken»: Bei sehr hoher magnetischer Feldstärke «kippt» ein Leiter vom supraleitenden in den normalleitenden Zustand zurück.

Man umgeht dieses Hindernis durch «hybride» Konstruktionen: Nur die äußeren Windungen des Magneten werden supraleitend ausgeführt, die im Bereich der größten Feldstärke liegenden inneren dagegen aus Kupfer (das selbstverständlich intensiv gekühlt werden muß). Obwohl dadurch der Eigenverbrauch wieder ansteigt, werden gegenüber herkömmlichen Magneten 75% und mehr des Energiebedarfs gespart.

Auch die Masse verringert sich entscheidend. Sie

beträgt beim supraleitenden Magnetsystem der sowjetischen MHD-Anlage «U 25 B» z. B. nur 45 t gegenüber 2000 t bei konventioneller Konstruktion.

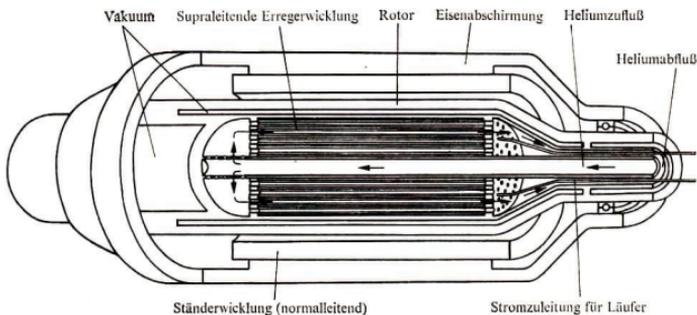
Leistungsfähige Elektromagnete sind auch wichtig für die Konstruktion von Hochleistungsmotoren und -generatoren. In dieses Gebiet hält die Supraleitfähigkeit ebenfalls erfolgreich Einzug. So entwickelte eine britische Firma Motoren von Leistungen über 2500 kW, die wegen des Fortfalls großer Eisenmassen viertel so leicht und um ein Drittel kleiner sind als Motoren gleicher Leistung mit normalleitenden Wicklungen. Die Motoren sind für den Schiffsantrieb vorgesehen.

Zu noch höheren Leistungen stößt man in der Sowjetunion vor. Dort arbeitet man an einem Motor mit supraleitender Wicklung für eine Leistung um 10 MW. Er könnte z. B. Walzstraßen antreiben.

Man hofft, mit supraleitenden Generatoren auf diese Weise Leistungen von 3000 MW und darüber zu erreichen, mehr als das Doppelte heutiger Höchstleistungen.

«Supraleitende Zwerge» können gleichfalls nützlich sein, und zwar gerade auf Grund der Tatsache, daß sich supraleitende Materialien durch entsprechend kräftige Felder in normalleitenden Zu-

stand «umschalten» lassen. Man kennt und verwendet bereits elektronische Bauelemente, wie das sogenannte Kryotron, die auf diesem Effekt beruhen und als Schalt- und Speicherelemente für Elektronenrechner dienen können, und man ist drauf und dran, eine spezielle «Kryoelektronik» zu entwickeln, deren Anwendung auf Datenverarbeitungs- und Nachrichtentechnik als aussichtsreich gilt.



*Prinzipieller Aufbau eines Generators mit supraleitenden Wicklungen*

# Vielseitiger Elektronenstrahl

Katodenstrahlen – «Licht» der Elektronenoptik 49  
Elektronenoptik in jeder Wohnung 50  
Kleinstes wird sichtbar 52  
Werkzeug Elektronensonde 54  
Elektronen schweißen und schmelzen 55

## Katodenstrahlen – «Licht» der Elektronenoptik

Hunderte Millionen Bildschirme leuchten auf der Welt; Stahlblöcke höchster Reinheit werden erschmolzen; Objekte von Molekülgröße zeigen sich uns millionenfach vergrößert; hauchdünne Metallfilme schlagen sich auf anderen Werkstoffen nieder; Strukturen, deren Ausdehnung allenfalls nach Tausendsteln eines Millimeters zählt, werden automatisch und genau aus Metallen, Halbleitern oder Keramik herausgearbeitet.

Prozesse, die einander – so scheint es – wenig angehen. Doch alle haben eine gemeinsame Grundlage, die bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert gelegt wurde.

Damals untersuchte man «Katodenstrahlen», deren Natur zunächst recht umstritten, fast ein wenig «geheimnisumwittert» war, die sich dann aber als nichts anderes entpuppten als ein dichter Hagel, ein Bündel kleinster, negativ elektrisch geladener Teilchen. Unter der Bezeichnung «Elektronen» kennt sie heute jedermann wenigstens dem Namen nach.

Katodenstrahlen entstanden in nahezu luftleer gepumpten Glasröhren, in die zwei an hoher Gleichspannung liegende Elektroden eingelassen waren. Sie gingen stets von der mit dem negativen Pol der Spannungsquelle verbundenen Elektrode, der «Ka-

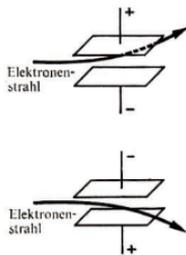
tode», aus (die positive Elektrode erhielt den Namen «Anode»).

Schon damals wurden die wichtigsten Eigenschaften der *Katodenstrahlen* aufgedeckt, z. B. sie

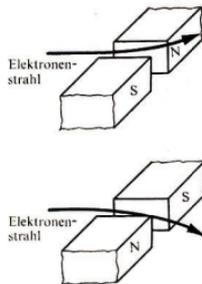
- breiten sich, sofern sie unbeeinflusst bleiben, geradlinig aus;
- bringen manche Stoffe zum Aufleuchten und erzeugen bei ihrem Aufprall Wärme;
- erreichen in Abhängigkeit von der Spannung zwischen Katode und Anode sehr hohe Geschwindigkeiten; bei einer beschleunigenden Spannung von 100 kV prallen sie mit fast 60000 km/s ( $1/3$  der Lichtgeschwindigkeit) auf die Anode;
- lassen sich durch elektrische oder magnetische Kräfte, d. h. im elektrischen oder magnetischen Feld, ablenken und reagieren «trägerlos» auf Änderungen der Feldstärke.

Besonders diese letzte Eigenschaft ist so wichtig, daß wir etwas näher auf sie eingehen müssen.

Durchquert ein Katodenstrahlbündel, ein Elektronenstrahl, den Raum zwischen zwei an elektrischer Spannung liegenden Platten, werden seine Elektronen von der positiven Platte angezogen, von der negativen abgestoßen. Zwischen den Polen eines Magneten weicht ein Elektronenstrahl nach gleichen Gesetzen aus wie ein stromdurchflossener Leiter. Der Betrag der Ablenkung läßt sich verändern, indem man die Spannung an den Ablenkplatten oder



*Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrischen und magnetischen Feld – Grundlage zahlreicher Geräte und Verfahren*



die Stärke des Stroms durch die ablenkenden Magnetspulen verändert.

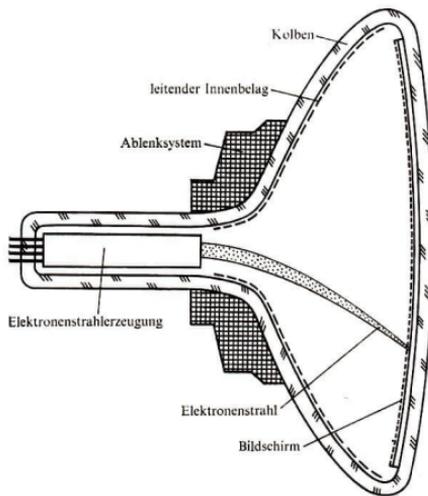
Lichtstrahlen ändern ihre Richtung, wenn sie eine spiegelnde Fläche treffen oder von einem Stoff in einen anderen übertreten. Die Untersuchung dieser Richtungsänderungen und ihre Anwendung führte dazu, daß Linsen, Prismen sowie sämtliche optischen Instrumente entwickelt werden konnten.

Sollten sich ähnliche Möglichkeiten nicht auch mit den ablenkbaren, also ihre Richtung ändernden Elektronenstrahlen eröffnen?

Berechnungen und Experimente ergaben:

In geeignet ausgebildeten elektrischen bzw. magnetischen Feldern gelten für die Ablenkung von Elektronenstrahlen analoge Beziehungen wie für die Ablenkung von Lichtstrahlen durch Linsen, Prismen und an Spiegeln. So lassen sich die von einer strahlenden Fläche ausgehenden Elektronen in einem «Brennpunkt» sammeln, einen Punkt nach verschiedenen Richtungen verlassende Elektronen können wieder in einem Punkt zusammengeführt werden. Man kann Elektronenlinsen, Elektronenobjektive und Elektronenspiegel konstruieren.

Elektronenoptik heißt der Zweig der Technik, der sich mit diesem Verhalten von Elektronen und Elektronenstrahlen befaßt. Sämtliche Geräte, die uns auf den folgenden Seiten begegnen werden, sind Anwendungen der Elektronenoptik.



*Vereinfachter Längsschnitt durch eine Bildröhre*

## Elektronenoptik in jeder Wohnung

Einen Repräsentanten der Elektronenoptik kennen wir alle: die Bildröhre des Fernsehempfängers.

Eine elektrisch geheizte Katode «verdampft» aus ihrer Oberfläche Milliarden und Abermilliarden Elektronen. Zylindrische, elektrische Linsen bündeln sie zu einem spitz zulaufenden Strahl. Durch die Spannungen an den Linsenzylindern wird er so eingestellt, daß seine Spitze genau in die Fläche des Bildschirms am vorderen Röhrendende trifft. Dieser ist mit Stoffen überzogen, die durch Elektronenaufprall zur Lichtaussendung angeregt werden. Der Elektronenstrahl «schreibt» infolgedessen einen

winzigen leuchtenden Fleck. Die Farbe ist vom Bildschirmmaterial abhängig und weitgehend wählbar.

Mit Hilfe des Ablensystems läßt sich der Leuchtfleck nahezu beliebig schnell an jede Stelle des Bildschirms verschieben. Es besteht aus zwei gegeneinander um 90 Grad versetzten Spulenpaaren, die den Röhrenhals von außen umfassen. Strom durch das eine Spulenpaar lenkt den Elektronenstrahl waagrecht, Strom durch das andere senkrecht ab. Zu jedem Punkt auf dem Bildschirm gehört ein bestimmter Vertikal- und ein bestimmter Horizontalablenkstrom.

Die Helligkeit des Leuchtflecks läßt sich, und zwar ebenfalls «trägeitslos», durch eine weitere Elektrode steuern.

Dem nach Intensität und Richtung steuerbaren Elektronenstrahl verdanken wir das Fernsehbild, wobei das «Wunder» darin liegt, mit welcher Geschwindigkeit und Exaktheit es der Elektronenstrahl auf den Bildschirm zaubert.

Um das zu verstehen, müssen wir so kurz wie möglich auf die Bildentstehung beim Fernsehen eingehen.

Wie beim Film wird dem Auge durch eine Folge rasch nacheinander ablaufender Einzelbilder Bewegung vorgetäuscht. Beim Fernsehen sind es 25 Bilder (genaugenommen, aber für uns unwesentlich, 50 «Halbbilder») in der Sekunde. Jedes Bild ist aus gleich großen, mehr oder weniger hellen Bildpunkten, Bildelementen, zusammengesetzt – über eine halbe Million je Bild.

Die Bildelemente werden dem Fernsehempfänger nacheinander als elektrische Signale übermittelt und untereinander in 625 Zeilen angeordnet. Für eine Zeile stehen, wie sich leicht ausrechnen läßt, nur  $64 \mu\text{s}$  zur Verfügung! Dieses Spiel wiederholt sich in jeder Sekunde 25mal; d. h., der Elektronenstrahl muß in jeder Sekunde 15625 Zeilen schreiben. Das wäre ein Buch von über 300 Seiten! Dabei ist diese Rechnung noch weit «untertrieben»: Keine Druckzeile enthält auch nur 100 Buchstaben, jede Fernsehzeile aber um 800 Bildelemente. Mächte man sie zur Grundlage unserer Rechnung, kämen

«Wälzer» mit insgesamt mehreren Tausend Seiten heraus.

Die Schreibgeschwindigkeit längs der Zeilen erreicht bei großen Bildschirmen (z. B. «59-cm-Röhre») 7,6 km/s; das ist ungefähr die Kreisbahngeschwindigkeit eines Erdsatelliten in 400 km Höhe!

Wir sind damit noch längst nicht am Ende. Es genügt nämlich nicht, die Bildelemente blitzschnell zu übertragen und zu schreiben, sie müssen überdies «pünktlich» und in der richtigen Reihenfolge auf den Bildschirmen sämtlicher auf den Sender eingestellten Empfänger erscheinen.

Für hell, dunkel und die Zwischenwerte sorgt eine Steuerelektrode in der Bildröhre. Ihre Kommandos erhält sie vom Sender. Er kümmert sich auch um die Pünktlichkeit. Durch Synchronisierungsimpulse, spezielle elektrische Signale, führt er die Elektronenstrahlen in den Bildröhren stets genau im richtigen Zeitpunkt an den Anfang der nächsten Zeile oder des nächsten Bildes – und zwar so präzise, daß die Synchronisierungsimpulse von Fernsehsendern «willkommene» Hilfsmittel für Zeitmessungen hoher Genauigkeit darstellen.

Farbige Fernsehbilder entstehen auf noch viel kompliziertere Weise. Hier müssen gleich drei Elektronenstrahlen (je einer für die Farbanteile Rot, Grün und Blau, die im richtigen Mischungsverhältnis das farbige Bild ergeben) gesteuert und auf die entsprechenden farbig leuchtenden Bildschirmstellen geführt werden.

Die Bildröhre – abgewandelt und unter Namen wie Elektronenstrahl- oder Oszillographenröhre – hat auch anderweitig vielseitige Verwendung gefunden. In Oszilloskopen zeichnet sie Schwingungsvorgänge aller Art als Oszillogramme auf. Der Radarschirm ist nichts anderes als der Bildschirm einer Elektronenstrahlröhre. In Datenverarbeitungsanlagen erscheinen auf ihm Schriftzeilen, Diagramme und Zeichnungen, die überdies im «Dialog» mit dem Benutzer fortlaufend ergänzt, verändert sowie korrigiert werden können.

Für das Umwandeln optischer Bilder in eine Folge elektrischer Signale ist der ablenkbare Elektronenstrahl bis heute ebenfalls unentbehrlich.

## Kleinstes wird sichtbar

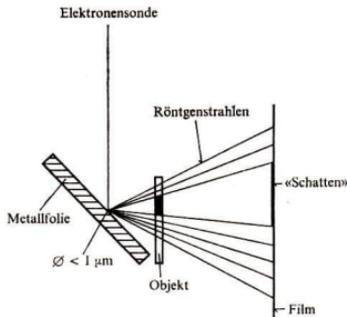
Nur etwa 0,5 mm beträgt der Durchmesser der Leuchtflecke auf Bildschirmen. Doch das ist längst nicht die Untergrenze. Man hat außerordentlich feine Elektronenstrahlen zu erzeugen gelernt, sogenannte Elektronensonden, deren Durchmesser am Auftreffpunkt nur 10 nm bis 100 nm ausmacht.

Lesern, denen diese Zahlen wenig sagen, sei geraten, daß man rund 5000 solcher Elektronenstrahlen nebeneinander legen müßte, um auf die berühmte Haaresbreite (Mittelwert etwa 0,05 mm) zu kommen. Auf die Schnittfläche eines Haares könnte ein solcher Elektronenstrahl 150 Buchstaben schreiben!

Die mehr als nadelspitzen Elektronensonden haben die Wissenschaft um wertvolle Forschungsinstrumente, die Technik um «superfeine» Werkzeuge bereichert.

Für kontrastreiche, vergrößerte Abbildungen kleiner Objekte wünschen sich Wissenschaftler seit langem auch Mikroskope, die mit Röntgen- statt mit Lichtstrahlen arbeiten. Dieser Wunsch ist nur auf Umwegen zu erfüllen; denn den optischen Linsen entsprechende Röntgenstrahlinsen gibt es nicht.

Eine verhältnismäßig einfache Lösung bietet das Röntgenshattenmikroskop. Treffen schnelle Elektronen auf Metall, gehen von diesem, ausgelöst durch die kinetische Energie der Elektronen, Röntgenstrahlen aus. Im Röntgenshattenmikroskop übernehmen die Elektronen einer Elektronensonde diese Aufgabe. Sie treffen am Ende eines evakuierten Zylinders auf eine dünne Metallfolie. Von dem sehr kleinen «Brennfleck» geht ein Röntgenstrahlenkegel aus. Außerhalb der Röhre, dicht vor der Folie, wird das zu durchleuchtende Präparat angeordnet. Sein vergrößertes «Schattenbild» wird fotografisch festgehalten. Als vorteilhaft erweist sich dabei, daß Präparat und Film sich außerhalb des Zylinders befinden und nicht in das Vakuum eingeschleust werden müssen. Auf diese Weise lassen sich Vergrößerungen erreichen, die mit denen der Lichtmikroskope vergleichbar sind.



Prinzip des Röntgenshattenmikroskops

Elektronen, die auf dünne Stoffschichten treffen, werden von diesen mehr oder weniger absorbiert oder gestreut. Diese Erscheinung wird in Elektronenmikroskopen ausgenutzt, Geräten, die einen weit genaueren Blick in die Mikrowelt gestatten als Lichtmikroskope und mit deren Hilfe z. B. Viren, Riesenmoleküle und Einzelheiten des Zellaufbaus sichtbar gemacht werden können.

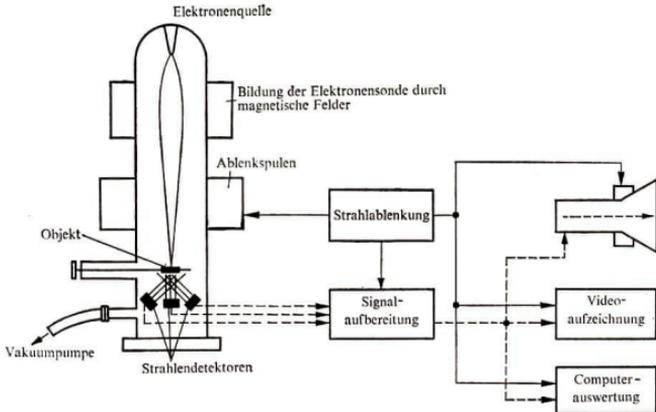
Beim Fernsehen übliche Verfahren begegnen uns im Rasterelektronenmikroskop, einem der modernsten Elektronenmikroskope. In ihm wird das vergrößerte Präparat zeilenweise, Punkt für Punkt, von einer sehr feinen Elektronensonde abgetastet. Hinter dem Präparat (von der Elektronenquelle aus gesehen) sind Strahlendetektoren angeordnet. Sie gewinnen aus den von der jeweils abgetasteten Präparatstelle durchgelassenen bzw. gestreuten Elektronen elektrische Signale. Mit ihnen wird die Helligkeit des Elektronenstrahls einer Bildröhre gesteuert. Auf ihrem Schirm entsteht das vergrößerte Bild des abgetasteten Präparats.

Dabei ist das gleiche Problem zu lösen wie bei

Fernsehkamera und -empfänger. Abtastende Sonde und schreibender Elektronenstrahl müssen synchron laufen. Das zu erreichen, ist hier relativ einfach: Die Baugruppen für die Ablenkung liefern zugleich die Ablenkströme für Elektronensonde und Bildröhren-elektronenstrahl.

Weil jede Stelle des Präparats jeweils nur für einen Augenblick von Elektronen getroffen wird, bleibt die Strahlenbelastung gering; die Gefahr, daß das Präparat durch die Energie der aufprallenden Elektronen überhitzt oder zerstört wird, ist gering. Allerdings muß es – wie bei allen Elektronenmikroskopen – in das Vakuum der Mikroskopröhre eingeschleust werden. Damit verbietet sich das Untersuchen lebender Präparate, auch sind teilweise recht komplizierte Präparierverfahren nötig.

Der Vergrößerungsmaßstab ist in weiten Grenzen einstellbar, in einem serienmäßig produzierten Gerät z. B. von 50fach bis 10millionenfach. Damit werden noch Objektstellen unterscheidbar, die nur einen Abstand von wenigen Hundertmillionsteln eines Zentimeters haben. Das Präparat kann bei



*Raster-Elektronenmikroskop*

Tageslicht und gleichzeitig auf mehreren (auch vom Mikroskop abgesetzten) Bildschirmen betrachtet werden. Weil die Bildsignale zeitlich nacheinander anfallen, lassen sich die Bilder auf Magnetband speichern und gegebenenfalls von einem Computer nach verschiedenen Gesichtspunkten auswerten.

Eine Variante des Rasterelektronenmikroskops ist für das Betrachten von für Elektronen «undurchsichtigen» Präparaten geeignet. Dazu gehören vor allem Stoffe, bei denen – wie bei Metallen und Halbleitern – Oberflächenstruktur sowie Vorgänge an der Oberfläche technische Bedeutung haben. Das Präparat wird wiederum zeilenweise abgetastet. Dabei werden sogenannte Sekundärelektronen freigesetzt oder auftreffende Strahlelektronen reflektiert. Daraus bilden Strahlendetektoren Steuerungssignale für die Bildröhre. Man erhält Oberflächenabbildungen, die vor allem durch ihre hohe Schärfentiefe bestechen.

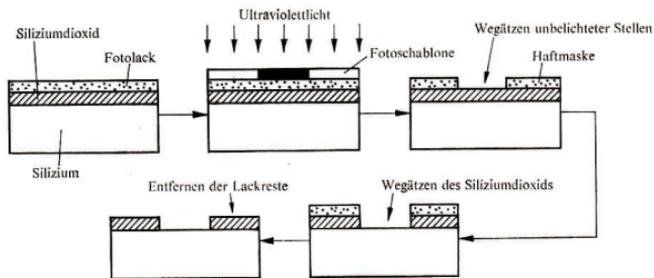
Weitere Arten von Elektronenmikroskopen seien nur gestreift. Das «klassische» Elektronenmikroskop z. B. entspricht in seinem Strahlengang völlig einem Lichtprojektionsmikroskop, wobei dessen optisches System durch elektrische oder magnetische Linsen ersetzt wurde. Beim Feldelektronenmikroskop entstehen wiederum Schattenbilder. Sie werden diesmal durch die auf Kugelradien von einer

Metallspitze zu einem Bildschirm fliegenden Elektronen hervorgerufen. Die zu untersuchende Substanz wird der Spitze aufgetragen und verhindert an dieser Stelle mehr oder weniger die Elektronenemission. Mit dem Feldelektronenmikroskop kann man solche Vergrößerungen erreichen, daß einzelne Atome nachweisbar sind.

## Werkzeug Elektronensonde

Ein Kennzeichen der gegenwärtigen Technik ist u. a. der Übergang zu immer kleineren Dimensionen und damit höheren Anforderungen an die Bearbeitungsgenauigkeiten. Galten in den Anfangszeiten des Maschinen- und Werkzeugmaschinenbaus Millimetergenauigkeiten als respektable Leistung, so wird heute oft das Tausendfache und mehr an Präzision verlangt. Besonders für die Mikroelektronik – wir werden an anderer Stelle näher auf sie eingehen – ist eine «Technologie der Mikrometer» unabdingbare Voraussetzung. Bei der Produktion integrierter Schaltkreise müssen in Werkstoffoberflächen mikrometerfeine Strukturen geätzt werden oder es sind ebenso winzige Strukturen aus anderen Materialien, z. B. hauchdünne Metallschichten, aufzubringen.

Ein weitverbreitetes Verfahren hierfür ist die



*Bearbeitungsstufen bei Haftmaskentechnologie*

Technologie der Haftmasken. Nehmen wir an, in ein Werkstoffplättchen von 0,5 mm oder 1 mm Seitenlänge sei ein kompliziertes Muster zu ätzen. Dazu wird das Plättchen auf der zu bearbeitenden Seite mit sogenanntem Fotolack überzogen, einem Speziallack, der aushärtet, wo er mit ultravioletter Strahlung belichtet wurde. Das Muster, vorher stark vergrößert entworfen, wird in entsprechender Verkleinerung auf die Lackschicht projiziert oder diese wird durch eine das Muster enthaltende Fotoschablone belichtet. Stellen, die vom Ultraviolettlicht getroffen wurden, bleiben bei einem anschließenden Entwicklungsvorgang stehen, an allen übrigen wird der Fotolack herausgelöst.

Aus der Lackschicht wurde damit eine Lackhaftmaske. Sie enthält alle herauszuarbeitenden Konturen; an den betreffenden Stellen liegt die Werkstoffoberfläche frei, die Ätzflüssigkeit kann angreifen und den Werkstoff abtragen. Anschließend wird die Maske entfernt.

Abmessungen bis um 1  $\mu\text{m}$  sind auf diese Weise erreichbar. Weitere Verkleinerung wäre oft wünschenswert, doch sind hier Lichtstrahlen bereits zu grobe Werkzeuge.

Da es Lacke gibt, die sich gegenüber Elektronenstrahlen ebenso verhalten wie Fotolacke gegenüber Licht, lag es nahe, «Lackhaftmasken» mit Hilfe eines Elektronenstrahls herzustellen. Solche Elektronenstrahlbelichtungsanlagen existieren, so z. B. der in der DDR produzierte, vollautomatisch und rechnergesteuert arbeitende Typ ZBA 10.

Der Hauptunterschied gegenüber dem optischen Verfahren ist: Die Lackoberfläche wird nicht auf einmal, sondern Punkt für Punkt belichtet. Dazu wird eine Elektronen-sonde von einem Ablenssystem über die Lackschicht geführt und an den Stellen «hellgetastet», an denen der Lack aushärten soll. Selbstverständlich muß dieser Vorgang, im Gegensatz zum optischen Verfahren, im Vakuum erfolgen. Man gelangt auf diese Weise zu Konturen mit Ausmaßen von 0,5  $\mu\text{m}$  und weniger.

Da das Belichten von Punkt zu Punkt erfolgt, dauert der Vorgang länger als bei gleichzeitiger Belichtung der ganzen Oberfläche. Es bahnt sich

aber bereits eine Möglichkeit an, diese Zeit abzukürzen: Man überläßt das Herausarbeiten der groben Konturen dem Licht, während der Elektronen-sonde die Feinarbeit bleibt. Lacke, die für beide Belichtungsarten geeignet sind, gibt es.

Die Steuerung der Elektronen-sonde durch aufeinanderfolgende elektrische Signale eröffnet eine Möglichkeit, die bei der optischen Methode fehlt: Die Maskenerzeugung kann völlig automatisch von einem sogenannten Elektronenstrahl-Maskengenerator übernommen werden. Er stellt im wesentlichen die Kombination eines Computers mit den Schaltungen zum Erzeugen der Ablenkströme dar. Dem Computer wird das Arbeitsprogramm eingegeben, alle übrigen Schritte – einschließlich der notwendigen äußerst genauen Justierung der künftigen Maske – laufen automatisch ab. Das Programm kann vielfältig variiert, gewechselt oder auch zur späteren Verwendung aufbewahrt werden.

An der Auftreffstelle werden die Elektronen plötzlich gebremst. Ein großer Teil ihrer Bewegungsenergie wird schlagartig in Wärme umgewandelt. Dabei können Leistungsdichten auftreten, bei denen auch hochschmelzende Materialien nahezu augenblicklich verdampfen.

Auf diese Weise lassen sich feinste «Fräsarbeiten» ausführen, kleinste Löcher bei hoher Genauigkeit bohren, die Parameter mikroelektronischer Schaltkreise genau auf einen vorgegebenen Wert bringen usw.

## Elektronen schweißen und schmelzen

Elektronenstrahlen bearbeiten nicht nur Objekte, deren Einzelheiten erst bei starkem Vergrößern sichtbar werden, sondern im Gegenteil auch solche, die recht «massig» sein können.

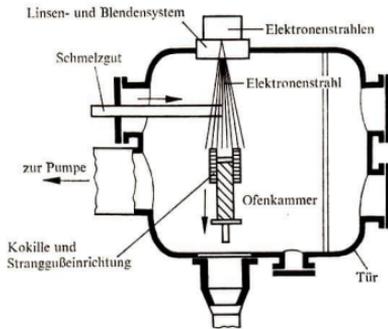
Schweißwerkzeug beim Elektronenstrahlschweißen z. B. ist ein leistungsstarker, straff gebündelter Elektronenstrahl, der über die zu verbindenden oder zu trennenden Teile (z. B. Stahl bis 150 mm Dicke) geführt wird. Ein Ablenssystem steuert ihn. Ein Computer kann die Führung übernehmen.

Das Elektronenstrahlschmelzen wird benutzt, um Metalle (auch solche höchsten Schmelzpunktes), Legierungen, keramische Stoffe usw. unter extremen Reinheitsbedingungen zu erschmelzen.

Instrument dieser Technologie ist der sogenannte Elektronenstrahlschmelzofen. Ein System zum Erzeugen sowie evtl. Ablenken des Elektronenstrahls und das Schmelzgut befinden sich in hermetisch abgeschlossenen Kammern, die während des Betriebs fortlaufend evakuiert, von Gasresten und Verunreinigungen befreit werden. Der Elektronenstrahl trifft mit seinem Brennfleck auf das Ende des kontinuierlich nachgeführten Rohmaterials. Es tropft in einen Tiegel oder speist eine Stranggießeinrichtung.

Dieses Vakuumschmelzen hat wichtige Vorteile, z. B. den, daß durch das Arbeiten unter Vakuum und die hohe Temperatur Gase sowie Fremdstoffe nahezu vollständig aus dem Schmelzgut ausgetrieben werden und auch keine Verunreinigung «von außen» möglich ist. Außerdem ist der Schmelzvorgang gut steuer- und regulierbar; bestimmte Schmelzprozesse und -programme lassen sich automatisch abarbeiten.

Elektronenstrahlöfen werden gegenwärtig für Leistungen bis über 1 MW gebaut. Mit ähnlichen, wenn auch vielfach kleineren Einrichtungen kann man z. B. Drähte verdampfen und den Dampf sich als dünnen Film auf anderen Werkstoffflächen niederschlagen lassen.



*Elektronenstrahlschmelzofen im Schnitt*

# Information steuert Leistung

Messen – eingreifen – steuern 57  
Gasentladungsröhren – ein nützliches  
«Zwischenspiel» 58  
Halbleiter holen auf und überholen 61  
Neue Lösungen – neue Wege 62

## Messen – eingreifen – steuern

Elektrische Messungen gehören zu den unentbehrlichen Selbstverständlichkeiten in Wissenschaft und Technik. Vier Beispiele nur seien erwähnt – aus einer Vielfalt, die sich über Seiten beschreiben ließe:

- Die an weit voneinander entfernten Stellen anfallenden wichtigen Meßwerte eines Energieverbundnetzes werden zentral angezeigt.
- In den Meßwarten von chemischen Betrieben, Kesselanlagen, Kraftwerken können alle wichtigen Betriebsparameter übersehen und verfolgt werden.
- Niemand muß sich mehr in Hitze und Lärm von Schiffsmaschinenräumen zwischen Rohrleitungen hindurchzwängen, um Thermometer, Manometer, Treibstoff- oder Kühlwassermengenmesser periodisch abzulesen; denn alle diese Werte sind auf Skalen, Registrierstreifen oder als ausgedrucktes Maschinentagebuch in der schalldichten, klimatisierten Maschinenleitzentrale verfügbar.
- Ohne ausgefeilte, vielfältige Verfahren der Fernmessung wären Raumfahrt und Raumforschung nicht nur sinnlos, sondern unmöglich.

Elektrische Messungen informieren uns durch Signale, die Lämpchen aufleuchten lassen, Skalenzeiger bewegen, Registriergeräte oder Drucker betätigen, Elektronenstrahlen über Bildschirme füh-

ren, akustische Signale auslösen. Sie melden in der Technik Betriebszustände aller Art und veranlassen uns zum Eingreifen. Nach ihren Angaben werden Schalter betätigt, Tasten gedrückt, Ventile geöffnet und geschlossen, Drehzahlen oder Mischungsverhältnisse verändert, kurz – technische Einrichtungen sowie Anlagen «bedient», wobei schon dieser Ausdruck andeutet, daß dies oft eine wenig befriedigende Tätigkeit ist, die überdies subjektive Fehlhandlungen einschließt.

Schon frühzeitig bemühte man sich um den folgerichtig nächsten Schritt, den Bedienenden überflüssig zu machen und Steuer- sowie Regelvorgänge von den Meßwertsignalen selbst auslösen zu lassen. Warum schließlich sollten Signale, die eine Lampe blinken ließen oder einen Zeiger bewegten, nicht unmittelbar einen Motor ein- bzw. ausschalten oder ein Einstellorgan betätigen können?

In einigen Fällen war das durchaus möglich. Sehr oft allerdings scheiterten die Versuche, Messen und Steuern unmittelbar zu koppeln, zunächst an einer grundsätzlichen Schwierigkeit:

Zum Betätigen eines Schalters oder eines Einstellorgans ist ein bestimmter Kraftaufwand nötig; um die Drehzahl eines Elektromotors zu regulieren, sind oft Ströme von vielen Ampere zu verändern usw. – allgemein: Es wird eine mehr oder weniger große *Steuerleistung* benötigt. Die Signale von den Meßstellen aber tragen Informationen; ihre Lei-

stung ist von untergeordneter Bedeutung und meistens sehr gering, viel zu klein, um einen kräftigen Elektromagneten zu erregen.

Wichtig für eine Informationsübertragung ist vor allem, daß die Informationen ihr Ziel möglichst vollständig und unverfälscht erreichen. Diese Aufgabenstellung bestimmt alle Verfahren.

Das Ziel «Information steuert Leistung» kann im allgemeinen nur über ein Zwischenglied verwirklicht werden, das gewissermaßen Information in Leistung übersetzt.

Bei Handbedienung geschieht das Umsetzen über Sinnesorgane, Hirn und Muskeln. Bei selbsttätiger Steuerung ist eine Einrichtung nötig, die von einer Energiequelle bereitgestellte Leistung im gewünschten Sinne beeinflusst. Relais, elektromagnetische Bauelemente, mit deren Hilfe schwache Ströme stärkere ein- und ausschalten, erwiesen sich als hilfreich. Doch häufig waren sie nicht empfindlich genug, wegen ihrer mechanisch bewegten Kontaktelemente zu langsam und vor allem – sie konnten nur zwischen zwei Betriebszuständen, «ein» bzw. «aus», unterscheiden, aber nicht unmittelbar sich stetig verändernde Signale wie Temperatur- oder Drehzahlwerte verarbeiten.

Was schien näher zu liegen, als für solche Aufgaben Verstärkerröhren einzusetzen? Unmittelbar ist das nur selten möglich. Die Leistung im Ausgangskreis der meisten Röhrenverstärker zählt allenfalls nach einigen 10 W, nur sehr bescheidene Leistungen lassen sich steuern (selbst die «donnerdste» Stereoanlage setzt nur die Leistung einer Glühlampe in Schall um).

Bereits zum Steuern eines Küchenmixermotors müßte man auf die Röhren von Funksendern zurückgreifen. Die Röhren selbst – ganz abgesehen von Stromversorgungs- und Kühleinrichtung – wären weit größer und teurer als der Motor. In anderen Fällen wäre es ähnlich. Im Wettstreit zwischen prinzipiell Möglichem und ökonomisch Vertretbarem zöge die Elektronenröhre meistens den kürzeren. Für eine Verknüpfung Information/Leistung, für eine «Leistungselektronik», benötigte man neuartige Bauelemente.

## Gasentladungsröhren – ein nützliches «Zwischenspiel»

Die Ströme durch Verstärkerröhren bleiben deshalb verhältnismäßig schwach, weil nur die aus einer Katode tretenden Elektronen daran beteiligt sind. In Gasentladungen dagegen, die ebenfalls zwischen einer Katode und einer Anode in einem hermetisch abgeschlossenen, jedoch mit Gas unter niederem Druck gefüllten Kolben ablaufen, tragen neben Elektronen auch elektrisch geladene Gasteilchen, Ionen, zum Stromtransport bei. Ihre Mitwirkung hat zur Folge, daß sehr starke Ströme fließen können. Die erste Brücke zwischen den von der Elektronik angebotenen Möglichkeiten der Informationsgewinnung, -übertragung und -verarbeitung und der Leistungselektrik schlug eine Gruppe von Bauelementen, die als Gasentladungs- oder Ionenröhren bekannt wurden.

Wie Verstärkerröhren enthalten sie im einfachsten Fall eine Elektronen aussendende Katode, eine Anode und eine Steuerelektrode. Füllung ist meistens ein Edelgas oder Quecksilberdampf. Wird zwischen Katode und Anode eine ansteigende Spannung gelegt (Anode positiv gegenüber Katode), setzt bei einer bestimmten «Zündspannung» infolge der Gasentladung plötzlich kräftiger Stromfluß ein. Er erlischt bei anschließender Spannungserniedrigung ebenso unvermittelt – jedoch erst bei Unterschreiten der weit unter der Zündspannung liegenden «Brennspannung» (Beispiel: Zündspannung 200 V, Brennspannung 12 V). Bei umgekehrt angeschlossener Spannung (Anode gegenüber Katode negativ) fließt kein Strom.

Gasentladungsröhren werden mit Wechselstrom betrieben und arbeiten als Gleichrichter, d. h., sie verwandeln Wechselstrom in Gleichstrom, der allerdings im Gegensatz zu dem aus einer Batterie aus einzelnen «Schüben» besteht. Nur während der Halbwellen Anode positiv/Katode negativ fließt Strom. Er setzt bei der Zündspannung ein, bei Unterschreiten der Brennspannung aus. Während der Halbwellen mit negativer Anode bleibt der Strom unterbrochen.

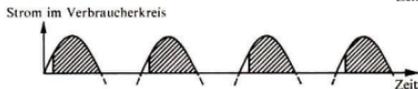
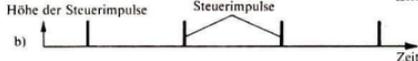
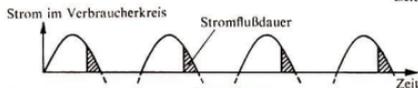
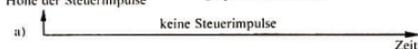
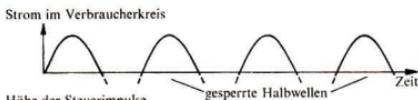
Diese Gleichrichterwirkung ist kein Mangel. Im Bereich der elektrischen Wärmeerzeugung und Beleuchtung ist es prinzipiell gleichgültig, ob Gleich- oder Wechselstrom fließt. In der Elektrochemie wird nahezu ausschließlich Gleichstrom benötigt, und wenn Drehzahlen stetig verändert werden müssen, sind Gleichstrommotoren den Wechselstrommotoren sogar überlegen.

Gasentladungsröhren sind aber nicht nur Gleichrichter schlechthin, sondern *steuerbare* Gleichrichter. Die Stärke des gleichgerichteten Stromes läßt sich durch Signale an der Steuerelektrode verändern. Wir verdanken diese wichtigste Eigenschaft der Gasentladungsröhren der Tatsache, daß die Zündspannung von der anliegenden Spannung zwischen Steuerelektrode und Katode abhängt. Je nach ihrer Höhe zündet die Röhre schon bei geringer Spannung zwischen Katode und Anode; also am Beginn der Halbwelle, in der Mitte, am Ende – oder überhaupt nicht.

Hat die Röhre gezündet und der Stromfluß eingesetzt, wird die Steuerelektrode allerdings wirkungslos; «ausschalten» läßt sich der Strom mit ihrer Hilfe nicht. Sie verhält sich wie eine «Tür», die von einer Stelle aus nur zu öffnen, nicht aber zu schließen ist. Da die Röhren mit Wechselstrom betrieben werden, erlischt die Entladung gegen Ende jeder Halbwelle bei Unterschreiten der Brennspannung.

Zur Steuerung des Stromes wird häufig ein Impulsverfahren benutzt: Eine Folge elektronisch erzeugter Impulse zündet bei jeder Halbwelle über die Steuerelektrode die Gasentladung. Je nachdem, wie die Steuerimpulse zeitlich gegenüber den Halbwellen verschoben werden, kann ein mehr oder weniger großer Teil der Halbwellen die Röhre passieren; der mittlere Strom wird dementsprechend stärker oder schwächer.

Die Frage liegt nahe: Warum dieser Aufwand? Kann man Stromstärken nicht viel einfacher einstellen, indem man dem Verbraucher veränderbare Widerstände vorschaltet, wie es etwa bei regulierbaren Instrumentenbeleuchtungen oder auch bei der Modelleisenbahn üblich ist?



### *Stromfluß durch steuerbare Gleichrichter in Abhängigkeit von Steuerimpulsen*

- a) *fehlende Steuerimpulse – kein Stromfluß im Verbraucherkreis*
- b) *Steuerimpulse gegen Ende der Halbwellen – geringer Stromfluß*
- c) *Steuerimpulse am Anfang der Halbwellen – großer Stromfluß*

Eine derart einfache Lösung ist nur bei sehr kleinen elektrischen Leistungen anwendbar; denn die vom Verbraucher nicht benötigte Energie wird am Vorwiderstand in Wärme umgesetzt. Bei Leistungen, wie sie zum Maschinenantrieb, in Produktionsanlagen sowie im Verkehrswesen üblich sind, wäre dieses Verfahren nicht nur ökonomisch unvertretbar, sondern es brächte – eben wegen der freigesetzten Wärme – nahezu unüberwindbare Komplikationen mit sich. Bei Gasentladungsröhren hingegen wird der Energiequelle – vom relativ geringen Eigenverbrauch der Gasentladungsröhre abgesehen – nur die tatsächlich benötigte Energie entnommen.

Der andere große Vorzug der Gasentladungsröhren ist: Auch zur Steuerung großer Leistungen wird nur eine sehr geringe Leistung benötigt. Oft reichen die von Meßwertgebern stammenden Signale aus, Gasentladungsröhren zu steuern. Wenn nicht, kommt man durch Zwischenschalten eines Verstärkers ans Ziel.

Woher auch die steuernden Signale stammen, welche Form sie immer haben mögen – stets lassen sie sich so aufbereiten, daß sie von Gasentladungsröhren «verstanden» werden. Zugleich wird die Zahl der vor allem bei höheren Leistungen rasch verschleißenden und störanfälligen mechanischen Schaltkontakte drastisch vermindert.

Von den im Laufe der Zeit entstandenen Gasentladungsröhren verbreitete sich vor allem das Thyatron. Es ähnelt der Elektronenröhre am meisten, enthält es doch wie diese eine elektrisch geheizte Katode, ein Steuergitter und eine Anode. Es kann Ströme bis zu mehreren 10 A steuern.

Einige 100 A, wie sie z. B. beim Elektroschweißen auftreten, verarbeitet das Ignitron. Seine Katode ist flüssiges Quecksilber, in das als Steuerelektrode ein sogenannter Zündstift taucht.

Aus der Fülle der möglichen Anwendungen sollen hier nur ganz wenige herausgegriffen werden. Als besonders wichtig hat sich die Steuerung von Antriebsmotoren erwiesen. In der Industrie, im Transport- und Verkehrswesen muß die Drehzahl von Elektromotoren oft in weitem Bereich veränderbar

sein, trotz wechselnder Belastung konstant bleiben, oder die Laufrichtung muß sich umkehren lassen.

Hierfür sind Gleichstrommotoren gut geeignet. Doch ihre Steuerung bringt, wie bereits erwähnt, Probleme mit sich. Bei hoher Motorleistung (z. B. bei Hebezeugen) war sie überhaupt nur auf Umwegen möglich, etwa, indem man vom Netzwechselstrom zunächst einen Gleichstromgenerator antreiben ließ, der seinerseits den Gleichstrommotor speiste.

Thyatronsteuerungen bewähren sich hier in zweifacher Hinsicht. Einmal verwandelte das Thyatron (oder auch ein Ignitron) Wechselstrom in den vom Motor benötigten Gleichstrom, zum anderen bot es vielfältige Möglichkeiten, den Motor über den gleichgerichteten Strom zu steuern.

Thyatronsteuerungen waren daher bald an Fördermaschinen, Aufzügen und Kranen, an Textil-, Papier- und Druckmaschinen, zum Steuern von Mühlen, Werkzeugmaschinen und an vielen anderen Stellen zu finden. Auch leistungsstarke Beleuchtungs- und Wärmeanlagen (denken wir an Bühnen- oder Sportfeldbeleuchtungen, an die Notwendigkeit, die Helligkeit in Straßenerweiterungen und -tunnels der Außenhelligkeit anzupassen, an die Beheizung von Flüssigkeitstanks usw.) werden häufig über Steuergeräte mit Gasentladungsröhren betrieben.

Vorteilhaft ist dabei nicht nur die Steuerungsmöglichkeit selbst – auch das «Wie» des Steuerens ist wichtig.

Man kann das Steuergerät unmittelbar am zu steuernden Verbraucher anordnen. Damit können hohe Leistungen transportierende Leitungen kurz sein, Materialverbrauch und Leitungsverluste bleiben gering.

Steuerleitungen dagegen übertragen nur leistungsschwache Signale. Die Leitungen sind wenig aufwendig und können – evtl. unter Zwischenschaltung von Verstärkern – nahezu beliebig lang sein. Man kann z. B. die Beleuchtung eines Tagebaus oder Hafens von einer Kilometer entfernten Zentrale ein- und ausschalten.

Drahtlose Übertragung der Steuersignale ist

ebenfalls möglich. Besonders für die Kransteuerung ist diese Variante sehr bedeutsam: Sie kann vom Boden aus, in unmittelbarer Nähe des Aufnahme- oder Absetzorts erfolgen: Genauigkeit und Sicherheit der Kranarbeit nehmen zu.

In vielen Fällen werden Schalt- und Einstellknöpfe überflüssig. Meßwertgeber, z. B. Fotozellen, liefern Werte, die in Impulse umgewandelt sowie als Steuersignale den Geräten zugeführt werden. Auf diese Weise lassen sich Geschwindigkeiten, Drehzahlen, Temperaturen usw. selbsttätig regeln. Ersetzt man schließlich die Meßwertgeber durch Programmgeber mit gespeicherter Befehlsfolge, sind ganze Folgen von Arbeitsschritten automatisierbar.

## Halbleiter holen auf und überholen

Bereits nach 1950, als die «industrielle» Elektronik mit Thyatron und Ignitron (außerdem einigen anderen Gasentladungsröhrentypen) in vollem Ausbau war, tauchten in den Steuergeräten statt Elektronenröhren zunehmend Halbleiterdioden und Transistoren auf. Die kleinen, robusten Halbleiterbauelemente standen schon von der Größe her in schroffem Gegensatz zum Thyatron, dessen Höhe je nach Leistung bis 50 cm und mehr betrug. Schwierigkeiten im elektrischen Zusammenwirken der so grundverschiedenen Bauelemente kamen hinzu, bedingt z. B. auch durch unterschiedliche Betriebsspannungsbereiche. Das mußte geradezu Gedanken provozieren, Gasentladungsröhren durch Halbleiterbauelemente zu ersetzen.

Halbleitergleichrichter für geringe Leistungen gab es schon vor 50 Jahren, in einer Zeit, da der Begriff Halbleitertechnik noch nicht einmal geprägt war. Mit ihrer Hilfe wurden aus dem Wechselstromnetz u. a. Rundfunkempfänger und Fernmeldegeräte mit dem zu ihrem Betrieb erforderlichen Gleichstrom versorgt. Noch heute finden wir solche aus Kupferverbindungen oder Selen aufgebaute Gleichrichter in älteren Geräten.

Erst als die Vorgänge in Halbleitern aufgeklärt

waren, als durch zielstrebige technologische Arbeiten die klassischen Halbleitermaterialien Germanium sowie Silizium in genügender Menge und Reinheit verfügbar waren, änderte sich die Situation grundlegend.

Man lernte, Leistungshalbleitergleichrichter zu produzieren, die an einfachem Aufbau, Leistungsfähigkeit, Wirkungsgrad, geringen Abmessungen alle bis dahin zur Gleichrichtung benutzten Bauelemente und Hilfsmittel weit hinter sich ließen.

Ströme bis 0,5 A konnte man den ersten Typen zumuten. Heute sind es 2000 A und mehr; Leistungen über 100 MW lassen sich durch Zusammenschalten solcher Gleichrichterelemente bewältigen. Die dabei auftretenden Verluste liegen unter 1%, ein faustgroßer Siliziumgleichrichter leistet dasselbe wie der mannshohe Quecksilberdampfgleichrichter von einst.

Daß Gleichstromversorgungsanlagen sich durch den Halbleitergleichrichter gründlich veränderten, oft – etwa bei begrenztem Raum oder hohen mechanischen Beanspruchungen – überhaupt erst eine Gleichstromversorgung ermöglichten, ist leicht einzusehen. Von Interesse ist aber hier der *steuerbare* Halbleitergleichrichter.

Er ist aus einer Viererfolge von Schichten p- und n-leitenden Siliziums zusammengesetzt, mit einer Steuerelektrode an der innenliegenden p-Schicht. Man nennt dieses Gebilde Thyristor. Der Ausdruck entstand aus Thyatron und Transistor. Und in der Tat ähneln sich die Funktionen von Thyatron und Thyristor so sehr, daß man diesen anfänglich Halbleiterthyatron nannte.

Der (ebenfalls mit Wechselstrom gespeiste) Thyristor läßt zunächst keinen Strom hindurch. Erst ein Steuerimpuls (oder entsprechende Steuer Spannung) an der Steuerelektrode, am «Tor», «zündet» den Thyristor. Die positive Wechselstromhalbwellen (Anode positiv, Kathode negativ) wird nahezu ungehindert durchgelassen: die andere bleibt gesperrt. Das Tor verliert mit dem Zünden seine Steuerwirkung. Erst kurz vor dem Halbwellenende setzt der Stromfluß aus, der Thyristor kann erneut gezündet

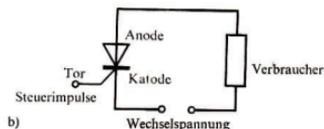
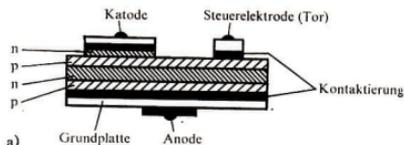
werden. Auch die Steuerungsmethoden entsprechen denen des Thyratrons weitgehend.

Der Thyristor ist etwa so groß wie ein Halbleiterschleifrichter, robust und sofort betriebsbereit, weil er nicht, wie ein Thyratron, zunächst «vorgeheizt» und bei bloßer Betriebsbereitschaft durchgeheizt werden muß. Er steht für Ströme bis zu mehreren Tausend Ampere zur Verfügung und benötigt selbst in seinen leistungsfähigsten Ausführungen nur eine Steuerleistung von wenigen Watt. Die Verluste sind ähnlich gering wie beim ungesteuerten Halbleiterschleifrichter; der Wirkungsgrad ist dementsprechend hoch. Das bedeutet – bei vorgegebener Nutzleistung – nicht nur eine erhebliche Energieersparnis; auch die Kühlung wird einfacher, was wiederum die Abmessungen von Thyristorgeräten günstig beeinflusst.

## Neue Lösungen – neue Wege

Thyristoren sind nicht nur ein vollständiger Ersatz für Thyratron, Ignitron usw., sondern haben weitere technische Lösungen ermöglicht.

Bahnmotoren, seien es nun Straßenbahn-, Stadtschnellbahn- oder Fernbahnmotoren, müssen in besonders weitem Drehzahlbereich und trotz stark wechselnder Last steuerbar sein und sich durch hohes Anzugvermögen auszeichnen. Daher betreibt man Straßen- und Schnellbahnen fast ausschließlich mit Gleichstrom. Auch in manchen Fernbahnnetzen wird er noch angewendet, wenn auch selten; denn Gleichstrom, dessen Spannung für den Motorenantrieb geeignet ist, läßt sich nicht auf weite Entfernungen fortleiten (hohe Leitungsverluste wegen relativ niedriger Übertragungsspannung). Daher gingen die meisten elektrischen Fernbahnen auf Wechselstrombetrieb über. Um mit bestimmten Komplikationen der Motoren fertigzuwerden, speist man die Lokomotiven häufig mit «Bahnstrom» niedriger Frequenz. Er wird in besonderen Bahnkraftwerken erzeugt oder durch Frequenzwandlung des in den Verbundnetzen fließenden Stromes höherer Frequenz.



*Thyristor – unentbehrlich für die Leistungselektronik*

*a) schematischer Aufbau*

*b) Grundschaltung*

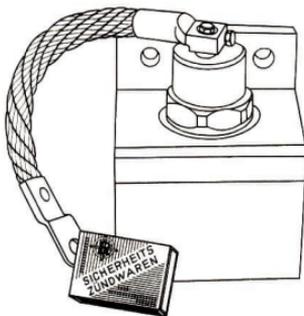
Eine vorteilhaftere Lösung ist es, den Fahrdrähten normalen Wechselstrom einzuspeisen, diesen in den Lokomotiven gleichzurichten und den Fahrmotoren zuzuführen. Versuche mit Thyatron- und Ignitrongleichrichtern (vor allem auf schweizerischen und französischen Bahnen) erwiesen die Richtigkeit des eingeschlagenen Weges. Er wurde durch Gleichrichteraggregate auf Halbleiterbasis (anfänglich mit ungesteuerten Gleichrichtern) noch viel gangbarer. Heute sind im Güter- und Personenverkehr vieler Staaten «Gleichrichterlokomotiven» eingesetzt.

Mit Thyristoren lassen sich aber nicht nur Gleichrichter, sondern auch Wechselrichter für große Leistungen aufbauen: Anlagen, mit denen Gleichstrom in Wechsel- bzw. Drehstrom umgewandelt werden kann.

Im Bereich hoher Leistungen ist das vor allem für die künftige Hochspannungsgleichstromübertragung interessant. Bei ihr werden wir Thyristoraggregate vielleicht an zwei gleich entscheidenden Stellen finden, nämlich am Anfang sowie am Ende der Gleichstromübertragungsstrecke. Hier wandeln sie den übertragenen Gleichstrom in Wechselstrom zurück, dort richten sie den erzeugten und hochtransformierten Wechselstrom zur Weiterleitung gleich. Allerdings sei nicht verschwiegen, daß wegen der hohen Übertragungsleistungen im Bereich der Wechsel- und Gleichrichteranlagen noch zahlreiche Probleme zu lösen sind.

Die Umwandlung von Wechselstrom einer Frequenz in solchen einer anderen ist nicht nur für die Versorgung mit Bahnstrom wichtig. Motoren von Zentrifugen, Kreiselkompassen und manchen Werkzeugmaschinen sollen mit sehr hohen Drehzahlen – 20000 U/min und darüber – laufen. Sie werden einfach und zuverlässig, wenn man sie mit Wechselstrom entsprechend hoher Frequenz betreiben kann. Thyristorfrequenzwandler übernehmen diese Aufgabe.

Gleichstrommotoren haben eine «schwache Stelle»: Die Kommutatoren, mit deren Hilfe dem rotierenden Läufer Strom zugeführt wird, verschleifen und erzeugen Funken. Thyristoren haben



*Thyristor für mehrere 10 Ampere, in Kühlblock eingeschraubt (Streichholzschatel zum Größenvergleich)*

es ermöglicht, kommutatorlose Gleichstrommotoren ohne diese Nachteile zu konstruieren.

Thyristoren existieren auch für sehr geringe Leistungen. Sie sind kleiner als ein Fingerhut, die gesamte Steuereinrichtung fände in einer Streichholzschachtel Platz.

Damit erschloß sich der Thyristorsteuerung das sehr wichtige Gebiet der Steuerung von Kleinverbrauchern. Nicht nur Werkzeugmaschinen, sondern auch Handwerkzeuge wie Bohrer, Schraubendreher, Sägen, ferner Staubsauger, Waschautomaten, Küchen- und Nähmaschinen, sogar Spielzeugmotoren werden immer öfter über Thyristoren gesteuert.

# Klein, kleiner, am kleinsten

Kompliziertheit bringt Komplikationen 65  
Gedruckte Schaltungen 67  
Schaltungen auf Glasplättchen 68  
Filme, Dämpfe, Masken 69  
Schaltungen in Halbleiterplättchen 71  
Mikroelektronik ist Elektronik auf neue Art 81

## Kompliziertheit bringt Komplikationen

Die ersten Quarzuhren – um 1930 – benötigten einen ganzen Raum für sich, wurden wie ein Äpfel gehütet und konnten wegen ihres hohen Preises nur von wenigen wissenschaftlichen Institutionen angeschafft werden. Heute zieren ihre Nachfolger unsere Wohnräume, oder wir tragen sie am Handgelenk.

Die ersten Magnetbandgeräte für Reportagen wurden von zwei Mann mit Rückentragen an Ort und Stelle gebracht. Heute finden Kassettenrekorder in der Handtasche Platz.

Die ersten elektronischen Rechenautomaten beanspruchten ganze Säle. Ein moderner elektronischer Taschenrechner leistet dasselbe und überdies schneller.

Dies alles und viel mehr verdanken wir der Mikroelektronik. Es dürfte gegenwärtig nur wenige technische Begriffe geben, die so oft genannt, gedruckt, gelesen und diskutiert werden.

Elektronik hatte anfangs nur einfache Aufgaben zu erfüllen; entsprechend bescheiden waren die Geräte. Zwei oder drei Spulen, zwei Kondensatoren, ein Widerstand, eine Röhre sowie einige Steckbuchsen stellten das ganze Material für einen Empfänger dar, der, mit Antenne, Kopfhörer und Batterien verbunden, immerhin einige Sender «brachte».

Das änderte sich rasch. Radios, Funkgeräte wurden leistungsfähiger, leichter bedienbar und damit notwendigerweise komplizierter im Aufbau. Noch vor dem zweiten Weltkrieg war die Zahl der Bauelemente in Rundfunkempfängern auf über 100, in den ersten Fernsehempfängern auf 200 bis 300 gestiegen. Mit ähnlichem Aufwand warteten elektronische Geräte in Industrie und Forschung auf.

Techniker beobachteten diese Tendenz nicht ohne Sorge. Einige Bedenken sollen erwähnt sein:

Masse sowie Raumbedarf der Geräte wuchsen und überschritten schließlich «vernünftige», vertretbare Dimensionen. Tausende Elektronenröhren in Elektronenrechnern konnten nur eine Übergangslösung sein; es war unmöglich, ein Fahrzeug, ein Flugzeug, gar eine Rakete so voll Elektronik zu stopfen, daß für die Nutzlast kaum Platz und Antriebskraft übrigblieben.

Ein erheblicher Teil der von elektronischen Geräten aufgenommenen Energie wird unvermeidbar und unnützerweise in Wärme verwandelt. Sie abzuführen, eine Überhitzung der Bauelemente und Anlagen zu vermeiden, wurde mit wachsendem Energiebedarf immer schwieriger (die durchbrochene Rückwand sowie der große «tote» Raum älterer Rundfunkempfänger haben darin ihre Ursache).

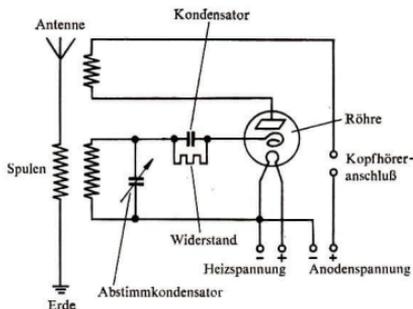
Kein elektronisches Bauelement funktioniert ewig. Früher oder später fällt es aus – und damit meist auch das Gerät, in das es eingebaut wurde. Das war

um so öfter der Fall, je mehr Bauelemente in einem System zusammenwirkten. Abhilfe konnte nur eine entscheidende Erhöhung von Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Bauelemente schaffen – denn was würden Anlagen nützen, deren Ausfallzeiten die Betriebszeiten überträfen?

Je mehr Bauelemente in einem Gerät, desto mehr Verbindungsleitungen zwischen ihnen, desto mehr Anschlußstellen an ihnen. Jede Verbindung, jeder Anschluß wurde von Hand gelötet. Damit taten sich neue Fehlerquellen auf. Zwar wurden die Verbindungsleitungen farbig gekennzeichnet, oder man arbeitete mit vorgefertigten «Kabelbäumen»; doch blieben Schaltfehler nicht aus. Sie wurden zwar spätestens bei der Prüfung des Gerätes entdeckt, bedeuteten aber in jedem Falle einen Produktionsverzögerung. Schlimmer noch waren mangelhafte Lötstellen. Sie machten sich häufig erst nach längerer Betriebszeit oder sogar nur zeitweise bemerkbar. Jedoch völlig auszuschließen waren sie bei Handfertigung nicht.

Überhaupt konnte Handfertigung, obwohl schon vor 40 Jahren in kleine Schritte an Fließbändern geteilt, auf die Dauer weder dem steigenden Bedarf an elektronischen Ausrüstungen noch den Forderungen nach hoher Produktivität genügen. Wenigstens eine teilweise Automatisierung der Arbeitsprozesse wurde immer dringender, stieß jedoch wegen des Gewirrs der in drei Dimensionen verlaufenden Leitungen, wegen der unübersichtlichen Palette von Bauelementen unterschiedlicher elektrischer Parameter und geometrischer Abmessungen sowie schließlich wegen umfangreicher mechanischer Kleinarbeiten wie Nieten, Schrauben, Biegen usw. zunächst auf unüberbrückbare Schwierigkeiten.

Verkleinerung, geringerer Energiebedarf, höhere Zuverlässigkeit, automatisierte Fertigung: Das Arbeitsprogramm, das vor Forschung und Entwicklung lag, war mehr als umfangreich. Als man seine Verwirklichung in Angriff nahm, ahnten wohl die wenigsten, daß man am Anfang eines Weges stand, der unter dem Namen Mikroelektronik jedermann bekannt ist und zu einem Kernstück unserer wissenschaftlich-technischen Entwicklung wurde.



*Einfache Empfängerschaltung vom Beginn der 20er Jahre (Bauelemente in damals üblichen Symbolen dargestellt)*

## Gedruckte Schaltungen

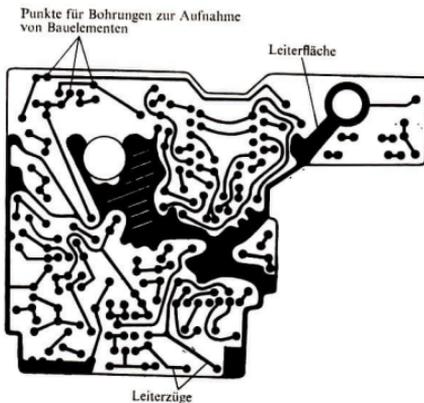
Man begann mit dem besonders heiklen Problem der Verdrahtung der Verbindungen zwischen den Bauelementen. Die Lösung, für die man sich entschied, stellte keine bloße Verbesserung herkömmlicher Technologie, sondern eine neue Qualität dar:

Die dreidimensionale Verdrahtung mit ihren vielfach gebogenen Leitungen wird aufgegeben. Die gesamte Leitungsführung wird in eine Ebene verlegt und vor dem Einsetzen der Bauelemente in wenigen parallel verlaufenden und nicht in vielen zeitlich aufeinanderfolgenden Schritten hergestellt.

Ergebnis dieser Neuorientierung ist die seit Jahrzehnten in allen Bereichen der Elektronik eingeführte «gedruckte Schaltung». Sie ist von Geräten der Heimelektronik bekannt: Eine Platte aus Isoliermaterial trägt ein auf den ersten Blick verwirrendes Muster von metallisch schimmernden Linienzügen und Flächen. Sie ersetzen die einstigen Schaltdrähte. An zahlreichen Stellen dieser Leiterzüge fallen kleine Höcker aus Lötzinn auf. Sie verdecken Bohrungen, durch die von der Rückseite der Platte die Anschlußfahnen oder -drähte der dort angebrachten Bauelemente an die Leiterzüge geführt werden.

Doch kurz noch etwas zum Entstehen einer gedruckten Schaltung: Das Leitungsmuster wird entworfen und mit ätzfester Farbe auf die mit Kupferfolie kaschierte Isolierplatte gedruckt. Anschließend wird das unbedruckte Kupfer weggeätzt, die Leiterzüge bleiben stehen und liegen nach Entfernen der Druckfarbe frei (auch der umgekehrte Weg – Bedrucken der unkaschierten Folie mit Bahnen aus leitender Substanz – ist möglich). Stündlich entstehen Tausende Leiterplatten, die sich wie ein Ei dem anderen gleichen. Verdrahtungsfehler sind ausgeschlossen. Nachdem Löcher für die Bauelementeanschlüsse gebohrt wurden, wird die Platte von der Rückseite her bestückt. Die durch die Platte führenden Anschlußenden werden nun in einem Tauchlötverfahren sämtlich in nur einem Arbeitsgang mit den Leiterzügen verbunden.

Viel wurde getan, um gedruckte Schaltungen pro-

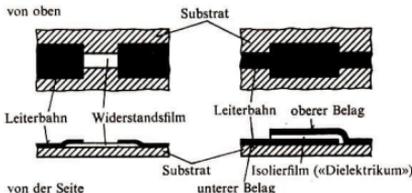


*Nur scheinbar ein Gewirr: bedruckte Leiterplatte vor dem Bohren und Bestücken*

duktiver herstellen zu können sowie um ihre Einsatzbreite zu erhöhen. So sind die Lochabstände ganzzahlige Vielfache genormter Grundmaße, die zugleich für die Entfernungen zwischen den Anschlüssen der Bauelemente gelten. Man muß diese Anschlüsse vor dem Einführen in die Löcher nicht erst umständlich zurechtbiegen, Handarbeit kann weitgehend entfallen. Bestückungsmaschinen entnehmen die Bauelemente Magazinen oder Gurten und setzen sie nach vorgegebenem Programm ein. Es gibt beidseitig bedruckte Leiterplatten, waffelförmlich übereinanderliegende Mehrebenenplatten und sogar gedruckte Schaltungen, die sich nach Fertigstellung zur Raumersparnis zusammenrollen lassen.

Parallel dazu wurden die Bauelemente systematisch verkleinert, Verbindungstechniken für das einfache sowie zuverlässige Zusammenschalten mehrerer gedruckter Schaltungen entwickelt usw. Die Aufteilung der Geräte in einzelne Bausteine, jeweils als gedruckte Schaltung ausgeführt, machte Fortschritte und verkürzte Ausfallzeiten. Bei einer Störung wurde zunächst die schadhafte gegen eine einwandfreie Baugruppe ausgewechselt, das Gerät war rasch wieder einsatzfähig, während die eigentliche Reparatur in einer mit allen Hilfsmitteln ausgerüsteten Werkstatt erfolgte.

Raumfahrt, Militärtechnik und vor allem die elektronische Datenverarbeitung vervielfältigten die Anforderungen an elektronische Geräte und Bauelemente. Immer umfangreichere Aufgabenstellungen hatten Anlagenkonzeptionen zur Folge, zu deren Ausführung Zehntausende, mitunter Hunderttausende Bauelemente nötig gewesen wären. Hier waren auch gedruckte Schaltungen mit ihren Einzelbauelementen überfordert.



Bei Dünnfilmschaltkreisen werden die Bauelemente auf dem Substrat erzeugt (links ein Widerstand, rechts ein Kondensator)

## Schaltungen auf Glasplättchen

Der nächste große, für die Entwicklung der Mikroelektronik wichtigste Schritt führte zur integrierten Schaltung, zum integrierten Schaltkreis.

Nicht nur Leiterzüge, sondern auch Bauelemente

werden in einer Folge von Arbeitsschritten auf oder in geeignetem Trägermaterial, «Substrat» genannt, «erzeugt». Gewissermaßen aus einem Guß entstehen elektronische Schaltungen und Bausteine (oder mindestens wesentliche Teile davon) – so Verstärkerstufen, Speicherelemente, logische Schaltungen für Rechner usw. Die meisten der noch bei gedruckten Schaltungen vorhandenen Lötstellen fallen weg, die Abmessungen schrumpfen weiter. Zu reparieren freilich ist eine integrierte Schaltung nicht, keines ihrer Bauelemente ist auswechselbar. Bei einem Defekt muß die ganze integrierte Schaltung ausgetauscht werden.

Auf den ersten Blick könnte das nach Vergeudung aussehen, zumal hohe Entwicklungskosten anfallen und teure Produktionseinrichtungen installiert werden müssen, bevor der erste integrierte Schaltkreis «arbeitet». In der Tat rechtfertigt nur die Produktion gleicher Schaltkreise in hoher Stückzahl diesen Aufwand.

Diese Vorbedingung wird von der Elektronik weitgehend erfüllt. Selbst in umfangreichsten elektronischen Geräten und Anlagen begegnen uns nur relativ wenige grundsätzlich verschiedene Bausteine – diese aber oft in vielfacher Wiederholung. Sie verstärken, erzeugen Impulse, richten Wechselspannungen gleich, verknüpfen Signale usw. Die Kombination dieser Grundschaltungen ergibt die zahllosen Möglichkeiten der Elektronik, ähnlich wie sich aus den Lochbändern, Achsen, Rädern und Winkeln eines Metallbaukastens verschiedenartigste Modelle zusammenstellen lassen.

Vor allem solche Grundschaltungen werden als integrierte Schaltkreise angeboten. Sie sind in ihren Parametern so aufeinander abgestimmt, daß sie leicht kombiniert werden können und sich gewissermaßen nahtlos aneinanderfügen lassen. In zahlreichen Industrieländern werden seit Jahren integrierte Schaltkreise in Form kompletter Bausteinsysteme produziert. Technologien der gedruckten Schaltungen und der Halbleiterbauelemente standen bei den beiden bedeutendsten Richtungen der Mikroelektronik Pate. Es sind die Film- und die Festkörperschaltkreise.

Filmschaltkreise werden stets auf isolierenden Trägerplättchen – meistens Glas oder Keramik – angeordnet. Die Plättchen sind 1 mm oder weniger dick; ihre Größe richtet sich nach der unterzubringenden Schaltung und liegt zwischen Bruchteilen eines bis zu mehreren Quadratzentimetern. Diesem Substrat werden die Bauelemente und Verbindungsleitungen als dünne Schichten, als Filme verschiedener Form und aus verschiedenem Material aufgebracht («Dicke» bei der von uns vorgestellten Variante «Dünnschichttechnik» < 1 µm).

Die Bauelemente sehen den früher üblichen kaum noch ähnlich. Ein Widerstand z. B. ist nur ein mehr oder weniger breiter und langer «Strich» oder eine mäanderförmige Linie aus Material hohen spezifischen Widerstandes. Ein Kondensator wird erhalten, indem ein Leiterzug am Ende flächenhaft erweitert, mit einem isolierenden Film überdeckt und mit einem darüberliegenden zweiten Belag versehen wird. 10 bis 100 Bauelemente sind bei Anwendung der Dünnschichttechnik auf einem Quadratzentimeter unterzubringen! Selbst mit der besten Lupe sind nur noch schwer Einzelheiten zu erkennen. Daß man bei solchen «Größen»ordnungen nicht mehr mit einfachen Druckverfahren zum Ziel kommt, versteht sich von selbst. Dazu bedarf es subtilerer und präziserer Methoden.

## Filme, Dämpfe, Masken

Beginnen wir mit den Filmen. Sie werden sehr häufig durch Aufdampfen des entsprechenden Materials erzeugt. Das Prinzip ähnelt dem Beschlagen kühler Flächen – z. B. von Fensterscheiben –, auf denen Wasserdampf in winzigen Tröpfchen kondensiert. «Fensterscheibe» ist das zu bedampfende Substrat, Dampfquelle ein elektrisch erhitzter, kleiner Tiegel mit Bedampfungsmaterial. Beide sind, etwa 20 cm voneinander entfernt, im nahezu luftleer gepumpten Raum untergebracht. Auf dem Substrat schlägt sich je nach Bedampfungsdauer ein mehr oder weniger dünner Film nieder. Durch geeignete Maßnahmen wird erreicht, daß er fest haftet.

Nachteilig ist unter anderem, daß auch Tiegelmaterial mitgerissen und in den Film eingelagert werden kann. Der Elektronenstrahl bietet eine bessere Lösung: Draht- oder stabförmiges Verdampfungsmaterial wird an der Stirnfläche im Brennfleck eines Elektronenstrahls sehr rasch aufgeheizt und verdampft. Es kann kontinuierlich nachgeschoben werden, ein Tiegel entfällt.

Für das Herausarbeiten der Bauelemente und Leiterzüge haben Maskenverfahren größte Bedeutung erlangt, z. B. das Aufdampfen über Wechselmasken, eine Erweiterung der beschriebenen Methode zur Filmherstellung.

Die Dampfteilchen fliegen fast geradlinig zum Substrat. Ein Hindernis auf ihrem Wege ruft dort einen von kondensierten Dampfteilchen freien «Schatten» hervor. Das nutzt man aus. Möglichst dicht vor dem Substrat wird eine Schablone, eine Maske (z. B. ein Edeltahlblech) angebracht, die erwünschte Konturen als Durchbrüche enthält. Nur unter diesen Durchbrüchen bildet sich der Film.

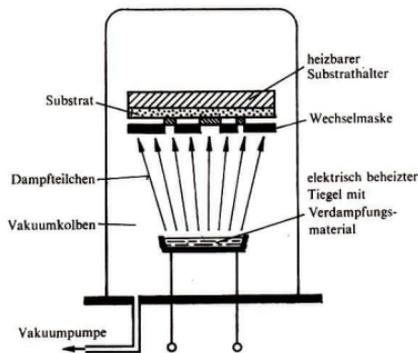
Nach Maskenwechsel und mit anderem Verdampfungsmaterial wird der Vorgang wiederholt, bis nach mehreren aufeinanderfolgenden Bedampfungs-schritten sämtliche Komponenten der Dünnschicht aufgedampft sind.

Für jeden Schaltkreis ist also ein Satz aus mehreren Masken nötig. Sie können immer wieder verwendet werden, außerdem enthalten sie die Durchbrüche für zahlreiche gleichzeitig entstehende Schaltkreise. Automatisch arbeitende Anlagen, bei denen Substrate im Durchlaufverfahren bedampft werden, erreichen Stundenleistungen von mehreren Tausend Schaltkreisen.

Die Technologie der Haftmasken und das Ausfräsen der Schaltkreiselemente mit einem programmgesteuerten Elektronenstrahl werden ebenfalls in der Dünnschichttechnologie benutzt.

Die Schaltkreise werden luft- und feuchtigkeitsdicht verpackt. Die herausgeführten Anschlüsse sind so angeordnet, daß sie sich in das Lochraster von Leiterplatten einfügen lassen.

Leiter sind nicht sämtliche Bauelemente in Filmtechnik herstellbar. Am besten schneiden Wider-



*Bedampfung eines Substrats über Wechselmasken*

stände ab, denn nahezu alle benötigten Werte sind in Filmtechnik erzeugbar. Bei Kondensatoren ist der verfügbare Wertevorrat zu höheren Kapazitäten erheblich eingeschränkt. Die Kapazität wächst mit der Größe der Kondensatorbeläge. Weder aber kann man die Flächen beliebig vergrößern, noch lassen sich kleinere Leiterflächen im Wechsel mit Isolierfilmen vielfach « stapeln ». Noch enger sind die Grenzen bei Spulen gezogen. Nur in wenigen Ausnahmefällen lassen sie sich als spiralförmige Leiterbahnen darstellen.

Vor allem aber fehlt ein produktionsreifes Verfahren, Dioden und Transistoren in Filmtechnik herzustellen. Es bleibt nichts übrig, als sie dem Schaltkreis nachträglich zuzusetzen. Genauso verfährt man mit anderen, nicht erzeugbaren Bauelementen, sofern sie sich nicht durch eine geschickte Schaltungskonzeption umgehen lassen. Das Ergebnis sind sogenannte Hybridschaltkreise, die in einem Gehäuse den Schaltkreis und die diesem hinzugefügten Transistoren, z. B. eines Verstärkers, enthalten.

## Schaltungen in Halbleiterplättchen

Die zweite Hauptrichtung der integrierten Schaltungen geht nun gerade von bewährten Technologien der Dioden- und der Transistorproduktion aus.

Um 1960 wurde die sogenannte Planartechnologie entwickelt. Sie hat es ermöglicht, Hunderte Dioden und Transistorsysteme hoher Qualität gleichzeitig in einer Siliziumscheibe zu produzieren. Die Festkörperschaltkreise wurden geboren, als man Verfahren der Planartechnik auch zum Herstellen anderer Bauelemente und ganzer Schaltkreise anwandte.

Entscheidende Merkmale dieser Technologie sind:

- Es gibt kein Substrat aus Isoliermaterial. An seine Stelle tritt das gleiche Material, aus dem Dioden und Transistoren hergestellt werden: ein Siliziumscheibchen, etwa 0,1 mm dick und, je nach der

Bauelementezahl, mit einem Durchmesser zwischen etwa einem und mehreren Millimetern.

- Die Bauelemente befinden sich nicht *auf* dem, sondern *im* Plättchen. Sie werden von der Oberfläche aus in das Halbleitermaterial eingearbeitet.

Ehe näher darauf eingegangen wird, sollen einige Grundtatsachen der Halbleitertechnik ins Gedächtnis zurückgerufen werden:

- Die Leitfähigkeit von Halbleitermaterial läßt sich durch Zusatz von Fremdatomen, durch « Dotieren », gezielt zwischen « Fast-Isolator » und « Fast-Leiter » einstellen.
- Zwei verschiedene Leitungstypen sind möglich und werden angewendet: n-leitendes Halbleitermaterial mit « Elektronenüberschuß » und p-leitendes Halbleitermaterial mit « Elektronenmangel ».
- Leitfähigkeit und Leitungstypus sind nicht nur im ganzen Volumen, sondern auch in örtlich begrenzten Bezirken des Halbleitermaterials beeinflussbar.

Der geschickten Nutzung dieser Tatsachen verdanken wir die Festkörperschaltkreise. Sie sind letztlich nichts anderes als zweckmäßige Kombinationen von Bereichen unterschiedlicher Leitfähigkeit und unterschiedlichem Leitungstypus in winzigen Siliziumkristallen.

Nehmen wir als Beispiel die Herstellung eines Widerstandes. Wir könnten ihn allgemein etwa so charakterisieren: Die elektrische Leitfähigkeit eines Widerstandes ist viel geringer als die eines Leiters und viel höher als die seiner (im Idealfall isolierenden) Umgebung. Im Halbleitermaterial ist also ein Gebiet bestimmter geometrischer Abmessungen so zu beeinflussen, daß die Leitfähigkeit sich im gewünschten Sinne von der Umgebung unterscheidet und den verlangten Widerstandswert ergibt.

Auf der Siliziumoberfläche wird zunächst bei hoher Temperatur und unter Sauerstoffeinwirkung eine Schicht aus Siliziumdioxid erzeugt.

Diese verbreitetste Verbindung der Erdkruste ist äußerst widerstandsfähig und schützt das Silizium sicher gegen Schmutz, Feuchte und chemische Einflüsse.

Zugleich bildet die Schicht die Grundfläche für eine aufzubringende Fotolackschicht. Diese wird durch eine optische Maske mit der Struktur des künftigen Widerstandes belichtet, einem Entwicklungsprozeß unterworfen und trägt danach eine Lackhaftmaske mit einem Fenster in Widerstandsform. Das Siliziumdioxid im Fenster wird herausgeätzt, die Oberfläche des Widerstandes liegt frei. Die Lackhaftmaske wurde zur «Diffusionsmaske».

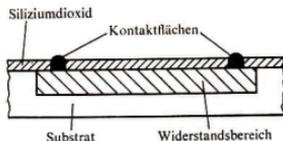
Ihr Name deutet den nächsten wichtigen Schritt an: die Veränderung der Leitfähigkeit durch Diffusion. Die Diffusionstechnologie wurde ursprünglich für die Produktion von Dioden und Transistoren entwickelt und zu hoher technischer Reife gebracht.

Man läßt z. B. Bordämpfe über das Widerstandsfenster streichen. Dabei dringen Boratome in das Silizium ein, sie «diffundieren». Eindringtiefe und Konzentration der Boratome im Silizium, und damit die Leitfähigkeit, lassen sich durch geeignete Prozeßführung steuern. Wird das Fenster erneut durch eine Siliziumdioxidschicht verschlossen, liegt der Widerstandsbereich geschützt im Grundmaterial.

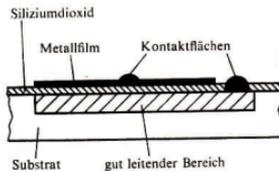
In einem weiteren Belichtungs-Ätz-Durchlauf werden kleine Fenster für die Anschlußstellen eingebracht und metallisiert, um mit den später auf die Siliziumdioxidschicht gedampften Leiterbahnen (z. B. Gold- oder Aluminiumfilme) verbunden zu werden.

Für einen Kondensator wird zunächst ein gut leitender Belag eindiffundiert und mit einer gleichzeitig als Dielektrikum wirkenden Siliziumdioxidschicht abgedeckt. Der zweite Belag wird als Metallfilm auf das Siliziumdioxid gedampft. Allerdings werden Schaltungskonzeptionen bevorzugt, die ohne Kondensatoren auskommen (oder sie durch Diodenanordnungen ersetzen). Kondensatoren brauchen zuviel Platz, werden doch für gängige Kapazitätswerte «Riesenflächen» bis zu  $1 \text{ mm}^2$  belegt, auf denen sich ohne Schwierigkeiten mehrere zehn Transistoren und ebensoviele Widerstände anordnen ließen.

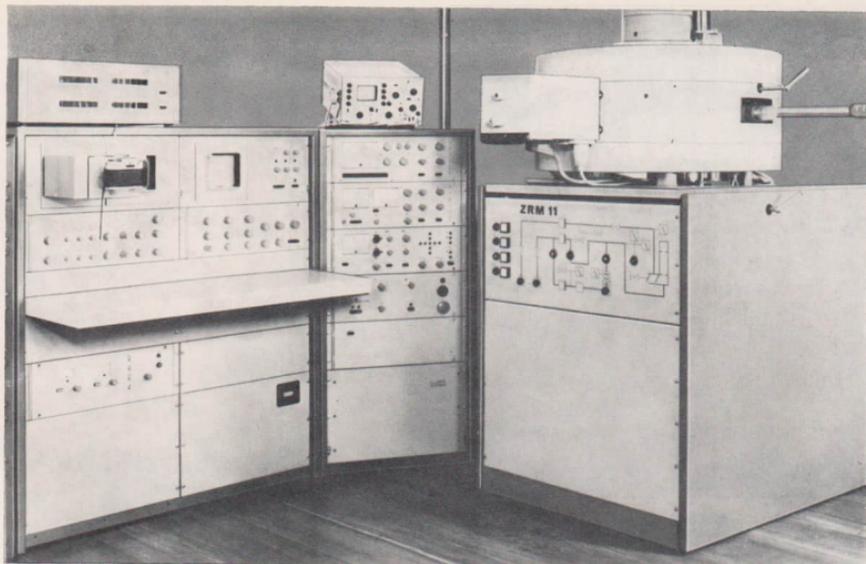
Dioden und Transistoren sind trotz mehrerer Diffusionsdurchläufe für die Festkörperschaltkreise kein Problem – schließlich gingen diese ja aus Verfahren der Transistorfertigung hervor.



*Widerstand in einem Festkörperschaltkreis (Schnitt)*



*Kondensator in einem Festkörperschaltkreis (Schnitt)*



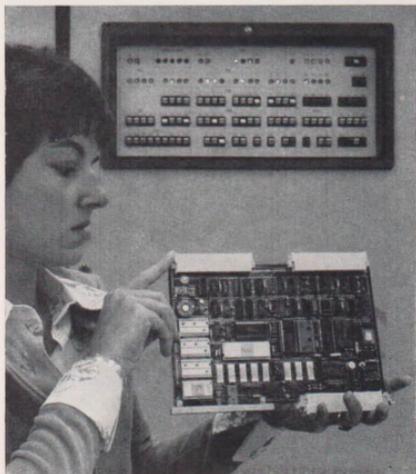
*Elektronensonde als Hilfsmittel und Werkzeug:  
Ein Elektronenstrahl-Meß-, Kontroll- und  
Belichtungsgerät aus dem VEB Carl Zeiss Jena*



*Herstellen von Lackhaftmasken – eine Grundlage  
mikroelektronischer Technologien. Diese Anlage  
justiert und belichtet nach vorgegebenem Programm  
vollautomatisch Substratscheiben für mikroelektro-  
nische Schaltkreise*



*Elektronischer Helfer und Retter für tausende Menschen: der Herzschrittmacher*



*Wenige integrierte Schaltkreise statt «Drahtgewirr»: das «Bild» der modernen Elektronik*

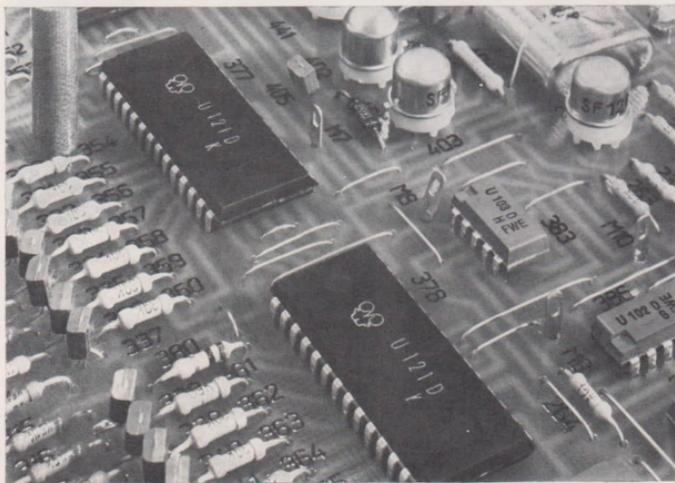


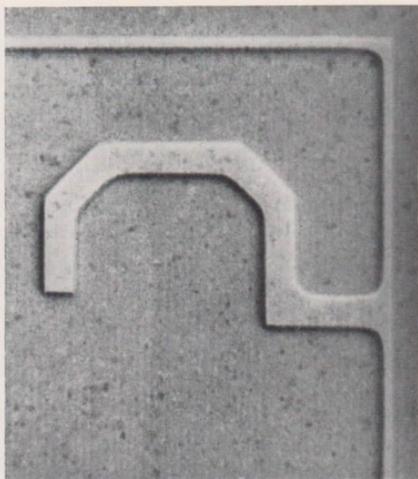
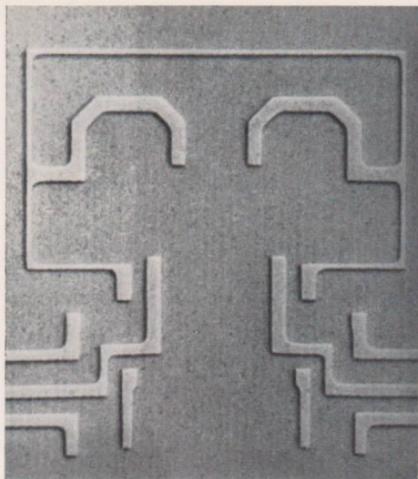
*«Operationssaal-Atmosphäre»: Endfertigung von Halbleiterbauelementen im VEB Funkwerk Erfurt*



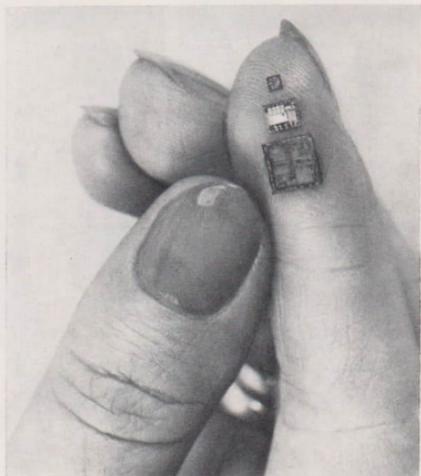
*Extrem miniaturisierte Farbfernsehkameras könnte man als Päckchen verschicken*

*Transistoren und Schaltkreise prägen das Bild moderner Elektronik (Elektronikplatte des Multi-meter G - 1001, 500)*



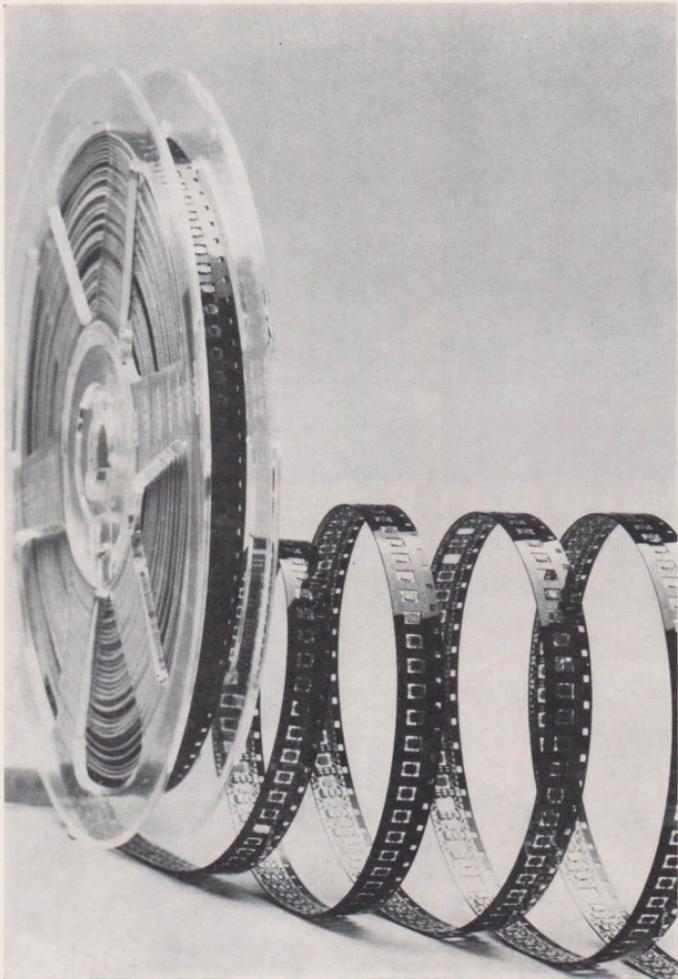


*Detail eines mikroelektronischen Schaltkreises  
links: Ausschnitt in 1700facher Vergrößerung  
rechts: 4600fache Vergrößerung*



*Klein – kleiner – am kleinsten: mikroelektronische  
Schaltkreise und ihre Dimensionen*

*Magazin für  
Mikroelektronik-  
Schaltungen:  
die Fenster-  
öffnungen eines  
Super-8-Films*

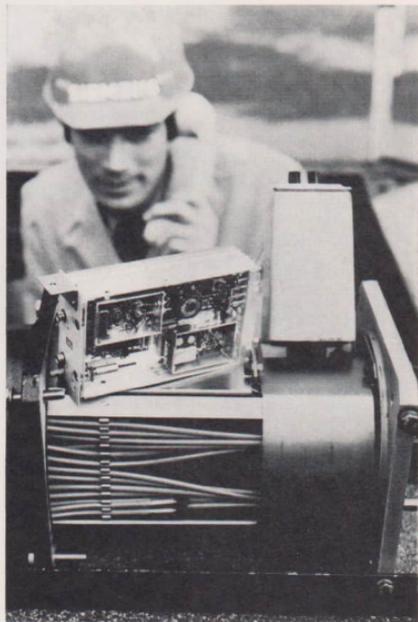




*UKW-Sprechfunkgerät für Nahverbindungen im Seefunkverkehr; seine Bedienung ist so einfach wie die eines Fernsprechers*

*Seit Jahrzehnten demonstriert, seit Jahrzehnten umstritten: das Bildtelefon (unten links)*

*Heute noch Versuchsausführung – morgen vielleicht technische Selbstverständlichkeit: Repeater für ein unterirdisch verlegtes Nachrichtensystem auf der Grundlage von Glasfasern*





*Infrarotstrahlung  
ersetzt das An-  
schlußkabel dieses  
«schmutzlosen»  
Fernsprechhörers*

Eine andere Frage ist schwieriger zu lösen. Die Bauelemente eines Festkörperschaltkreises sind nicht, wie die eines Filmschaltkreises, von vornherein gegeneinander isoliert. Man kann zwar die Leitfähigkeit des Siliziums gering halten, als Isolator zwischen den Bauelementen genügt das aber nicht. Ohne zusätzliche Maßnahmen stünden alle Teile eines Festkörperschaltkreises miteinander in vielfältiger und unkontrollierter Verbindung.

Nur das Prinzip der Isolierung sei hier angedeutet: Man versenkt die Bauelemente in Isolierwannen. Das sind winzige «Inseln», zwischen denen kein Strom fließen kann, die also gegeneinander isoliert sind. Sie entstehen gleichzeitig mit den Bauelementen bei der Schaltkreisproduktion. Diese Isolierung kann durch Trennwände aus Siliziumdioxid geschehen, aber auch mit Hilfe sogenannter Sperrschichten, die den Stromdurchgang in einer Richtung (wie eine Diode) unterbinden.

## Mikroelektronik ist Elektronik auf neue Art

Nach dem Lesen der vorangegangenen Absätze und nach dem Betrachten der Bilder besteht kein Zweifel, daß die Produktion von Festkörperschaltkreisen keine einfach zu lösende Aufgabe ist. Aber mancher wird sich doch fragen, ob die ständig gleichen wiederkehrenden oder einander doch ähnlichen Prozessschritte es rechtfertigen, daß die ersten Festkörperschaltkreise im wahrsten Sinne des Wortes mit Gold aufgewogen wurden (inzwischen sank ihr Preis auf ein Tausendstel davon und darunter).

Man sollte, um Fehleinschätzungen zu vermeiden und die technologische Leistung voll würdigen zu können, bei Abbildungen von integrierten Schaltungen vor allem die häufig mit eingetragenen Maße oder Größenvergleiche beachten. Schaltkreise werden stets stark vergrößert abgebildet, denn sonst wären Einzelheiten nicht zu erkennen. Transistorsysteme erreichen im Original längst nicht die Größe

eines Stecknadelkopfes, Widerstände sind nicht breiter und nur wenig länger, die unter dem Mikroskop als Streifen erscheinenden Leiterbahnen nur Hundertstel eines Millimeters breit.

Abweichungen in den Abmessungen der Bauelemente oder im Abstand von Leiterbahnen um nur 1 µm, für die «alte, große Elektronik» unproblematisch, entscheiden über die Funktionsfähigkeit eines Festkörperschaltkreises. Mit eben dieser Genauigkeit müssen sich die aufeinanderfolgenden Masken decken.

Golddrähte von häufig nicht einmal 0,01 mm Dicke verbinden die Anschlußstellen am Schaltkreis mit den äußeren Anschlüssen, mit deren Hilfe der verkappte Schaltkreis z. B. in eine Leiterplatte eingesetzt wird. Weder Draht noch Schaltkreis tragen normale Löt- und Schweißverfahren, Sondermethoden – wie das Ultraschallschweißen und die Thermokompression –, mußten entsprechend modifiziert werden, um in der Schaltkreistechnologie eingesetzt werden zu können.

Auf der anderen Seite sind gerade diese Minimaße eine Voraussetzung dafür, daß gleichzeitig Hunderte und Tausende Schaltkreise hergestellt werden können. Die Technologie der Festkörperschaltkreise ist eine Technologie großer und größter Stückzahlen.

Techniker und Konstrukteure mußten in vielerlei Hinsicht umlernen und umdenken, war es doch keineswegs damit getan, die millionenfach bewährten Schaltungen der «klassischen» Elektronik durch bloße Verkleinerung in Festkörpertechnik zu übersetzen. Ihr Bauelementespektrum ist schmaler, sowohl was die Zahl der unterschiedlichen Bauelemente als auch ihre elektrischen Parameter anbelangt.

Auch die Proportionen zwischen «passiven» Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren) und «aktiven» Bauelementen (Röhren, Transistoren) haben sich verschoben. In der klassischen Elektronik waren Röhren (ähnliches galt für die Transistoren der Anfangszeit) teure und empfindliche Bauelemente. Man versuchte, mit möglichst wenigen auszukommen – ein Aspekt, der sich in den Schaltungsentwürfen niederschlug. Für Festkörperschaltkreise

gilt das nicht mehr. Hier kann man mit den «aktiven» Transistoren großzügig umgehen, während z. B. die «passiven» Kondensatoren erhebliche Schwierigkeiten bereiten.

Abmessungen und Technologie der Festkörperschaltkreise bringen es mit sich, daß man den Bauelementen größere Toleranzen zugestehen muß als denen der klassischen Elektronik. Selbstverständlich muß diese Toleranzbreite bereits in den Schaltungsentwürfen berücksichtigt werden. Aus diesem Grunde sind auch die durch die elektronische Datenverarbeitung berühmt gewordenen «binären» Signale für das Verarbeiten mit Festkörperschaltkreisen gut geeignet. Bei ihnen müssen die Schaltungsanordnungen nur zwei deutlich auseinanderliegende Signalwerte (z. B. Spannung vorhanden – Spannung nicht vorhanden) unterscheiden können, und es läßt sich erreichen, daß bis zu einer gewissen Grenze Toleranzen nicht funktionsbeeinträchtigend wirken.

Auch die Festkörperschaltkreise fingen «bescheiden» an. Auf einem Plättchen, einem «Chip», entstand eine Funktionsgruppe, etwa eine Verstärkerstufe oder die durch die elektronische Datenverarbeitung berühmt gewordene «Flip-Flop-Schaltung», die sich ein binäres Signal «merken» kann und Elementarbestandteil zahlreicher Signalspeicher ist. Für umfangreichere Schaltungen wurden mehrere Chips miteinander verbunden und oft gemeinsam verkappt. Diese Methode befriedigte nicht sonderlich, denn sie war umständlich, durch die notwendigen Zwischenverbindungen konnte es zu Zuverlässigkeitsverlusten kommen, der Raumbedarf stieg wieder an.

Es wurde ein anderer Weg beschritten. Je besser man die Technologie der Festkörperschaltkreise beherrschte, desto mehr Bauelemente ordnete man auf einem Siliziumplättchen an: komplette mehrstufige Verstärker, die zudem so ausgelegt waren, daß sie in der Nachrichtentechnik, in Meßgeräten sowie für die elektronische Datenverarbeitung eingesetzt werden konnten, Verschlüsselungsschaltungen, die etwa Ziffern des dekadischen Systems in binäre Signale verwandelten und umgekehrt, Steuerungsschaltungen für elektronische Ziffernanzeigen u. v. a.

Diese Entwicklung setzte sich konsequent fort; heute wird mit «Großschaltkreisen» gearbeitet, die auf einer Fläche von z. B. 5 mm × 5 mm um 150000 Bauelemente mit allen zugehörigen Verbindungen enthalten. Der Mikroprozessor, jüngstes «Wunderkind» der Mikroelektronik, erweist, wie rasch die Entwicklung auch auf diesem Gebiet voranschreitet.

# Zwischen Bildtelefon und Glasfaserübertragung

Altes, ewig junges Telefon 83  
Eine Leitung – zahlreiche Nachrichten 85  
Koaxialkabel und Hohlleiter 86  
«Gläserne Kabel» 88  
Nachrichten, portionsweise übermittelt 89  
Wellenbündel statt Kabel 90  
«Klassische» Nachrichtenverbindungen –  
modernisiert 92

## Altes, ewig junges Telefon

Seit knapp 150 Jahren gibt es elektrische Telegrafie, seit 100 Jahren den Fernsprecher. Vor 85 Jahren begannen beide, ohne Leitungsdrähte auszukommen.

Seitdem hat sich die elektrische Nachrichtentechnik in atemberaubendem Tempo entwickelt und im Bereich der Kommunikation Zeiten sowie Entfernungen schrumpfen lassen. Niemand bezweifelt, daß sich diese Entwicklung fortsetzen wird, ja fortsetzen muß. Das Kommunikationsbedürfnis wächst ständig. Die Nachrichtentechnik schafft Voraussetzungen, es zu befriedigen. Sie löst diese Aufgabe, indem sie bekannte Wege verbreitert, gangbarer und sicherer macht, indem sie neue Wege erkundet und erschließt. Wie aber wird dies geschehen? Welche Entwicklungstendenzen zeichnen sich ab?

Als Beispiel soll der Fernsprecher dienen. In 400 Millionen Exemplaren (mit einer Verdopplungsrate von etwa 10 Jahren) tat er Anfang der siebziger Jahre überall auf der Welt seine Pflicht als eines der vielen kleinen, technischen Wunder – denn ist es nicht im Grunde wunderbar, daß wir, ohne einen Schritt vor die Tür zu tun, mit Partnern sprechen können, gleich, ob sie zwei Straßenzüge entfernt oder in einem anderen Kontinent wohnen? Was zählen demgegenüber schon die Minuten, die wir manchmal auf eine Verbindung warten müssen?

Jahrzehntlang war die Fernsprechtechnik das große Bewährungsfeld elektromagnetischer Bauelemente, von Relais in vielen Varianten, Wählern usw. Erst in jüngster Zeit beginnt sich das zu ändern. Zunehmend bestimmt Elektronik das Bild der Fernsprechtechnik. Sie vervielfacht ihre Leistungen und Möglichkeiten. Fachleute entwerfen etwa folgendes Zukunftsbild für den Fernsprecher:

Er wird laut und deutlich sprechen; denn seine Sprechmuschel enthält dann nicht nur ein hochwertiges Mikrofon, sondern auch einen winzigen Verstärker.

Die Nummernscheibe wird durch Zifferntasten abgelöst. Die gewählte Nummer erscheint zur Kontrolle in einem Anzeigefeld. Ist sie besetzt, «merkt» sie sich der Fernsprecher, bei einem neuen Anrufversuch braucht nur noch *eine* Taste gedrückt zu werden. Häufig benötigte, lange Rufnummern werden dem Fernsprecher nur einmal eingegeben. Er behält sie «im Gedächtnis» und verbindet selbsttätig, sobald eine ein- oder zweistellige Kurzrufnummer gewählt wird, mit dem gewünschten Teilnehmer.

Führt dieser gerade ein Gespräch, erfährt er durch einen kurzen Summtön oder ein Flackerzeichen, daß ein weiterer Anrufer wartet, er kann sein Gespräch rasch beenden. Sobald der Teilnehmer frei ist, ertönt ein Signal, oder die Verbindung wird unmittelbar hergestellt.

Selbstverständlich läßt sich dieser zukünftige Fernsprecher auch auf den Auftragsdienst umschalten oder auf die Rufnummer der Dienststelle oder der Freunde.

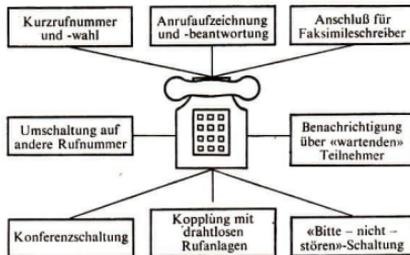
Will ein Teilnehmer nicht durch unwichtige Anrufe gestört werden, schaltet er seinen Apparat auf «Pause». Der Apparat bleibt stumm, ein etwaiger Anrufer erhält ein «Bitte-nicht-stören-Signal» und legt auf. Ist sein Anruf jedoch dringend, behält er den Hörer in der Hand. Nach 10 oder 20 s wird die Pause aufgehoben, das Gespräch erreicht den Teilnehmer.

Von zahlreichen Anschlüssen aus werden sich «Konferenzschaltungen» herstellen lassen, bei denen mehrere Teilnehmer miteinander sprechen können. Drahtlose Rufanlagen werden diese an den Apparat holen, wenn sie außerhalb der «Weckerreichweite» sind. Ferner dürften Anschlußmöglichkeiten für Faksimilegeräte nicht fehlen, die Kopien von Dokumenten, Zeichnungen usw. «per Telefon» ins Haus liefern.

Bildfernsprecher, das Fernsehtelefon oder wie immer Zusatzgeräte genannt werden, die Gesprächspartner einander auch sehen lassen, existieren seit über 40 Jahren. Auf der Leipziger Messe 1936 hatten sie Premiere; über ein 180 km langes Kabel konnten sich die Gesprächsteilnehmer von Leipzig nach Berlin «sehen».

Seitdem wurde in den USA, in der Sowjetunion, in Holland, in der BRD und anderswo wiederholt mit dem Fernsehtelefon experimentiert. Nach wie vor ist heftig umstritten, ob es Bedeutung erlangen wird.

Es im öffentlichen Fernsprechnetzz einzuführen, würde hohen Aufwand vor allem im Leitungsnetz bedeuten. Ihn zu senken, ginge aber auf Kosten der Bildqualität. Details von Zeichnungen, Schriftstücken usw. wären kaum erkennbar. Wie viele Fernsprechteilnehmer sich unter solchen Bedingungen für das Fernsehtelefon entscheiden würden, bleibt fraglich. Entsprechende Umfragen bieten wenig Anlaß, dafür zu sein. Gegenwärtig räumt man der Faksimileübertragung wegen ihres geringeren Aufwandes und ihrer höheren Detailtreue größere



*Einige zusätzliche Möglichkeiten des Fernsprechers*

Chancen ein, auch wenn dabei auf «lebende» Bilder verzichtet werden muß.

Nichts von dem, was geschildert wurde, ist utopisch; alles ist technisch bereits vorhanden. Die Einführung allerdings kann nicht von heute auf morgen geschehen. Die umfangreichen, weitverzweigten und teuren Einrichtungen der Nachrichtentechnik sind für Funktion über einen längeren Zeitraum ausgelegt. Sie können nicht über Nacht von «elektromagnetisch» auf «elektronisch» umgestellt werden, ebensowenig wie innerhalb weniger Tage der Bahnbetrieb von Dampf- auf Diesel- oder Elektroloks umgestellt werden konnte.

Stets müssen alt und neu für eine bestimmte Zeit nebeneinander und vor allem miteinander arbeiten. Die Ablösung muß schrittweise und ohne Nachteil für die Benutzer geschehen. Welche Anforderungen das an Techniker, Ökonomen und Planer stellt, ist leicht einzusehen.

Der zweite Grund: Selbst der beste Fernsprecher – und das gilt entsprechend für Fernschreiber, Geräte zur Datenfern- oder Faksimileübertragung usw. – hätte wenig Sinn, wenn die erreichten Verbesserungen durch lange Wartezeiten, Störungen usw. ganz oder teilweise hinfällig würden.

## Eine Leitung – zahlreiche Nachrichten

Um jedem Teilnehmer jederzeit die gewünschte Nachrichtenverbindung zu ermöglichen, müssen stets genügend Übertragungskanäle vorhanden sein. Wieder bietet sich der Vergleich mit der Eisenbahn an: Auf einem zu wenig durchlässigen Schienennetz nützten die schnellsten und leistungsstärksten Lokomotiven wenig.

Das Bereitstellen von Verbindungswegen, von Nachrichtenkanälen ist eines der Hauptprobleme der Nachrichtentechnik und keineswegs neu. Schon im 19. Jahrhundert suchte und fand man Lösungen, auf einer Leitung in beiden Richtungen gleichzeitig zu telegrafieren oder über eine Leitung gleichzeitig mehrere Telegramme zu schicken.

Die dabei benutzten Prinzipien ließen sich nicht

unmittelbar auf die Telefonie übertragen. Man half sich mit Kabeln, die in gemeinsamer Umhüllung isolierte Adern für zahlreiche Ferngespräche enthielten. Für Fernverkehr konnte das jedoch nur eine Zwischenlösung sein. Der Materialverbrauch war untragbar. Für 1 km Fernkabel, das 50 Gespräche gleichzeitig weiterleiten konnte, wurde allein 1 t Leitungskupfer benötigt! Hier ergab sich also ein ähnliches Problem wie bei der Fortleitung elektrischer Energie.

Der Ausweg heißt Trägerfrequenztechnik. Um ein Gespräch gut verständlich zu übertragen, braucht man nur Tonfrequenzen von 0,3 bis 3,4 kHz, also einen 3,1 kHz breiten Übertragungskanal. Fernsprechleitungen können jedoch viel breitere Frequenzbänder übertragen. Nutzte man sie jeweils nur für ein Gespräch, wäre das nicht viel anders, als wenn man einen Briefträger mit großer Tasche auf Strecke schickte, diese jedoch nur einen Brief enthielte und er für jeden weiteren zurücklaufen müßte.

Ziel mußte sein, das gesamte von der Leitung bzw. vom Kabel zu bewältigende Frequenzband mit nebeneinanderliegenden Gesprächskanälen zu füllen, wobei diese sich selbstverständlich nicht stören dürfen.

Man ging bei der Funktechnik in die Schule. Auch jeder Sender beansprucht einen Sendekanal bestimmter Breite. Er erstreckt sich z. B. im Mittelwellenbereich um je 4,5 kHz zu beiden Seiten der sogenannten Trägerfrequenz (sie wird in Programmschriften angegeben), ist also insgesamt 9 kHz breit. Legt man die Trägerfrequenz so fest, daß die Kanäle einander nicht überlappen, gibt es keine gegenseitigen Störungen (jeder Rundfunkhörer weiß, daß diese Regel leider nur selten befolgt wird).

Bei der Trägerfrequenztechnik verfährt man entsprechend. Jedes zu übertragende Ferngespräch ist «Programm» eines winzigen Senders. Sein Ausgang allerdings führt nicht zu einer Antenne, sondern zur Fernleitung. Sie transportiert die elektromagnetischen Schwingungen zum Empfänger am anderen Ende der Fernleitung. Er ist auf *seinen* Sender ab-

gestimmt und leitet das Ferngespräch zum Teilnehmer weiter. Auch hier gilt, Kanäle, die sich nicht überschneiden, stören einander nicht. Über die gleiche Leitung kann man so viele Gespräche schicken, bis das übertragbare Frequenzband in voller Breite genutzt wird.

Das praktische Anwenden dieses Prinzips wurde vor allem durch zwei Kunstgriffe möglich.

Erstens nutzte man die Tatsache, daß bei einer normalen Funkübertragung das Kanalstück rechts und links der Trägerfrequenz jeweils die gleiche Information enthält, die Hälfte des Kanals also im Grunde verschenkt wird. An die Stelle dieser z. B. beim Mittelwellenrundfunk üblichen Zweiseitenbandmodulation trat die Einseitenbandmodulation, wodurch sich mit einem Schlag die Zahl der in einem bestimmten Frequenzband übertragbaren Kanäle verdoppelte.

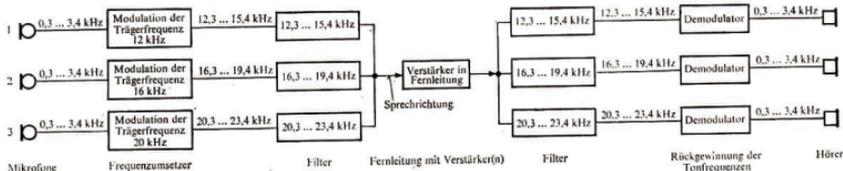
Der zweite Kunstgriff: Man legte für sämtliche Trägerfrequenzen ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz fest. Dadurch vereinfachen sich sowohl die Sender, die ihre Trägerfrequenzen sämtlich aus einer Mutterfrequenz ableiten können, als auch die Empfänger, die genauestens auf eben diese Frequenzen abgestimmt sein müssen.

Das zu übertragende Frequenzband 0,3 bis 3,4 kHz war bestimmend für die Grundfrequenz. Sie wurde – ein Beispiel für frühzeitige und nützliche internationale Zusammenarbeit – auf 4 kHz festgesetzt. Das bedeutet: Jeder Trägerfrequenzkanal ist 4 kHz breit. Er bietet Raum für ein Gespräch und überdies für Meß-, Zählimpulse usw.

## Koaxialkabel und Hohlleiter

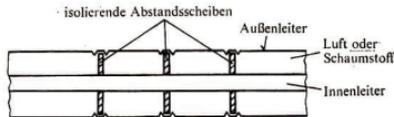
Der Beginn der Trägerfrequenztechnik fällt in die Zeit nach dem ersten Weltkrieg. Man übertrug auf vorhandenen Fernspreitleitungen, zusätzlich zum «eigentlichen» Gesprächskanal, 3, 6 und 12 Ferngespräche. Elektrizitätswerke nutzten die gleiche Technik, um sich über die ohnehin bestehenden Leitungen für den Energietransport durch Gespräche, Meßwerte und Steuersignale verständigen zu können.

Im Zusammenspiel zwischen wachsenden Verbindungsanforderungen und Fortschritten der Elektronik stieg die Kanalzahl. Stellte die Trägerfrequenztechnik anfänglich eine zusätzliche Möglichkeit dar, um bestehende Verbindungen zu



Trägerfrequenzeinrichtung für 3 Gespräche (nur 1 Gesprächsrichtung gezeichnet)

Längsschnitt durch ein Koaxialkabel



nutzen, so wurden jetzt spezielle Trägerfrequenzkabel entwickelt sowie verlegt, die ein besonders breites Frequenzband und damit viele Gesprächskanäle übertragen können.

Besonders geeignet für breite Frequenzbänder sind Koaxialkabel. Sie bestehen aus einem elektrisch leitenden «Rohr», einem biegsamen Zylinder, in dessen Achse, durch Isolierstücke fixiert, ein zweiter Leiter verläuft. Die elektromagnetischen Wellen breiten sich im Raum zwischen Innen- und Außenleiter aus, ohne nach außen zu gelangen.

Mit Koaxialkabeln (eine Ausführung kennen wir als Fernsehantennenkabel) ließ sich die Zahl der Gesprächskanäle bedeutend steigern. Systemen mit 960 folgten solche mit 2700 Kanälen, und gegenwärtig existieren Trägerfrequenzkabel, die wahlweise 10800 Gesprächskanäle, mehrere Farbfernsehprogramme oder zahlreiche Rundfunkprogramme sowie Signale anderer Kommunikationsdienste weiterleiten. Die Zahlenstaffelung findet ihre Erklärung in der immer wiederkehrenden Vervielfachung der 4-kHz-Frequenz und darin, daß man aus technischen Gründen die Kanäle nicht einfach wie die Tasten eines Klaviers nebeneinanderlegt, sondern zuvor zu kleineren sowie größeren Kanalgruppen zusammenfaßt.

Unterwegs erleiden die übertragenen Signale Verluste, die ausgeglichen werden müssen. Es ist nötig, in die Trägerfrequenzstrecke Zwischenverstärker zu schalten. Je breiter das zu übertragende Frequenzband, desto dichter rücken die Verstärker zusammen. Liegen sie bei 960 Kanälen noch etwa 9 km auseinander, so sinkt der Abstand bei 2700 Kanälen auf 3 bis 4,5 km; bei 10800 Kanälen sind die Verstärker nur noch 1,5 km voneinander entfernt.

Schon diese Zahlen lassen den hohen Aufwand für ein modernes Trägerfrequenzsystem erkennen. Er wird jedoch durch die hohe Leistungsfähigkeit (jeder Verstärker verarbeitet das ganze Frequenzband) aufgewogen.

Die Verstärker, selbstverständlich mit Halbleitern und integrierten Schaltungen bestückt, sind in allseitig geschlossene Behälter eingebaut. Sie werden mit dem Kabel vergraben. Ihren Betriebsstrom er-

halten sie über Innen- und Außenleiter von den Streckenenden oder von Zwischenstationen in größeren Abständen. Reserve-, Kontroll- sowie Alarminrichtungen überwachen die Funktion des Systems und sorgen für hohe Betriebssicherheit.

Man kann mehrere Koaxialkabel konstruktiv vereinen, womit sich die übertragbare Kanalzahl entsprechend erhöht. Auf die Dauer wird auch das nicht reichen. Schon heute sucht man daher nach noch umfassenderen und möglichst auch einfacheren Lösungen.

An einer Tatsache kommt man nicht vorbei: Jede Erhöhung der Kanalzahl bedeutet zugleich Vergrößerung der nötigen Übertragungsbandbreite. Bereits bei 10800 Kanälen arbeitet man mit Frequenzen bis in den Ultrakurzwellenbereich. Eine weitere entscheidende Erhöhung der Kanalkapazität würde den Übergang auf Mikrowellen, z. B. auf Zentimeterwellen, bedeuten. In diesem Bereich ließen sich gleichzeitig hunderttausend und mehr Ferngespräche übertragen.

Koaxialkabel kann man dann allerdings nicht mehr einsetzen. Man muß Hohlleiter verwenden.

Ein Hohlleiter ist ein Metallrohr mit rundem oder rechteckigem Querschnitt, in dessen Innenraum sich Mikrowellen sehr verlustarm fortleiten lassen. Für die Signalübertragung auf kurze Strecken, wie zwischen einer Radarantenne und dem Empfänger, sind Hohlleiter seit langem üblich. Ihre Anwendung für die Nachrichtenfernübertragung stößt jedoch auf erhebliche Schwierigkeiten. So muß ein Hohlleiter geometrisch sehr exakt gearbeitet sein, darf seine Abmessungen bei Temperaturschwankungen nicht wesentlich verändern, muß ganz «glatte» Verbindungsstellen aufweisen usw., sonst nehmen die Verluste überhand. Aus diesen Forderungen folgt, daß eine Hohlleiterübertragung recht aufwendig ist.

Ob man Hohlleiter künftig für die Nachrichtenfernübertragung oder aber nur für kurze Strecken (etwa zwischen zwei Nachrichtenzentren einer Großstadt) verwenden wird, ist vorerst noch nicht zu entscheiden, zumal in jüngster Zeit das «gläserne Kabel» als Konkurrent auftritt.

## «Gläserne Kabel»

Geht man mit den Wellenlängen der elektromagnetischen Strahlung noch weiter «nach unten», gelangt man schließlich in den Bereich des sichtbaren Lichts. Einfache Berechnungen zeigen, daß sich mit Lichtwellenmöglichkeiten für die Nachrichtenübertragung ergeben, die vielfach höher liegen als die aller bis heute üblichen technischen Einrichtungen.

Geeignete Lichtsender stehen in der Laserdioden, geeignete Empfänger z. B. als Fotodioden zur Verfügung. Gebraucht wird noch ein Hilfsmittel, mit dem sich Licht gebündelt, über große Entfernungen und nach Möglichkeit auch auf gekrümmten Wegen, «um die Ecke», fortleiten läßt.

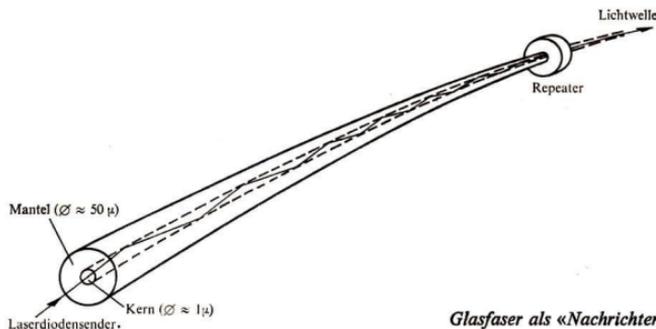
Dieses Hilfsmittel existiert. Bringt man am Ende eines Glasfadens eine nahezu punktförmige Lichtquelle an, dringt das Licht nicht nach außen, sondern pflanzt sich im Faden fort. Es wird ständig zwischen seinen Begrenzungen hin- und herreflektiert, auch dann, wenn der Faden Krümmungen folgt. Günstiger ist es, wenn man den Glasfaden nicht an Luft, sondern an eine Glasschicht niedrigerer Brechzahl grenzen läßt. In diesem Fall bleibt das Licht völlig im Kern «eingesperrt». Man kann zwei oder mehr derartige Fasern dicht nebeneinander-

legen, ohne daß sie sich gegenseitig beeinflussen (kein «Übersprechen» bei Nachrichtenübertragungen).

Nehmen wir eine derartige Glasfaser geeigneter Länge, verbinden wir ein Ende mit einem Laserdiodensender, das andere mit einem Fotodiodenempfänger, haben wir die Urform der heute viel diskutierten sowie untersuchten Glasfasernachrichtenübertragung vor uns. Wir brauchen nur noch das Laserlicht mit den zu übertragenden Signalen zu modulieren, was relativ einfach ist, und die von der Fotodiode aus dem empfangenen modulierten Licht zurückgewonnenen elektrischen Signale entsprechend aufzubereiten. Allerdings muß für die verzerrungsfreie Übertragung breiter Frequenzbänder der Durchmesser des lichtleitenden Kerns sehr gering sein. Er liegt größenordnungsmäßig im Bereich der Lichtwellenlängen, etwa bei 1 bis 3  $\mu\text{m}$ . Die Technologie solcher Glasfasern (man experimentiert auch mit Plastefäden) ist kompliziert, kann aber im wesentlichen als gelöst gelten.

Selbstverständlich wird das Licht beim Durchwandern der Glasfasern geschwächt. Auch hier geht es nicht ohne Zwischenverstärker («Repeater», Wiederholer) ab.

Eine Fotodiode empfängt das geschwächte Licht,



Glasfaser als «Nachrichtenkabel»

die entstehenden elektrischen Signale werden verstärkt und steuern schließlich einen Laserdiodensender für den folgenden Streckenabschnitt. Dies wird je nach Streckenlänge wiederholt, wobei die Repeaterabstände bei wenigen Kilometern liegen werden.

Die Glasfasernachrichtenübertragung ist gegenwärtig ein Schwerpunkt in Forschung und Entwicklung der Nachrichtentechnik. Die Möglichkeiten von Glasfasern, zu Bündeln vereint, lassen an Bandbreite und Kanalzahlen kaum noch Wünsche offen. Auch der geringe Materialeinsatz besticht: 1 g Glas, dessen Ausgangsstoff in nahezu unerschöpflicher Menge verfügbar ist, könnte 10 kg des in der ganzen Welt raren und teuren Kupfers ersetzen.

Verschwiegen sei nicht, daß noch nicht alle Fragen der Glasfasernachrichtenübertragung befriedigend gelöst werden konnten. Lebensdauer und Leistung der Laserdioden nähern sich nur allmählich ökonomisch günstigen Parametern. Die Verbindung zweier Glasfasern, die sehr exakt erfolgen muß – man denke an den Kerndurchmesser –, beschäftigt die Fachleute ebenso wie «Weichen» und «Kreuzungen» von Glasfaserleitungen.

Vor allem aber sucht man nach Spezialgläsern und anderem Fasermaterial hoher Lichtdurchlässigkeit, um die Repeaterabstände vergrößern zu können. Immerhin sind die gegenwärtig besten Glasfasern «lichtdurchlässiger» als klare Luft.

Die bisherigen Resultate sind vielversprechend: Durch nur eine Glasfaser wurden bereits über 15000 Gespräche gleichzeitig übertragen, mehr, als jedes Trägerfrequenzkabel leistet. Unter anderen in der Sowjetunion, den USA, England, der BRD absolvieren Glasfaserleitungen bereits ihren Probebetrieb. Seit dem Frühjahr 1981 gibt es in der Hauptstadt der DDR gleichfalls eine zunächst für 120 Gespräche ausgelegte Glasfasernachrichtenübertragung. Trotz geringer Entfernung (Zentrum – Schöne-weide) wurden bei dieser Verbindung 50 t Kupfer eingespart! Wer wollte da zweifeln, daß die Bedeutung der Glasfaserleitungen rasch wachsen wird?

## Nachrichten, portionsweise übermittelt

Wahrscheinlich wird für die Glasfasernachrichtenübertragung ein Modulationsverfahren angewendet werden, das wegen seiner Vorzüge beim Funkverkehr und auch in Fernsprechnetzen bereits genutzt wird: die sogenannte Pulscode modulation («PCM»). Ihre Grundlagen sind folgende:

Es ist nicht unbedingt erforderlich, die aus Sprachschwingungen gewonnenen elektrischen Signale vollständig, in ihrem gesamten Schwingungsverlauf, zu übertragen. Es genügt, ihnen charakteristische «Proben» zu entnehmen, diese als elektrische Impulse unterschiedlicher Höhe fortzuleiten und beim Empfänger daraus das ursprüngliche Signal zu «rekonstruieren». In die Lücken zwischen diesen Impulsen lassen sich weitere Impulse einordnen, so daß mehrere Signale gewissermaßen ineinandergeschachtelt übertragen werden.

Die Pulscode modulation geht noch einen Schritt weiter: Sie verschlüsselt die verschieden hohen Proben in unterschiedliche Impulsgruppen gleicher Höhe – ähnlich wie man Buchstaben und Ziffern als Morsezeichen codiert. Diese «Impulstelegramme» werden übertragen. Es versteht sich, daß Codieren beim Sender und Decodieren beim Empfänger selbsttätig ablaufen, ohne daß der Gesprächsteilnehmer es überhaupt bemerkt.

Genannt sollen zwei Vorzüge dieses Verfahrens werden: Einmal können Schwierigkeiten umgangen werden, die sich aus einer 'Eigenart herkömmlicher Übertragungssysteme ergeben. Ferngespräche werden als analoge, sich stetig ändernde Spannungs- und Stromwerte übertragen. Zur Weiterleitung von Fernschreib- und Datenübertragungssignalen, aber auch für Wahl-, Zähl- und Schaltimpulse, sind nur abgestufte Signalwerte nötig; die Übertragung geschieht digital. Diese «Doppelspurigkeit» entfällt bei Pulscode modulation. Das Nachrichtennetz braucht nur noch für digitale Signale ausgelegt zu werden.

Noch wichtiger ist der zweite Vorteil. Jedes Signal wird unterwegs verformt, verzerrt; außerdem überlagern sich ihm vielfältige Störungen. Es ist weder einfach, die Verzerrungen gering zu halten

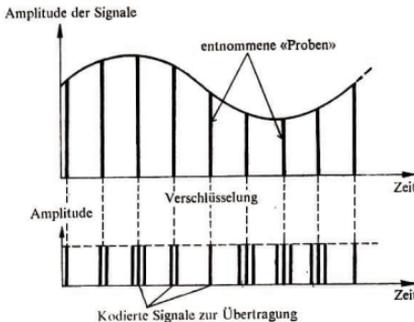
oder auszugleichen, noch fällt es leicht, Nutzsignale und Störungen sauber voneinander zu trennen (vor allem dann, wenn Nutz- und Störsignal sich in ihrer Stärke nur wenig unterscheiden). Bei Pulscode-modulation muß lediglich festgestellt werden, ob ein Impuls vorhanden ist oder nicht. Sobald Impulse überhaupt aus den Störungen herausragen, können diese völlig unterdrückt werden. Ebenso ergeht es Verzerrungen. Mag ein Impuls an seinen Kanten und Ecken noch so abgeschliffen oder verformt sein, solange er noch eindeutig feststellbar ist, läßt er sich in Zwischenverstärkern oder Endstellen des Übertragungssystems völlig regenerieren und ist dann «wie neu».

Vor allem für den Nachrichtenverkehr über Satelliten, bei dem die Signale wegen großer Entfernungen und geringer Sendeleistung den Empfänger nur sehr geschwächt erreichen, sind daher die Methoden der Pulsmodulation außerordentlich wichtig (daß sie auch den Wirkungsgrad der Sender erhöhen, sei am Rande vermerkt).

## Wellenbündel statt Kabel

Gleiche Bedeutung wie Trägerfrequenzkabel erlangten Richtfunkstrecken. Auch ihre Einsatzbereiche stimmen überein; denn beide befördern Ferngespräche, Fernschreiben, Signale zur Datenfernübertragung, Hörfunk- und Fernsehprogramme. Einrichten sowie Unterhalten von Richtfunkstrecken sind jedoch oft einfacher und preiswerter, als die von Trägerfrequenzsystemen. Kabel, ihre Verlegung, zahlreiche Zwischenverstärker entfallen. Richtfunkstrecken überbrücken Flußläufe und Sumpfbereiche, arbeiten im Polargebiet ebenso wie in der Wüste oder im Hochgebirge.

Richtfunktechnik ist Trägerfrequenztechnik, deren Kabel durch gebündelte Funkwellen ersetzt werden. Sie werden durch einen Sender und eine Richtantenne erzeugt, am Empfangsort ebenfalls von einer Richtantenne aufgenommen und dem Empfänger zugeführt. Außerhalb des «Strahls» ist kein Empfang möglich. Die Richtfunktechnik fügt



Zur Gewinnung der «Impulstelegramme» bei PCM

sich anderen Systemen nahtlos ein. Sie entspricht ihnen auch leistungsmäßig. 2700 Übertragungskanäle je Funkwellenbündel sind keine Seltenheit.

Nur Funkwellen des Höchstfrequenzbereichs lassen sich genügend straff bündeln und gestatten es, breite Frequenzbänder für viele Nachrichtenkanäle zu übertragen. Die Richtfunktechnik ging daher parallel mit der Entwicklung der Höchstfrequenztechnik zu immer kürzeren Wellen über. Sie begann mit Wellenlängen von einigen Dezimetern und ist gegenwärtig vor allem im Zentimeterwellenbereich angesiedelt.

Dezimeter- und Zentimeterwellen verhalten sich ähnlich wie Licht. Sie können daher nur bis zum Horizont (und ein kleines Stück weiter) empfangen werden, Sender und Empfänger müssen sich «sehen» können. Deshalb werden längere Richtfunkstrecken in «Funkfelder» unterteilt. Diese werden von Relaisstationen begrenzt, in denen der Richtfunkstrahl empfangen und nach Verstärken seiner Signale zur nächsten Relaisstation wieder ausgesendet wird. Jede Relaisstation ist zugleich Ende und Anfang eines Funkfeldes. Allerdings liegen die Relaisstationen weiter auseinander als die Verstärker eines Trägerfrequenzkabels. Bis um 60 km beträgt, je nach Gelände, die Länge eines Funkfeldes.

Die meisten Relaisstationen arbeiten unbemannt. Meß- und Kontrollsignale für alle wichtigen Parameter werden über die Richtfunkstrecke selbst mit übertragen. Die Stromversorgung geschieht aus dem öffentlichen Netz; mitunter sind auch Sonnen- oder Radionuklidbatterien als Energiequellen vorgesehen. Auf alle Fälle sind Reserveeinrichtungen vorhanden, um einen vorübergehenden Stromausfall überbrücken zu können. Sie treten, wenn nötig, selbsttätig in Aktion.

Wie ausgereift die Richtfunktechnik ist, zeigen ausgedehnte Richtfunknetze in vielen Ländern. In unserer Republik z. B. dienen sie als Zubringer für Fernseh- und Rundfunkprogramme, dem internationalen Programmaustausch sowie dem Fernsprech- und Datenverkehr. Auf dem nordamerikanischen Kontinent durchlaufen Richtfunksignale mitunter über 100 Relaisstationen, und die Richtfunk-

strecken der Sowjetunion würden, aneinandergereiht, mehrmals um den Äquator reichen.

Mit sinkender Wellenlänge steigt die übertragbare Kanalzahl; gleichzeitig verringern sich die Antennenabmessungen bei gleicher Bündelungsschärfe; die Antennenanlagen und damit die gesamte Konstruktion der Relaisstationen werden einfacher.

Warum sollte man nicht auch hier den Sprung von Funkwellen zu Laserlicht wagen? Um infrarotes oder sichtbares Licht ebenso straff zu bündeln wie Zentimeterwellen, würden Spiegel von nur wenigen Zentimetern Durchmesser ausreichen. Über einen solchen Laserstrahl aber ließen sich 100000 Fernsehprogramme oder 100 Millionen Telefongespräche gleichzeitig übertragen – eine Kanalkapazität, die in absehbarer Zeit überhaupt nicht auszuschöpfen wäre.

Leider trübt unsere irdische Atmosphäre dieses schöne Zukunftsbild. Ein Teil der Lichtenergie wird durch Gasmoleküle und atmosphärischen Wasserdampf absorbiert. Feste sowie flüssige Schwebeteilchen streuen das Licht, und schließlich kommt es durch Vorgänge an den Grenzen von Luft unterschiedlicher Temperatur zu störenden Erscheinungen. Nur mit sehr leistungsstarken Lasern und zahlreichen Relaisstationen (die in ihrer Funktion Repeatern entsprechen) ließen sich stabile Fernverbindungen aufbauen.

Irdische Laserverbindungen werden daher – wenigstens vorerst – auf Entfernungen von wenigen Kilometern begrenzt bleiben. Sie könnten z. B., wie in der Sowjetunion demonstriert, die «dicken» Kabel zwischen Fernmeldeämtern eines Ballungsgebietes ersetzen.

Günstiger liegen die Dinge, wenn wir die störende Atmosphäre verlassen und uns in den Weltraum begeben. Dort könnte das recht wenig behinderte und mit einfachen Mitteln scharf zu bündelnde Laserlicht wichtiges Hilfsmittel zur Nachrichtenübertragung werden.

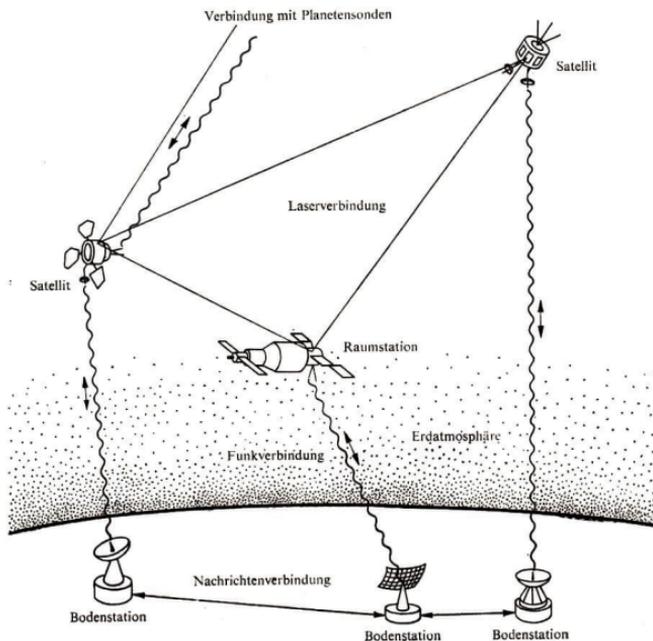
Vorschläge hierfür reichen von der Verbindung stationärer Satelliten oder von Raumstationen untereinander bis zum breitbandigen Kontakt mit inter-

planetaren Sonden sowie bis zu Nachrichtenverbindungen, die weit über die Grenzen unseres Planetensystems hinausreichen könnten. Vielleicht werden diese «Lichtsprüche», die durch manche utopischen Erzählungen blitzen, sogar einmal Wirklichkeit.

### *Laser- und Funkverbindungen in der kosmischen Nachrichtenübertragung*

### «Klassische» Nachrichtenverbindungen – modernisiert

Transozeankabel gibt es seit über 100 Jahren. Daß sie von ihrer Bedeutung noch nichts einbüßten, geht schon daraus hervor, daß ihre Gesamtlänge sich allein in den vergangenen zwei Jahrzehnten um rund 70000 km vergrößert hat. Bis vor einem Vierteljahrhundert allerdings beförderten sie ausschließlich Telegramme. Wer z. B. zwischen Amerika und Europa telefonieren wollte, war auf ein Funkgespräch angewiesen. Es verlief selten so störungs-



frei und verständlich, wie es der Fernsprechteilnehmer gewohnt war.

Bereits das erste Transozeanfernspreekabel, von Schottland nach Neufundland führend, 3600 km lang und teilweise in 4000 m Tiefe liegend, gewährleistete eine weit bessere Gesprächsqualität. Es war ein Trägerfrequenzkabel, allerdings nur für 24 Gesprächskanäle. 50 Verstärker in meterlangen Druckzylindern waren in das Kabel eingespießt und mit eigens für diesen Zweck konstruierten Elektronenröhren bestückt, weil man den Halbleiterbauelementen noch nicht so recht traute. Bei Kabeln der Folgezeit ging man selbstverständlich zur Halbleiterbestückung über. Durch bessere Kabel und Schaltungskunstgriffe gelang es, die Gesprächszahl auf mehrere Hundert zu erhöhen.

Für die Nachrichtenverbindung mit mobilen Partnern, z. B. mit Schiffen und Flugzeugen, ist man nach wie vor auf Funkverkehr angewiesen. Soweit es sich um Fernverbindungen handelt, wird er im Kurzwellenbereich abgewickelt. Auch ein großer Teil des internationalen Telegrafie-, Telex- und Faksimileweitverkehrs läuft über Kurzwellen.

Kurzwellenverkehr ist, außer in unmittelbarer Sendernähe, Funkverkehr «via Ionosphäre», d. h. über teilweise leitende Atmosphärenschichten, die sich bis zu wenigen Hundert Kilometern hoch erstrecken und ihre Eigenschaften der Sonnenstrahlung verdanken.

Die Ionosphäre zeigt sich zwiegesichtig. Einmal hat sie, indem sie Funkwellen bestimmter Frequenzbereiche zur Erde zurücklenkt, den Funkverkehr erst ermöglicht. Zum anderen macht sie uns immer wieder deutlich, daß sie nicht wie ein fester Spiegel wirkt, sondern ständigen Veränderungen und Schwankungen unterworfen ist. Sie beeinträchtigt den Funkverkehr: als Schwund mit mehr oder weniger rasch wechselnder Empfangsstärke, in Gestalt von Verzerrungen, die ein Funkgespräch bis zur Unkenntlichkeit verstümmeln können, mitunter sogar durch minuten- bis stundenlangen Totalausfall ganzer Frequenzbänder oder Verkehrsrichtungen.

Der Ionosphäre ist nicht unmittelbar beizukom-

men; man kann lediglich versuchen, sie durch technische Maßnahmen in den Sende- und Empfangsanlagen zu überlisten. Dabei hat es an Einfallreichum nicht gefehlt. So gibt es neben wirkungsvollem Schwundausgleich (auch in jedem Rundfunkempfänger vorhanden) Empfänger, die sich aus mehreren örtlich getrennten Antennen selbsttätig stets die augenblicklich günstigste auswählen, automatisch über die Antenne mit bestem Welleneinfallswinkel empfangen oder dieselbe Nachricht gleichzeitig auf zwei verschiedenen Frequenzen aufnehmen. Verzerrungen können bis zu einem gewissen Grade durch Einseitenbandbetrieb bekämpft werden. Gleichfalls größter Wert wird darauf gelegt, daß die Frequenzkanäle am effektivsten ausgenutzt werden. Dieser Zielstellung kommt der Einseitenbandbetrieb gleichfalls entgegen; denn er halbiert die Breite der benötigten Übertragungskanäle, erhöht den Wirkungsgrad der Sender und bietet durch nochmalige Unterteilung der Seitenbänder die Möglichkeit, mehrere Nachrichten, z. B. 24 Fernschreiben, gleichzeitig zu senden.

Mit der Morsetaste wird im internationalen Funkverkehr schon längst nicht mehr telegraphiert – es sei denn für kurze Betriebsmitteilungen zwischen den Stationen oder bei extrem schlechten Übertragungsbedingungen. Normalerweise nutzt man die hohe Übermittlungsgeschwindigkeit maschineller Einrichtungen. Lochstreifen sender sowie elektronische Zeichengeber und -empfänger beherrschen das Feld. Sogar Verfahren, die einen Übermittlungsfehler erkennen und die Gegenstelle zur Wiederholung bzw. zur Korrektur auffordern, stehen zur Verfügung.

Schiffsfunk ist seit Bestehen der Funktechnik einer ihrer wichtigsten Anwendungsbereiche. Die Bordanlagen waren lange Zeit verhältnismäßig bescheiden. Vieles, was an Land möglich war, verbot sich an Bord von selbst, z. B. ausgedehnte Antennenanlagen. Auch die Funkbude war anfangs eben eine «Bude» (zumal viele Schiffe erst nachträglich mit Funk ausgerüstet wurden), die nur Platz für die notwendigsten Geräte bot.

Zunehmender Seetransport, mit Fahrplangenaug-

keit verkehrende Liniendienste, Anwachsen der Hochseefischerei, durch bittere Erfahrungen notwendig gewordene Sicherheitsanforderungen erzwangen einen Wandel. Seine Voraussetzung waren die raschen Fortschritte der Elektronik besonders in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts.

Heute gibt es an Bord größerer Schiffe mehrere Betriebsempfänger und -sender, die auch dann betriebsfähig bleiben, wenn die Bordstromversorgung ausfällt. Sie sind für alle Funkbetriebsarten einschließlich Einseitenbandbetrieb eingerichtet.

Der Schiffsführung stehen nicht nur Wetterberichte, sondern auch Wetterkarten zur Verfügung. Ein Wetterkartenschreiber bringt sie nach den Signalen von «Wettersendern» zu Papier. Nicht selten sind ferner Telexgeräte sowie Einrichtungen zur Datenfernübertragung vorgesehen.

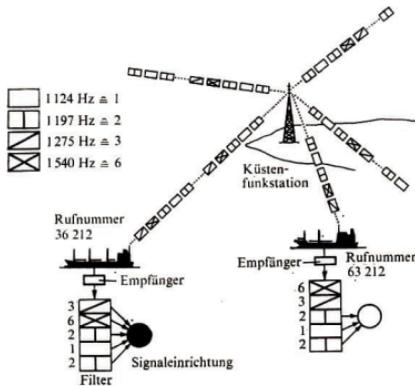
Notrufe werden rund um die Uhr automatisch empfangen und lösen Alarm aus. Rettungsbootfunkgeräte sind stets griffbereit.

Dem Nahverkehr von Schiff zu Schiff oder vom Schiff zum Land dient ein in festgelegten Kanälen arbeitendes UKW-Telefon. Zur Erleichterung von An- und Ablegemanövern, von Löscharbeiten usw. sind Handfunksprechgeräte vorgesehen.

Jedes größere Schiff ist heute an jedem Punkt der Ozeane unmittelbar von seinem Heimatland aus durch Funk zu erreichen. Allerdings verstreicht, da die Funkstationen an Bord häufig nicht mehr ständig besetzt zu sein brauchen, oft unnütze Zeit, ehe eine Landstation ein bestimmtes Schiff erreicht.

Das gegenwärtig in Einführung befindliche Selektivrufverfahren kürzt diese Wartezeiten entscheidend ab. Jedem Schiff wird eine fünfstellige Rufnummer zugeteilt. Dieses Verfahren ähnelt unserem Selbstwählfernverkehr. Von Küstenfunkstationen werden dann die Schiffe angewählt. Man sucht nach völlig neuen Lösungen für den Nachrichtenverkehr mit Schiffen sowie auch mit Flugzeugen auf Fernrouten, für die gleiche Probleme existieren. Deshalb richtet sich auch das Augenmerk auf Nachrichtensatelliten.

Der Leser wird diese in den vorangegangenen Darlegungen vermißt haben. Ihre Bedeutung ist so groß, daß sie einen eigenen Abschnitt rechtfertigen.



Beim Selektivrufverfahren spricht nur die Signaleinrichtung des gerufenen Fahrzeugs an

# Bis in den letzten Winkel der Erde

Notwendiger Umweg über den Weltraum 95  
Intersputnik – Intelsat 96  
Regionale Satellitensysteme 98  
Fernsehsatelliten in «Sicht» 100  
Satelliten für die Seefahrt 103

## Notwendiger Umweg über den Weltraum

Gleichzeitige Übertragung vieler Nachrichten über *einen* Sender ist nur im Höchsthörfrequenzbereich, von den Ultrakurzwellen an «abwärts», möglich. Auch Fernsehsendungen und Hörfunkprogramme höchster Qualität sind auf ihn angewiesen. Wellen dieses Frequenzgebietes lassen sich bündeln und werden weit weniger durch atmosphärische oder andere Störungen beeinflusst als ihre «längeren Schwestern»; jede Richtfunkstrecke, jedes UKW-Programm beweist es.

Doch die Wellen des Höchsthörfrequenzbereichs reichen nur bis zum Horizont. Das schränkt ihre Einsatzmöglichkeiten ein.

Die Versorgung ausgedehnter, wenig besiedelter oder sehr unwirtlicher Gebiete mit Fernseh- und UKW-Programmen wäre unverträglich aufwendig, Richtfunkstrecken über Ozeane oder zwischen weit auseinanderliegenden Inseln unmöglich; denn wo sollte man Relaisstationen errichten? Pläne, sie durch ständig in großer Höhe kreisende Flugzeuge oder durch Ballone zu ersetzen, wurden erwogen, nahmen aber nie ernsthaft Gestalt an. Antennentürme für die kürzeste direkte Richtfunkverbindung von der europäischen zur amerikanischen Küste hätten mindestens 200 km (!) hoch sein müssen.

Könnte man den Mond als riesigen Umlenkspiegel benutzen, ihm Funkwellen zustrahlen, die er

wiederum zur Bodenstation reflektierte? Versuche verliefen zwar positiv, zeigten aber zugleich, daß die «Richtfunkstrecke» Erde-Mond-Erde für öffentliche Nachrichtenverbindungen nicht stabil genug war. Außerdem – der Mond geht auf und unter, Verbindungen wären nur möglich, solange er im Sichtbereich beider Endpunkte der Übertragungsstrecke stünde.

Wie wäre es mit künstlichen Umlenkspiegeln in geringerer Höhe? Keine drei Jahre, nachdem die Sowjetunion mit «Sputnik 1» die Raumfahrtära eröffnet hatte, zog als leuchtendes Pünktchen «Echo 1 A» über den Nachthimmel. Es war der erste Nachrichten-satellit. Als Ballon von 30 m Durchmesser, mit einem Metallfilm belegt, umkreiste er die Erde in etwa 1600 km Höhe und reflektierte Funksignale von Bodenstationen zu Bodenstationen zurück. Nur zwischen Erdfunkstellen, in deren Sichtbereich er sich befand und deren Antennen seiner Bewegung nachgeführt wurden, war eine Nachrichtenverbindung möglich. Grundlage erdumspannender Kommunikationsnetze konnten solche «passiven» Nachrichtensatelliten nicht sein.

Bereits 1945 hatte ein englischer Wissenschaftler eine andere – nicht von allen Kollegen ernst genommene – Lösung vorgeschlagen. Man solle, so schrieb er, im erdnahen Weltraum «aktive» Nachrichtensatelliten «aufhängen», die im Höchsthörfrequenzbereich Sendungen vom Boden aufnehmen

und verstärkt zur Erde zurückschicken könnten. Unter ihren möglichen Umlaufbahnen wurde schon damals eine besonders wichtige genannt:

Künstliche Erdbegleiter, deren Bahn 35800 km hoch in der Ebene des Erdäquators von West nach Ost verläuft, stehen ständig über dem gleichen Punkt der Erdoberfläche. Sie werden zu Synchronsatelliten, zu geostationären Satelliten, und «überblicken» ein riesiges Gebiet. Mit drei gleichmäßig über dem Äquator verteilten Nachrichtensatelliten wäre die gesamte Erdoberfläche mit Ausnahme sehr hoher geografischer Breiten zu erreichen. Eine ständige Antennennachführung ist, da die Satelliten «stillstehen», nicht erforderlich.

## Intersputnik – Intelsat

1963 wurden die ersten Nachrichtensatelliten auf Synchronbahnen gebracht. Ihre zahlreichen Nachfolger sind seit Jahren fester Bestandteil des internationalen Fernmeldeverkehrs. Außerdem sind sie ständig für den Austausch von Fernseh- und Hörfunkprogrammen eingesetzt.

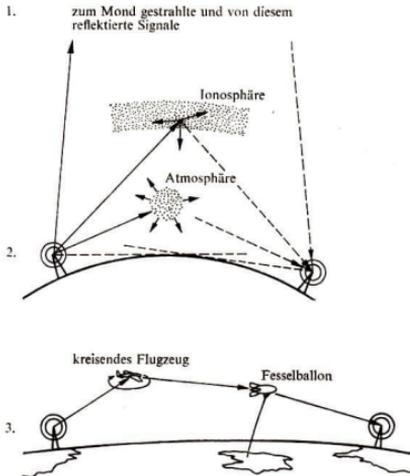
Zwei globale Nachrichtensatellitensysteme existieren gegenwärtig:

Im Februar 1974 wurde das System «Intersputnik» – gegründet 1971 – sozialistischer Staaten in Betrieb genommen. Ihm gehören als gleichberechtigte Partner die Bulgarische VR, ČSSR, DDR, Kuba, die Mongolische VR, VR Polen, VR Rumänien, UdSSR und die Ungarische VR an.

Demgegenüber wird das von den USA kontrollierte Nachrichtensatellitensystem «Intelsat» unter ausschließlich kapitalistischen Gesichtspunkten betrieben. Das Mitspracherecht der Partner richtet sich nach ihrem Aktienanteil, dessen größter Teil sich in Händen eines US-Konsortiums befindet.

Beide Systeme gehen auch von unterschiedlichen technischen Grundkonzeptionen aus:

Das Intelsat-System arbeitete von Anfang an mit Synchronsatelliten über dem Atlantik, dem Pazifik und dem Indischen Ozean. Die Sowjetunion konnte auf diese Lösung zunächst nicht zurückgreifen. Ihr



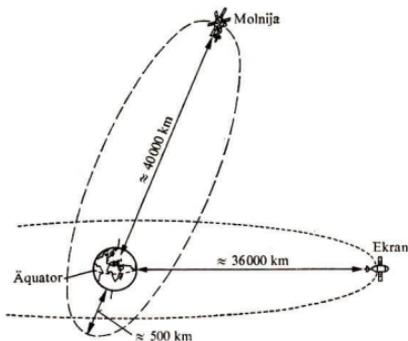
*Vorschläge (erprobt, aber durch Nachrichtensatelliten nahezu gegenstandslos geworden) zur Fernübertragung im Hörfrequenzbereich: 1 Mond reflektiert Signale zur Erde zurück; 2 Unstetigkeiten in Atmosphäre und Ionosphäre «streuen» einen Teil der Wellen nach allen Seiten; mit Hochleistungsendern und -empfängern sind «Streuerbindungen» möglich; 3 kreisende Flugzeuge oder Fesselballons könnten als «fliegende Relaisstationen» eingesetzt werden*

Territorium liegt weit nördlich des Äquators und erstreckt sich bis in hohe polare Breiten. Synchronsatelliten stehen daher für die Sowjetunion sehr niedrig über dem Horizont. Für stabile Verbindungen ist unter diesen Bedingungen eine sehr ausgereifte Boden- und vor allem Bordelektronik erforderlich. Sie stand, als die Sowjetunion 1965 ihren ersten Nachrichtensatelliten in Betrieb nahm, noch nicht in vollem Umfange zur Verfügung. Der Ausweg, den man beschritt, legte zugleich Zeugnis vom hohen Stand der sowjetischen Raketen- und Raumfahrttechnik ab.

Die Nachrichtensatelliten vom Typ «Molnija» durchlaufen langgestreckte, unter einem Winkel von 65 Grad gegenüber dem Äquator geneigte Ellipsen. Über der Südhalbkugel nähert sich der Satellit der Erdoberfläche bis auf etwa 500 km, über der nördlichen Halbkugel dagegen entfernt er sich bis zu 40000 km von ihr. Infolgedessen bewegt sich jeder Molnija-Satellit für einen großen Teil seiner 12stündigen Umlaufzeit hoch am Himmel der nördlichen Halbkugel. 8 bis 10 Stunden ist während jedes Umlaufs Nachrichtenverkehr möglich. Inzwischen setzt, nach Vorversuchen mit Satelliten der Kosmos-Serie, auch die Sowjetunion geostationäre Nachrichtensatelliten über dem Atlantischen, dem Stillen und dem Indischen Ozean ein.

Die elektronisch/elektrische Ausrüstung von Nachrichtensatelliten und Bodenstationen wurde nahezu von Start zu Start verbessert. Wichtig ist vor allem die angebotene Übertragungskapazität. Die Anfänge mit 60 bzw. 240 Fernsprechanälen oder einem Fernsehkanal sind schon fast vergessen. In Nachrichtensatelliten aus jüngster Zeit stehen 12000 Fernsprech- oder 20 Fernsehkanäle zur Verfügung. In 10 Jahren werden es, so schätzt man, wahrscheinlich etwa 30000 Fernsprech- und 60 Fernsehkanäle sein.

Auch die Betriebsweise hat sich grundlegend verändert. Zunächst konnte man die Signale eines Nachrichtensatelliten zwar an vielen Bodenstationen gleichzeitig empfangen; Gegenverkehr war aber nur als Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen zwei Erddefunktellen möglich. Gegenwärtig arbeitet man



*Umlaufbahnen eines stationären («Ekran») und eines nichtstationären («Molnija») Nachrichtensatelliten*

im sogenannten Vielfachzugriff; über einen Satelliten können Bodenstationen beliebig und unabhängig voneinander in Verbindung treten. Nachrichtensatelliten sind damit nicht mehr «nur» Relaisstationen im Weltraum, sondern regelrechte Fernmeldezentralen.

Ein Prinzip des Vielfachzugriffs ist nicht schwer zu verstehen: Jede Erdfunkstelle strahlt dem Satelliten ihre Signale auf einer ihr zugeteilten Frequenz zu. Der Satellit empfängt die Signale sämtlicher Bodenstationen, setzt sie zu einem lückenlosen Spektrum zusammen und strahlt dieses Gesamtspektrum (in einem anderen Frequenzband) wieder aus. Jede Bodenstation filtert sich den für sie bestimmten Teil aus dem breiten Spektrum wieder aus.

Bei einem anderen Verfahren erreichen die Signale der Erdfunkstellen den Satelliten nicht gleichzeitig, sondern abschnittsweise nacheinander. Die jeweilige Empfangsstation sucht sich die ihr zugeteilten und sich periodisch wiederholenden Zeitabschnitte heraus. Voraussetzung dieser Methode ist genauestes «Takthalten» aller Erdfunkstellen.

Die Ausstrahlung breiter Frequenzbänder setzt eine entsprechende Sendeleistung im Satelliten voraus. Ihre Erhöhung kommt im übrigen auch den Bodenstationen zugute, weil deren Antennen und übrige Einrichtungen dann einfacher werden.

Von den wenigen Watt der ersten Nachrichtensatellitensender ist man inzwischen bis in den Leistungsbereich zwischen einigen Hundert Watt und wenigen Kilowatt vorgestoßen.

Die Stromversorgung übernehmen nach wie vor Sonnenbatterien und mit diesen zusammengeschalte Akkumulatoren. Künftig werden zunehmend auch Radionuklidbatterien zum Einsatz gelangen.

Die steigende Nutzlast der Trägerraketen wirkt sich nicht nur günstig auf die elektronischen Geräte an Bord, sondern auch auf die Bordantennen aus. Man konnte zu umfangreicheren Antennen (Durchmesser bis 10 m) höherer Richtwirkung und besserer Energiebündelung übergehen. Auch ein größerer Aufwand für die Richtungsstabilisierung war jetzt zulässig.

## Regionale Satellitensysteme

Nicht zuletzt die eben genannten Fortschritte rückten ein ganz anderes Anwendungsgebiet von Nachrichtensatelliten in das Blickfeld. Man konnte nunmehr, wie bei den Globalsystemen erforderlich, einem Satelliten nicht nur ein möglichst weites Blickfeld zubilligen, sondern Systeme mit Regionalnachrichtensatelliten einrichten, die nur in ein örtlich begrenztes Gebiet strahlten.

Das erste und uns bekannteste Regionalsystem nahm unter der Bezeichnung «Orbita» seinen Betrieb zum 50. Jahrestag der Großen Sozialistischen Oktoberrevolution auf.

Dieses System – seine Molnija-Satelliten bildeten zugleich den Grundstock des Systems Intersputnik – ersetzt für wenig besiedelte Regionen der Sowjetunion zugleich Richtfunkstrecke, Trägerfrequenzkabel und Fernsehprogrammzubringer. Die standardisierten Bodenstationen empfangen die Signale, die dann mit konventionellen Mitteln weiterverteilt und z. B. von örtlichen Fernsehsendern ausgestrahlt werden. Auch im System Intersputnik bewahren sich diese Bodenstationen – in Kuba ebenso wie bei Fürstenwalde.

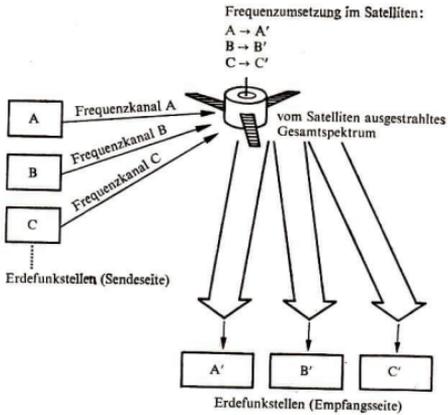
Man vergaß in der Sowjetunion jedoch auch jene Gebiete nicht, wo wegen großer Entfernungen selbst Orbitastationen mit ihren Verteilernetzen unökonomisch oder schwer zu errichten wären.

Im Oktober 1976 bezog der sowjetische Synchronsatellit «Ekran» seinen Standort über der Küste Sumateras. Er strahlt das von einer Erdfunkstelle bei Moskau übermittelte zentrale Fernsehprogramm in die genannten Gebiete.

«Ekran» sendet in dem auch vom «irdischen» Fernsehen genutzten UHF-Bereich. Sender und Antennen sind so leistungsfähig, daß relativ einfache Empfangsanlagen genügen. Es gibt sie in zwei Ausführungen. Eine reicht aus, um eine Kleinstadt zu versorgen, die andere – kleiner als ein normaler Fernsehempfänger – kann die Empfänger eines Dorfes, einer Baustelle usw. speisen.

Die Antennen sind aus Elementen zusammengesetzt, wie sie jede Fernsehantenne aufweist. Sie

*Ein Verfahren zur Verwirklichung  
des Vielfachzugriffs*



«Ekran» und sein Versorgungsgebiet

können auf Dächern installiert werden. Auch mobile Empfangsanlagen, in Kraftwagen eingebaut, existieren. Sie sind vor allem für weiterrückende Baustellen (Bahn-, Erdölleitungsstrassen usw.) gedacht. Ihre Zahl wird rasch anwachsen.

In einer ähnlichen Situation wie die Sowjetunion sind weite Teile Kanadas. Es ließ sich leicht ausrechnen, daß für ihre Fernmelde- und Fernsehversorgung ein Satellitensystem preisgünstiger als ein dichtes Richtfunknetz sein würde. Über das System «Telesat» laufen seit 1972 Fernsehprogramme, Fernsprech- und Telexverbindungen.

Indonesien schließt mehrere tausend Inseln ein, die sich über ein riesiges Gebiet verteilen. Solange ihre Nachrichtenverbindungen vor allem auf den Funkverkehr zwischen Bodenstationen angewiesen waren, genügte sie in keiner Weise dem Bedarf und wurden überdies durch heftige atmosphärische Störungen beeinträchtigt. Seit 1976/77 stellen zwei Satelliten sowie zahlreiche Bodenstationen auf größeren Inseln je 5000 Fernsprech- und bis zu 12 Fernsehkanäle zur Verfügung. Weitere Regionalsysteme sind bereits tätig oder wurden vorbereitet; so das algerische System «Saharasat» (1975), vorwiegend gedacht für die Versorgung der Wüstengebiete, ein System für die arabischen Staaten, für Brasilien, den Sudan sowie Zentralafrika, sogar z. B. für den Verkehr zwischen dem norwegischen Festland und Bohrplattformen im Meer.

Ein richtungweisendes Satellitenexperiment unternahm Indien schon vor mehreren Jahren: In über 2000 abgelegenen indischen Dörfern wurden für ein Jahr Fernsehprogramme empfangen, die ein «gemieteter» Satellit ausstrahlte. Es waren ausgesprochene Bildungsprogramme. Lehrer wurden unterwiesen, Schüler vor allem auf naturwissenschaftlichem Gebiet unterrichtet; landwirtschaftliche Kurse und hygienisch-medizinische Ratschläge für die Bevölkerung wurden gesendet. Mit eigenen Satelliten wird Indien das gelungene Experiment fortführen.

Seitdem ist die Diskussion um sogenannte Bildungssatelliten nie mehr ganz abgebrochen. Es gibt bemerkenswerte Projektstudien und Berechnungen.

In 7 bis 10 Jahren wäre durch konsequenten Einsatz von Bildungssatelliten das noch immer erschreckend hohe Analphabetentum aus der Welt zu schaffen. Mit den bisherigen Methoden würde es 30 Jahre erfordern. Keine 4 Dollar wären je Jahr und Schüler auszugeben – nicht einmal 1% der Summe, die dem USA-Bürger jährlich für Aufrüstung und militärische Forschungen abverlangt wird.

Auch besondere technische Schwierigkeiten gäbe es nicht. Kleinpfangsstationen, im Kraftfahrzeug oder mit dem Hubschrauber zu transportieren, existieren, wobei die Antennenspiegel nur noch einen Durchmesser von 1 bis 3 m aufweisen. Doch in den kapitalistischen Ländern stoßen Vorschläge für die unumgänglichen internationalen Vereinbarungen auf wenig Interesse. Intelsat ist profitabler als ein weltweites Bildungssystem, und vielleicht wäre es sogar «gefährlich», wenn allein in Mittel- und Südamerika 100 Millionen Menschen lesen und schreiben lernen!

## Fernsehsatelliten («in Sicht»)

Mehr noch als der Einsatz von Bildungssatelliten wird das Satellitendirektfernsehen diskutiert. Die Antenne der Fernsehheimempfänger, so las man etwa, wird auf den «Fernsehsatelliten» über uns gerichtet, wir brauchen weder Fernsehsender noch Zubringerstrecken sowie Umsetzer und können außerdem unter einem vielfältigen, internationalen Programmangebot wählen.

Niemand braucht zu befürchten, daß die bestehenden Fernsehnetze in naher Zukunft verschrottet werden. Das Satellitendirektfernsehen soll vor allem jenen Gebieten Fernsehempfang bringen, in denen noch keine Fernsehnetze bestehen oder in denen sie nicht eingerichtet werden können. Es soll durch die «von oben» einfallenden Wellen den Empfang in Großstädten verbessern, wo man sich zunehmend mit dem Empfang beeinträchtigenden «Hochhausabschattungen» oder -reflexionen herumschlagen muß. Es wird auch Gebirgstäler erreichen, in denen heute trotz erheblichen Auf-

wandes an Umlenkanlagen, Großantennen und Fernsehhilfsstationen noch keine vollständige Fernsehversorgung gesichert ist. Selbstverständlich wird auch das Programmangebot erweitert werden, aber sicherlich nicht auf «100 bis 200 Programme», wie mitunter prophezeit wurde. Man wird vielmehr vor allem die großen Möglichkeiten nutzen, die der internationale Programmaustausch zwischen Fernsehsatelliten anbietet.

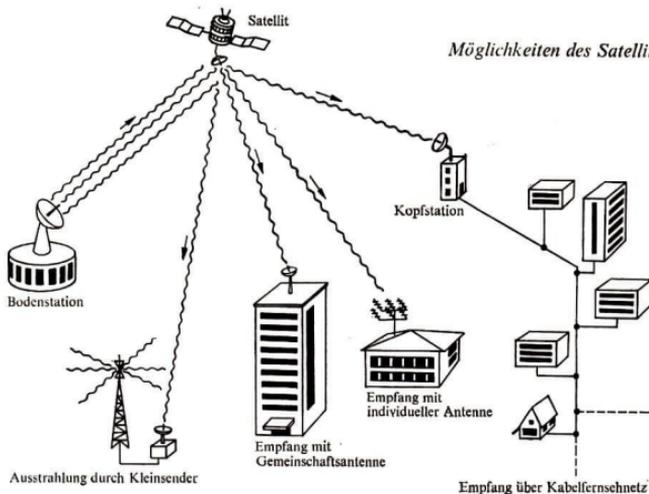
Wie steht es um die Technik des Satellitendirektfernsehens? Sie ist in Grundzügen bereits ausgearbeitet und vorhanden, was nicht ausschließt, daß noch zahlreiche Einzelfragen zu klären sind.

Alle Satelliten für Fernsehdirektübertragungen müssen Synchronsatelliten sein und auf ein und derselben Umlaufbahn stationiert werden. Man kann aber die Satelliten, wenn Störungen vermieden werden sollen, nicht beliebig dicht aneinanderrücken. Ein Mindestabstand muß eingehalten werden, mit

anderen Worten: die Zahl der möglichen Standorte ist begrenzt, zumal noch zahlreiche andere Satelliten Plätze auf der Synchronbahn beanspruchen (für 1980 bis 1990 rechnen französische Wissenschaftler allein mit dem Start von über 80 geostationären Satelliten für Kommunikationszwecke im weitesten Sinne).

Eine Standortverteilung, bei der keiner der jetzt oder künftig an Fernsehsatelliten Interessierten benachteiligt wird, ist nur durch internationale Absprachen zu erreichen. In dieser Richtung wurden bereits wichtige Schritte vollzogen. Trotzdem wird nicht zu vermeiden sein, daß Fernsehsatelliten von mehreren Staaten gleichzeitig benutzt werden müssen.

Weitere Festlegungen betreffen den für Satellitendirektübertragungen zu reservierenden Frequenzbereich. Er muß so gelegt werden, daß keine Funkdienste auf der Erdoberfläche oder zwischen Erde



und Weltraum beeinträchtigt werden. Schon deshalb (es gibt auch andere, hier nicht zu erörternde Gründe) scheiden die üblichen Fernsehkanäle für die Satellitendirektübertragung aus; denn im gesamten vom Satelliten «ausgeleuchteten» Bereich wäre die vom Satelliten benutzte Frequenz für andere Funkdienste blockiert. Das Satellitenfernsehen wird sich daher zunächst auf Frequenzen um 12 GHz (2,5 cm Wellenlänge) abspielen; in einem Bereich, dessen Technik beherrscht wird und der auch für die Strecke Weltraum–Boden günstige Übertragungseigenschaften der Wellen aufweist.

Das Gebiet, das ein Fernsehsatellit erreicht, der ja in den meisten Fällen ein Regionalsatellit sein wird, hat im allgemeinen ellipsen- oder eihnliche Gestalt und richtet sich nicht nach Staatsgrenzen. Es ist daher unvermeidlich, daß sich Empfangsgebiete überlappen. Dadurch vergrößert sich zwar in den betreffenden Gebieten das Programmangebot, andererseits könnte es durch ungeeignete Antennenkonstruktionen und vor allem ungünstige Zuweisung von Frequenzkanälen zu gegenseitigen Störungen kommen, die den Satellitendirektempfang erheblich beeinträchtigt würden. Auch diese Frage ist nur durch internationale Absprachen und den guten Willen aller Beteiligten befriedigend zu lösen.

Fernsehsysteme auf der Erdoberfläche arbeiten nach den verschiedensten technischen Normen; eine Tatsache, die den internationalen Programmaustausch erheblich kompliziert und die auch der Fernsehzuschauer zu spüren bekommt, der im Empfangsbereich zweier nach unterschiedlichen Normen arbeitender Fernsehsysteme wohnt; denn er kann mit seinem Gerät normalerweise nur Sender eines Systems empfangen.

Gemeinsam aber ist allen Fernsehsystemen die sogenannte Restseitenbandmodulation. Gerade sie eignet sich für das Satellitendirektfernsehen nicht sonderlich, denn sie erfordert hohe Sendeleistungen. Weit günstiger ist der Einsatz der vom UKW-Hörfunk bekannten Frequenzmodulation. Hier genügen Sendeleistungen von einigen 100 W, deren Bereitstellung auch in Satelliten keine Schwierig-

keit mehr bereitet. Allerdings muß am Empfangsort die Frequenzmodulation, damit unsere Empfänger weiterverwendet werden können, zunächst durch zusätzliche Baustufen wieder in Restseitenbandmodulation umgewandelt werden. Erstrebenswert wäre, daß alle Fernsehsatelliten für die Strecke Satellit–Boden von einheitlichen technischen Parametern ausgehen und das Normendurcheinander nicht weiter vergrößern.

Auch über die Aufteilung der einzelnen Kanäle gibt es bereits Vorstellungen. Eine geht davon aus, jedem Staat z. B. 5 Satellitenkanäle zuzuweisen.

Davon könnte einer für ein ständiges internationales Programm freigehalten werden. Sprachschwierigkeiten müßten nicht entstehen; denn es sind technische Verfahren bekannt, den Begleitton zu einem Programm mehrsprachig zu senden, wobei dem Fernsehzuschauer überlassen bleibt, ob er den Originalton oder die synchronisierte Fassung hören möchte.

Der zweite Kanal könnte Bildungsprogrammen, Informations- oder auch Notdiensten vorbehalten bleiben. Die übrigen drei Kanäle stünden für die nationalen oder regionalen Programme zur Verfügung. Dabei könnte man daran denken, den dritten Fernsehkanal in zahlreiche Kanäle für den Hörrundfunk zu unterteilen. Allerdings wäre auch dieser Hörrundfunk nicht mit normalen Geräten zu empfangen. Die Signale müßten entsprechend aufbereitet werden.

Gerade das legt die Frage nahe, ob es nicht neben Fernseh- auch Hörrundfunksatelliten geben wird. So wünschenswert sie z. B. für weiträumige Gebiete wären, in denen der Ausbau von UKW-Netzen auf große Hindernisse stößt, sind sie vorerst wohl nicht zu erwarten.

Einen Grund hierfür kennen wir schon: Ein im UKW-Hörfunkbereich strahlender Satellitensender würde zahlreiche irdische UKW-Stationen «zu decken» und könnte nur ein überregionales Programm ausstrahlen. Ein Vorzug des UKW-Rundfunks besteht aber gerade darin, daß bei gehörigen Senderentfernungen der gleiche Kanal mehrfach benutzt werden kann. Diese Möglichkeit entfele-

Antennen für «UKW-Satelliten» müßten große Abmessungen, bis zu 100 m Durchmesser, haben. Der Aufwand hierfür steht gegenwärtig in keinem vernünftigen Verhältnis zum Bedarf. Allerdings muß zugegeben werden, daß sich diese Situation eines Tages ändern könnte. Bis dahin wird man, falls überhaupt, Hörrundfunkkanäle in einen der Fernsehkanäle einbetten und am Boden abtrennen.

Damit sind wir bereits bei den Empfangsanlagen. Sie könnten so aufgebaut sein:

Eine Parabolantenne von etwa 1 m Durchmesser wird auf dem Dach installiert, zum Satelliten gerichtet und empfängt die von ihm ausgestrahlten Kanäle. Da sich Zentimeterwellen nur durch Hohlleiter verlustarm fortleiten lassen, setzt man die 12-GHz-Kanäle unmittelbar an der Antenne in den UHF-Bereich um und verstärkt die Signale. Zum Weiterleiten genügt dann handelsübliches UHF-Kabel. Dem Empfänger vorgesetzt (oder in ihn integriert) sind Baustufen, die die Frequenzmodulation in Restseitenbandmodulation umwandeln, die einzelnen Kanäle voneinander trennen und evtl. die Signale der Hörrundfunkprogramme abzweigen. Auf den gewünschten Kanal wird in gewohnter Weise am Empfänger abgestimmt.

Sicherlich wird man, schon aus Kostengründen, Antenne und Umwandlungsstufen nach Möglichkeit gemeinsam für mehrere Empfänger verwenden (wodurch das Programmangebot nicht geschmälert wird). Gemeinschaftsantennenanlagen und Kabelfernsehnetze bieten sich mit ihren bereits vorhandenen Installationen hierfür besonders an. Aber auch der «individuelle» Satellitenempfänger wird eines Tages nicht unerschwinglich sein.

Die internationale Zusammenarbeit muß über die vorwiegend technischen Probleme hinausreichen. Es tauchen Fragen auf, die nur durch Kooperation gleichberechtigter Partner und bei strikter Einhaltung völkerrechtlicher Prinzipien zu beantworten sind. So darf keinerlei Mißbrauch des Satelliten-direktfernsehens geduldet werden, weder zur Einmischung in innere Angelegenheiten anderer Staaten noch zur Hetze oder Diskriminierung in irgendeiner Form. Trotz hartnäckiger Verzögerungstaktik ge-

wisser Staaten wurden bei den Vereinten Nationen und in der Internationalen Fernmeldeunion Anfangserfolge erzielt, um erste Vorbedingungen erfüllen zu können. (Schon 1972 legte die UdSSR der UNO den Entwurf einer «Konvention über ... Nutzung künstlicher Erdsatelliten für Fernsehübertragungen» vor.) Wahrscheinlich wird das Satelliten-direktfernsehen schon in kommenden Jahren Wirklichkeit werden.

## Satelliten für die Seefahrt

Ein weiteres Nachrichtensatellitensystem wird aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren realisiert werden. 1976 wurde in London von Teilnehmern aus 40 Schiffahrtsländern beschlossen, ein internationales Schiffsfunksatellitensystem («INMARSAT») aufzubauen, vor allem auch deswegen, weil der Schiffsfunk – besonders die Fernverbindungen im Kurzwellenbereich – noch Wünsche offenläßt. Es kommt hinzu, daß die Belegung der verfügbaren Schiffsfunkkanäle immer dichter wird. Das würde, bliebe man bei den eingeführten Verfahren, schließlich zu verwirrenden Zuständen führen.

Nur durch den Einsatz von Schiffsfunksatelliten wird sich dieser Mangel beheben lassen. Es werden in der Perspektive Mehrzwecksatelliten sein.

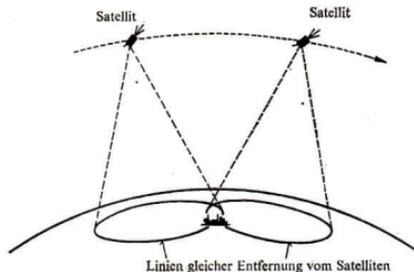
Zunächst dienen sie dem Nachrichtenverkehr zwischen Land- und Schiffsstationen und von Schiff zu Schiff. Sie werden ferner automatisch Notrufe empfangen und weitergeben. Schließlich sollen sie auch die Grundlage neuartiger, den ganzen Erdball umspannender Navigationssysteme sein.

Wie für Fernsehsatelliten gilt auch hier: Unüberwindliche technische Probleme gibt es nicht mehr. Vorläufer solcher Systeme arbeiten, wenn auch vorwiegend für militärische Zwecke. Lediglich auf dem Sektor der Bordausrüstung ist noch erhebliche Arbeit zu leisten.

Die Empfänger unterliegen naturgemäß weit härteren Bedingungen als Erdfunkstellen auf dem Festland. Sie müssen klimafest, robust, klein, sehr zuverlässig und genau sein. Ihre Bedienung darf keine Spezialkenntnisse erfordern.

Antennen, deren Durchmesser wenige Meter überschreitet, kann man an Bord schlecht unterbringen. Sie müssen unter härtesten Witterungsbedingungen einwandfrei arbeiten sowie auf einer kreiselstabilisierten Plattform angebracht werden, die alle Schiffsbewegungen selbsttätig ausgleicht und den anvisierten Satelliten ständig «im Auge» behält. Nicht nur für die Land-, sondern auch für Bordstationen muß wieder das Prinzip des Vielfachzugriffs gelten. Das erfordert neben technischen auch organisatorische Maßnahmen. Sie setzen gleichfalls internationale Absprachen voraus.

So muß z. B. jedes Schiff immerzu angerufen werden und seinerseits jederzeit gewünschte Verbindungen aufnehmen können. Gegenseitige Überschneidungen und Behinderungen des Nachrichtenverkehrs müssen ausgeschlossen sein. Das System muß den Ansprüchen für längere Zeit genügen, ausbaufähig sein und das reibungslose Zuschalten weiterer Teilnehmer ermöglichen. Es soll schließlich der Luftfahrt gleichfalls zugänglich sein. Eine große Anzahl von Aufgaben also, die jedoch schon in wenigen Jahren gelöst werden könnten.



*Eine Möglichkeit zur Navigation mit Hilfe von Satelliten: Alle Punkte gleicher Entfernung zu einem Satelliten ergeben einen Kreis auf der Erdoberfläche. Wird die Messung mit einem zweiten Satelliten (oder nach einer gewissen Zeitspanne mit dem für die erste Messung benutzten) wiederholt, läßt sich der eigene Standort als einer der beiden Kreisschnittpunkte bestimmen. Zur Messung dienen z. B. Funkimpulse, deren Laufzeit zum Satelliten und zurück festgestellt wird*

# Vor Lautsprecher und Bildschirm

Eine Technik erobert die Welt 105  
Stereo - Kunstkopf - Quadro 106  
Der Hörrundfunk-Empfänger wird  
«automatisch» 109  
Der Fernsehempfänger kann mehr 111  
Auf Dächern - unter Straßen 112  
Kabelfernsehen - nur Einbahnstraße? 124

## Eine Technik erobert die Welt

60 Jahre ist der Hörrundfunk, knapp 40 das Fernsehen alt. 1977 kamen auf 1000 Weltbewohner 225 Hörfunk- und 86 Fernsehempfänger, aber nur 109 Exemplare von Tageszeitungen. 192 Staaten und Gebiete betrieben Hörfunkstationen, 132 eigene Fernsehsender. 500 Millionen verfolgten z. B. die Olympischen Spiele von Mexiko (1968) am Bildschirm, 2 Milliarden dürften 1980 in Moskau «dabeigewesen» sein. Beeindruckende Zahlen! Und sie steigen immer weiter an.

Was werden die nächsten Jahre bringen? Zunächst zum Hörrundfunk:

Frage man nach den bekanntesten Fortschritten des Hörrundfunks während der letzten 30 Jahre, käme ziemlich einhellig die Antwort: Ablösung der Röhre durch den Transistor und UKW-Rundfunk. In der Tat bedeutet beides eine neue Qualität des «Radios».

Die Anwendung der Halbleitertechnik auf Hörfunkempfänger hatte für jedermann recht augenfällige Folgen. Die gegenüber den Röhren fast verschwindenden Abmessungen der Transistoren, das Wegfallen der nebenbei wie Miniaturheizkörper wirkenden Röhren erlaubten ein radikales Verringern der Geräteabmessungen. Die dem gegenwärtigen Geschmack entsprechenden flachen Gehäuse hätten bei Röhrenbestückung ein Wunschtraum bleiben müssen.

Die Zuverlässigkeit der Empfänger erhöhte sich, denn die häufigste Ausfall diagnose, «Röhrendefekt», war gegenstandslos geworden. Mit steuernden und verstärkenden Bauelementen, vertreten einst nur durch Röhren, brauchte man nicht mehr zu zeigen. Leistung und Bedienkomfort der Geräte zogen Nutzen aus der nunmehr möglichen Großzügigkeit.

Der geringe Energiebedarf transistorisierter Empfänger - nur ein Viertel oder Fünftel desjenigen gleich leistungsfähiger Röhrengeräte - bedeutet eine beachtenswerte Entlastung der Energiewirtschaft. 1 Million nicht einmal sehr großer Röhrengeräte erforderte immerhin, gleichzeitig eingeschaltet, eine Leistung zwischen 80 MW und 100 MW, was einem respektablen Turbinengeneratorsatz entspricht.

Auch für den Rundfunkhörer wirkte sich der geringe Energiebedarf, zugleich die nach wenigen Volt zählende Betriebsspannung transistorisierter Geräte, einschneidend aus. Der Wunsch nach dem von der Steckdose unabhängigen Empfänger konnte nun endlich zufriedenstellend erfüllt werden. Batterien, wie man sie in Taschenlampen anwendet, reichen aus, einen Empfänger viele Tage zu betreiben.

Transistorisierte und in jüngster Zeit mit integrierten Schaltungen ausgerüstete Empfänger stehen in Wohnung und Wochenendhaus, sie werden im Kraftwagen mitgeführt, beim Camping und sogar auf Wanderungen benutzt. Noch wichtiger aber

wurde das Transistorradio für die Gegenden der Welt, wo es noch keine Stromversorgung gibt – das ist unter anderem in großen Teilen ehemaliger Kolonialgebiete der Fall. Viele Millionen Asiaten, Afrikaner, Südamerikaner erfahren fast nur durch ihren Transistorempfänger, was außerhalb ihrer engeren Heimat vorgeht.

UKW-Rundfunk war von der Konzeption her nicht nur, wie manchmal behauptet, eine Notlösung, um dem Sendergedränge im Mittelwellenbereich zu begegnen. Bereits Anfang der dreißiger Jahre wußte man, daß auf Ultrakurzwellen störungsfreie, hochwertige Übertragungen möglich sein würden. Auch Versuche wurden angestellt. «Radiobastler» von damals werden sich des Ultrakurzwellensenders Witzleben erinnern, der nach vielversprechenden Anfängen, wie die gesamte «zivile» UKW-Entwicklung, ein Opfer des zweiten Weltkrieges und seiner Vorbereitung wurde.

Vor gut 30 Jahren griff man die Arbeiten am UKW-Rundfunk wieder auf. Freilich ging es dabei auch um die Entlastung anderer Wellenbereiche. Vor allem aber wollte man durch ein im Mittelwellenbereich nicht anwendbares Modulationsverfahren, die Frequenzmodulation, störungsfreie und hochwertige Übertragungen Wirklichkeit werden lassen. Dies gelang so gut, daß die überwiegende Zahl der Hörer fast nur noch UKW-Sender empfing und die Tasten für die übrigen Wellenbereiche gar nicht mehr drückte.

Die Gründe lagen auf der Hand: Man mußte sich nicht mehr damit abfinden, daß, wie im Mittelwellenbereich, ein Teil des Tonspektrums einfach unterdrückt wurde. UKW-Kanäle konnten so breit festgelegt werden, daß sich auch die höchsten vom Ohr wahrnehmbaren Frequenzen übertragen ließen. Man hörte sie unbeeinträchtigt von atmosphärischen und industriellen Störungen, die im Mittelwellenbereich den Empfang oft kaum genießbar, den Empfang auf Langwelle ungenießbar gemacht hatten.

Zwar war das Programmangebot geringer als im Mittelwellenbereich, aber man entging dem berüchtigten «Wellensalat», bei dem man das fragwürdige

Vergnügen hatte, zwei oder mehr Sender gleichzeitig und von Pfeifötönen untermalt zu hören. Befürchtungen, die Verringerung des Programmangebots würde auf den Widerstand der Hörer stoßen, erwiesen sich als grundlos. «Lieber 10 Programme gut, als 50 schlecht» – so etwa könnte man die allgemeine Einstellung zusammenfassen.

## Stereo – Kunstkopf – Quadro

Technik kennt keinen Stillstand. Gerade die begehrteste «UKW-Qualität» ließ bald weitere Wünsche aufkommen.

Selbst wenn alle Frequenzen einer musikalischen Darbietung nahezu verzerrungsfrei wiedergegeben wurden, sie klang anders als im Konzertsaal. Das ist nicht verwunderlich, denn das Orchester im Saal ist räumlich verteilt, die «Akustik» des Aufnahmerraums trägt durch vielfache Reflexionen, durch Nachhall usw. wesentlich zum Klangbild bei. Aus dem Lautsprecher dagegen hören wir das Konzert wie durch ein Loch in der Wand oder allenfalls durch eine angelehnte Tür, weil Lautsprecher nahezu «punktförmige» Schallquellen sind.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, das zu ändern. Man verteilte mehrere Lautsprecher über eine größere Fläche, verzögerte einen Teil des Schalls oder strahlte ihn zur Reflexion an die Raumecke usw. Die Ergebnisse blieben bescheiden, ein musikalisches Ohr ließ sich nicht überlisten.

Dabei war längst eine bessere Lösung bekannt: Ordnet man jedem Instrument ein Mikrofon, einen Übertragungskanal und einen Lautsprecher (samt Verstärker!) zu, läßt sich eine räumliche, eine stereofone Wiedergabe erreichen. Wir können die Richtungen zu Schallquellen feststellen und hören, wo im Orchester ein Solist spielt oder ob sich – etwa während eines Hörspiels – eine Schallquelle von rechts nach links oder umgekehrt bewegt.

Für das praktische Anwenden ist dieses Verfahren ungeeignet. Man erhält jedoch Richtungsinformationen auch mit nur zwei geeignet konstruierten oder angeordneten Mikrofonen bzw. Mikrofon-

gruppen. Sie erzeugen Signale für einen «rechten» und einen «linken» Kanal. Jeder Kanal wird für sich übertragen, verstärkt und durch «rechte» und «linke» Lautsprecher wiedergegeben; gleich, ob es sich um stereofone Tonband-, Schallplatten- oder Rundfunkübertragung handelt.

«Per Draht», vom Plattenspieler oder Bandgerät aus, ist dieses Verfahren leicht durchführbar; die drahtlose Stereoübertragung jedoch bedurfte jahrelanger Vorarbeiten und Anstrengungen.

Der Sender darf bei stereofonen Darbietungen keinen breiteren Frequenzkanal beanspruchen als bei «monofonen», einkanaligen. Außerdem muß das gewählte Verfahren «kompatibel» sein. Der Eigentümer eines älteren Empfängers will Stereosendungen, wenn auch unter Verzicht auf Stereowirkung, ohne Qualitätseinbuße empfangen. Umgekehrt soll jedes stereotüchtige Empfangsgerät für die Aufnahme monofon ausgestrahlter Sendungen geeignet sein.

Das international eingeführte Pilottonverfahren erfüllt diese Forderungen. Der Sender strahlt dazu ein recht kompliziertes Signalspektrum aus. Es enthält das sogenannte Summensignal («rechts plus links») für ältere Empfänger, das Differenzsignal zur Gewinnung der Richtungsinformationen bei Stereoübertragungen und außerdem den über unserem Hörbereich liegenden und für die Signalaufbereitung unerläßlichen «Pilotton».

Über die mit Stereophonie erreichten Resultate brauchen wir keine Worte zu verlieren. Jeder kennt sie aus eigenem Erleben. Trotzdem suchte und sucht man nach weiteren, noch besseren Verfahren. Auch an der Stereophonie nämlich gibt es noch mancherlei auszusetzen.

Die optimale Wirkung einer Stereoanlage wird vom Anordnen der Lautsprecher im Raum und vom Sitzplatz des Hörers beeinflusst. Es genügt nicht, die Lautsprecherboxen aufzustellen, wo sich gerade Platz findet oder wo es «wirkungsvoll» aussieht.

Die Akustik des Aufnahmeraumes kommt immer noch zu kurz, denn der indirekte, von Wänden, Decke, Bestuhlung usw. reflektierte Schall wird nur

in geringem Maße mit übertragen. Unsere auf Entfernung-, Richtungs- und Lautstärkeunterschiede sehr fein reagierenden Ohren merken das.

Könnte man sie nicht bis in den Saal «verlängern»? Das ist der Grundgedanke der Kunstkopfstereophonie, der kopfbezogenen Stereophonie. Der «Kunstkopf» befindet sich im Aufnahmerraum und ist, vor allem in den äußeren Gehörorganen, dem menschlichen Kopf nachgebildet. Den Platz der Trommelfelle nehmen Mikrofone ein. Ihre Signale werden über je einen Kanal zum Hörer übertragen, der sich einen entsprechend geschalteten Kopfhörer überstülpt.

Das Ergebnis verblüfft. Die Akustik des Aufnahmerraumes wird nahezu entfernungs-, richtungs- und klangtreu wiedergegeben. Der Hörer fühlt sich tatsächlich akustisch in den Aufnahmerraum versetzt. Auch die drahtlose Übertragung bietet keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Die Kanäle für rechtes und linkes Ohr sind bei jedem Stereoreceiver verfügbar, sie können von jedem Stereoempfänger empfangen und verarbeitet werden.

Trotzdem wird die Kunstkopfstereophonie die Stereophonie nicht verdrängen, sondern nur ergänzen. Es ist nicht jedermanns Sache, Kopfhörer zu tragen und z. B. erleben zu müssen, daß sich bei einer Kopfbewegung der ganze Konzertsaal «mitdreht». Über Lautsprecher jedoch ist der Klangeindruck unbefriedigend, schlechter als bei Stereophonie. Auf der Senderseite müßte man für Stereophonie und Kunstkopfstereophonie getrennt produzieren, könnte aber das Programm nicht gleichzeitig in beiden Varianten ausstrahlen.

Ein in jüngster Zeit heiß umstrittenes Thema ist die Quadrofonie. Überträgt man nicht zwei, sondern vier Kanäle (daher der Name), kann man bei geeignetem Aufstellen der Mikrofone und der Wiedergabelautsprecher einen erheblichen Teil des indirekten Schalls erfassen und reproduzieren. Vorführungen auf Ausstellungen und Messen sind überzeugend. Bis zur eventuellen Einführung der Quadrofonie aber dürfte noch einige Zeit verstreichen.

Abgesehen von den Sende- und Studioeinrichtun-

gen wäre der Aufwand beim Empfänger erheblich: 4 Verstärker sind erforderlich, außerdem 4 Lautsprecher(gruppen), deren Aufstellung noch kritischer ist als bei Stereophonie.

Das Problem der Übertragungsbandbreite und der Kompatibilität stellt sich erneut und verschärft: Bei unveränderter Breite des UKW-Sendekanals müssen Quadrofoniesendungen mit Stereo- und Monoempfängern aufzunehmen sein. Entsprechende Vorschläge existieren, aber keiner ist technisch so ausgereift, daß er die Grundlage international zu vereinbarenden Normen bilden könnte.

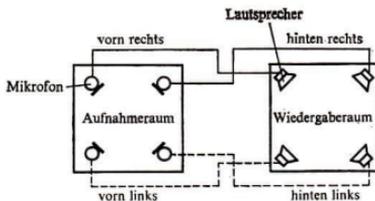
Einfacher liegen die Dinge bei Schallplatten- bzw. Tonbandquadrofonie. Aber selbst bei Schallplatten gibt es noch keine Einigung, und vor allem amerikanische und japanische Konzerne streiten um das (für sie . . .) beste Verfahren, wobei in den Kundeninformationen oftmals sachliche Information gegenüber reißerischer Werbung zurücktreten muß.

Sozialistische Länder sind auf dem Gebiet der Quadrofonie ebenfalls nicht untätig. Sie verfolgen die Entwicklungen aufmerksam und experimentieren systematisch, ohne überstürzte Festlegungen, die keinem nützen.

Die Bezeichnung Pseudoquadrofonie für eine Zwischenlösung ist keineswegs abwertend zu verstehen. Sie drückt lediglich aus, daß man eine sich der Quadrofonie nähernde Verbesserung des Klangerlebnisses vorerst unter Verzicht auf 4 Übertragungskanäle anstrebt.

Völlig fehlen Rauminformationen, indirekter Schall, auch bei Stereophonie nicht. Ein geringer Teil verbirgt sich im Stereosignalgemisch, kann überdies im Studio verstärkt beigefügt werden. Trennt man ihn beim Empfänger wieder ab, strahlt man ihn über weitere Lautsprecher wieder aus, kann der Klangeindruck verbessert werden. In Spitzengeräte ist ein «Quadroeffektzusatz» häufig bereits eingebaut.

Aufwendiger, aber wirkungsvoller ist eine Methode, die Sender und Empfänger einschließt. Auf der Senderseite werden direkter sowie indirekter Schall als elektrische Signale in einer sogenannten Matrixschaltung verschlüsselt und über die beiden Stereo-



*Grundanordnung der Mikrofone und Lautsprecher bei Quadrofonie*

kanäle übertragen. Eine umgekehrt wirkende Matrixschaltung trennt die einzelnen Signale wieder voneinander.

Eine Entscheidung, ob, wann und nach welchen Verfahren Quadrofonie eingeführt wird, ist noch offen. Sie könnte durch die Nutzung von Teilen der Kanalkapazität künftiger Fernsehsatelliten für den Hörrundfunk begünstigt werden.

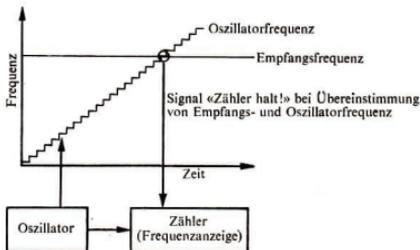
## Der Hörrundfunk-Empfänger wird «automatisch»

Es soll nicht viel Raum damit verschwendet werden, was viele Geräte an Automatik bereits zu bieten haben: Sensortasten, durch deren bloßes Berühren ein Sender eingestellt oder eine andere Bedienfunktion ausgelöst wird – automatische Scharfabstimmung, die ungenaue Abstimmung korrigiert – Uhren, die nicht nur die Zeit anzeigen, sondern uns mit Musik oder einem Summton wecken, sanft zunächst, Minuten später eindringlich, die Empfänger und Bandgerät zu wählbaren Zeiten ein- und ausschalten oder das Gerät durch eine «Einschlafaste» allmählich verstummen lassen usf.

Techniker begnügen sich nicht mit der akustischen Seite der Empfänger. Halbleitertechnik und Mikroelektronik eröffneten Möglichkeiten, die störanfällige «Mechanik» ebenfalls schrittweise abzulösen, z. B. bei Skale und Skalenantrieb.

Immer öfter begegnen uns Skalen, deren Zeiger durch einen wandernden Leuchtstrich, einer Thermometerskale ähnlich, ersetzt wurde. Halbleiterbauelemente, die sogenannten Leuchtdioden, haben dies ermöglicht.

Aber es muß nicht mehr unbedingt ein Skalenknopf gedreht werden. Dafür gibt es, besonders bei Kraftfahrern beliebt, den «automatischen Sender-suchlauf». Der Empfänger sucht den gewählten Empfangsbereich, wie UKW, von allein nach Stationen ab, die einwandfrei aufzunehmen sind. Hat er eine gefunden, bleibt die Abstimmung stehen.



*Eine Möglichkeit zur digitalen Frequenzanzeige: Ein «Oszillator» im Empfänger erzeugt eine sich rasch in kleinen Schritten ändernde Frequenz. Sobald diese mit der Empfangsfrequenz übereinstimmt, wird der mitlaufende elektronische Zähler angehalten und zeigt die Frequenz an*

Sagt das Programm nicht zu, genügt ein Knopfdruck, der nächste Sender wird eingestellt usw.

Digitale, ziffernmäßige Anzeige ging auch an der Empfängertechnik nicht vorbei. Konnte man nicht auf die Abstimmksale verzichten und dafür die eingestellte sowie empfangene Frequenz in Ziffern darstellen? Spitzengeräte erweisen, daß dies möglich ist. Die Empfangsfrequenz wird durch einen elektronischen Zähler gemessen. Er läuft blitzschnell, bis sein Stand mit der Empfangsfrequenz übereinstimmt, und zeigt diesen Stand als Frequenz oder Kanal an.

Auch die Umkehrung gewinnt, vor allem bei Empfängern für Funkdienste, an Bedeutung: Man «tipp» mit Tasten die gewünschte Frequenz, die Abstimmung läuft selbsttätig bis zur Übereinstimmung von gewählter und empfangener Frequenz.

Der Stereopilotton wird nebenbei dazu benutzt, den Empfang eines Stereoprogramms anzuzeigen oder den Empfänger von Stereo- auf Monoempfang oder umgekehrt zu schalten. Dieses Prinzip der «Kennfrequenzen» birgt viele Möglichkeiten. Strahlen (wie in Frankreich versuchsweise praktiziert) Sender z. B. vor Beginn der Nachrichten vom Empfänger zu entziffernde Kennfrequenzen aus, können die Hörer «stumm» in Bereitschaft gehalten werden, erst bei Beginn einer Nachrichtensendung wird der Lautsprecher «aufgedreht».

Ähnlich lassen sich angeschlossene Bandgeräte in Betrieb setzen, besonders wichtige Durchsagen ohne Rücksicht auf den gerade eingestellten Sender verbreiten usw. Man denkt sogar daran, bestimmte Programmgruppen durch Kennfrequenzen zu kennzeichnen. Wer z. B. Sport, klassische Musik, Informationen hören wollte, brauchte nur die entsprechende Taste zu berühren, der Empfänger böte ihm in automatischem Suchlauf nacheinander alle Sender an, die zur Zeit ein solches Programm ausstrahlen. Das ist jedoch noch Zukunftsmusik, bis zu deren Uraufführung, sofern sie überhaupt stattfindet, einige Jahre vergehen dürften.

In mehreren Ländern werden Kennfrequenzen schon heute angewandt, um Kraftfahrer zu informieren, was sie unterwegs erwartet. Vor und nach

jeder Verkehrsdurchsage werden Kennfrequenzen ausgestrahlt. Das Auswerten kann auf verschiedene Weise erfolgen, indem der Lautsprecher z. B. nur für Durchsagen eingeschaltet wird, oder indem das laufende Programm, gleich von welchem Sender, außerdem für Durchsagen anderer Stationen unterbrochen wird.

Auch ist durch eine (andere) Kennfrequenz unterscheidbar, welche Sender überhaupt Verkehrshinweise geben. Drückt der Kraftfahrer die zugehörige Taste, sucht sein Gerät beim Einfahren in ein neues Gebiet automatisch den für Verkehrshinweise zuständigen Sender.

Seit langem fragen Fachleute: Könnte man den Mittelwellenbereich nicht wieder attraktiv machen? Die Zahl der Mittelwellenkanäle ist begrenzt – es sind nicht mehr als 120. Daher wird jeder Kanal von mehreren Stationen benutzt. Gegenseitige Beeinträchtigungen bleiben nicht aus, denn auch leistungsschwache Mittelwellensender können nachts bei den Frequenzmitbenutzern über Tausende Kilometer «durchschlagen».

Zur Erhöhung der Kanalzahl scheint sich der in Trägerfrequenz- und Kurzwellentechnik bewährte Einseitenbandbetrieb anzubieten, durch den sich die Kanalzahl verdoppeln würde. Seit Jahren werden seine Möglichkeiten auf Anwendungen im Mittelwellenbereich untersucht. Die Resultate sind bisher wenig aussichtsreich.

Um die Empfänger weiter benutzen zu können, wäre für längere Zeit ein kompatibles Verfahren nötig. Weder existiert es, noch sind einfache Zusatzeinrichtungen zum Nachrüsten der Empfänger in Sicht.

Ebenso steht es um Versuche, auf den Seitenbändern eines amplitudenmodulierten Senders zwei voneinander unabhängige Programme auszustrahlen, oder um Erwägungen, Stereoübertragungen auf Mittelwellen dadurch zu verwirklichen, daß man bei einem Sender gleichzeitig Amplituden- und Frequenzmodulation anwendet.

Erst die Zukunft kann entscheiden, ob und wann eine «Renaissance» des Mittelwellenbereichs kommen wird.

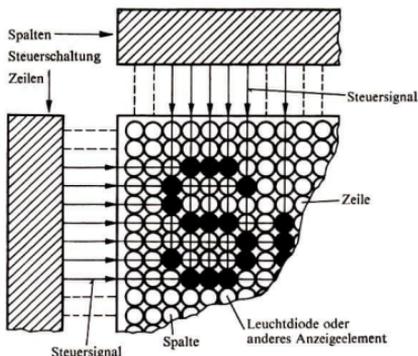
## Der Fernsehempfänger kann mehr

Es soll hier nicht auf Dinge eingegangen werden, die seit Jahren selbstverständlich sind: Druck- oder Sensortasten zur Kanalwahl, drahtlose Fernbedienung, Zuschaltmöglichkeiten für Zweitlautsprecher oder Kopfhörer und anderer Bedienkomfort prägen das Bild des modernen Fernsehempfängers. In seinem Inneren herrschen Halbleiter, integrierte Schaltkreise, mit wenigen Handgriffen auswechselbare Bausteine vor, erhöhen die Zuverlässigkeit, vereinfachen und verkürzen die seltener gewordenen Reparaturen.

Geliebt ist, wenn auch stetig verbessert, die Bildröhre. Bildschirmgröße und ihr «Hals» bestimmen nach wie vor Abmessungen und Gestalt des Fernsehempfängers. Ließe sich die Bildröhre etwa zu einem «dicken Bildschirm» zusammendrücken, könnte man sie (wie auch den Lautsprecher) an günstiger Stelle im Raum aufstellen oder aufhängen. Der «Kasten» des Fernsehempfängers schrumpfte zu einem kleinen, flachen Steuergerät, wie wir es von Stereoanlagen kennen.

Bis heute blieb dieser Wunsch vieler Fernsehzuschauer (und auch der Innenarchitekten) unerfüllt. Alle Versuche, eine «flache» Bildröhre unter Beibehaltung des schreibenden Elektronenstrahls zu entwickeln, schlugen letztlich fehl. Nur Abkehr von diesem Prinzip kann zum Erfolg führen. Man strebt sie auch aus anderen Gründen an, von denen – abgesehen von der recht komplizierten Technologie heutiger Bildröhren – einer auch dem Nichtfachmann sofort einleuchtet: Die geringe Betriebsspannung von Halbleiterbauelementen und integrierten Schaltkreisen steht in schroffem Widerspruch zur Hochspannung von über 10 kV, die eine Bildröhre benötigt. Fernsehempfänger würden einfacher, wenn man auf die zusätzliche Hochspannungserzeugung im Empfänger verzichten könnte.

In vielen Ländern und Instituten steht die Ablösung der herkömmlichen Bildröhre auf der Liste der elektronischen Forschungs- und Entwicklungsthemen. Meistens geht man von der Leuchtdiode aus, einem Halbleiterbauelement, das bei Anlegen



*Zum Prinzip des «flachen» Bildschirms: Ausschnitt aus einer Anzeigeanordnung mit Leuchtdioden. Es leuchten nur Dioden auf, die gleichzeitig von einem Steuersignal «Spalte» und einem Steuersignal «Zeile» getroffen werden*

einer Spannung von einer nahezu punktförmigen Fläche Licht unterschiedlicher Farbe ausstrahlt. Einen Leuchtdiodenbildschirm kann man sich als rechtwinkliges dichtes Gitter vorstellen, an dessen Kreuzungspunkten die Dioden angebracht sind. Je nachdem, welche Dioden man durch elektrische Spannungen ansteuert, erscheinen auf einer solchen Diodenmatrix aus Punkten zusammengesetzte Linien, Zeichen oder Bilder.

Erste Bildschirme dieser Art existieren. Sie sind allerdings nur für einfache Zeichenwiedergabe geeignet, enthalten sie doch vorerst nur 10000 integrierte Leuchtdioden gegenüber ungefähr 50000 Bildelementen eines Schwarzweiß-Fernsehbildes. Auch Farbwiedergabe und Helligkeit sowie die Verfahren der Diodensteuerung genügen noch nicht den Ansprüchen.

Auf Bildschirmen im Heim erscheint heute durchaus nicht immer nur das Fernsehprogramm. Die Mikroelektronik mit ihren schier unerschöpflichen Möglichkeiten gestattet es, das Spektrum der auf dem Bildschirm erscheinenden Informationen zu erweitern.

So leuchtet z. B. auf Wunsch bei manchen Geräten in einer Bildschirmecke die Kanal- oder Programmnummer auf. Auch die Uhrzeit läßt sich in das laufende Programm einblenden. Eine Quarzuhr im Empfänger erzeugt die dazu notwendigen Signale (die einfachere Lösung, die Uhr über die Synchronisierimpulse des Senders zu steuern, scheidet aus – bei Sendeschluß bliebe die Uhr stehen).

Erwähnt seien auch die «Bildschirmspiele». Mit handlichen Zusatzgeräten ausgestattete Teilnehmer können auf dem Bildschirm Leuchtpunkte oder Symbole hin- bzw. herflitzen lassen und so z. B. Tischtennis, Tennis, Billard usw. «spielen». Über den Nutzen kann man streiten – kaum aber darüber, daß der Tennisplatz in Originalgröße gesünder ist.

Am Ende jeder Zeile und jedes Bildes wird der Elektronenstrahl der Bildröhre für einige Mikrosekunden abgedunkelt, «ausgetastet», und an den Anfang der nächsten Zeile bzw. des nächsten Bildes zurückgeführt. In dieser Austastlücke werden die

Synchronisierimpulse übertragen, ohne sie jedoch völlig auszufüllen. Es liegt nahe, den freibleibenden Rest für die Übermittlung zusätzlicher Informationen auszunutzen.

Technische Verfahren hierfür sind bekannt und werden seit mehreren Jahren in Großversuchen erprobt.

Das britische Teletextsystem z. B. ordnet in die Austastlücken verschlüsselte Kurzinformationen ein – Verkehrshinweise, Wetterberichte, Sportresultate, Programmübersichten usw. Der Fernsehteilnehmer, dessen Gerät über eine entsprechende Zusatzeinrichtung verfügt, kann sie abrufen und auf dem Bildschirm lesen.

Untertitel für fremdsprachig gesendete Filme lassen sich einblenden. Man kann – wichtig für das künftige Satellitendirektfernsehen – den Begleiton in mehreren Sprachen zugleich mit Hilfe der Austastlücken übertragen, während der Zuschauer sich die ihm verständliche Sprache aussucht.

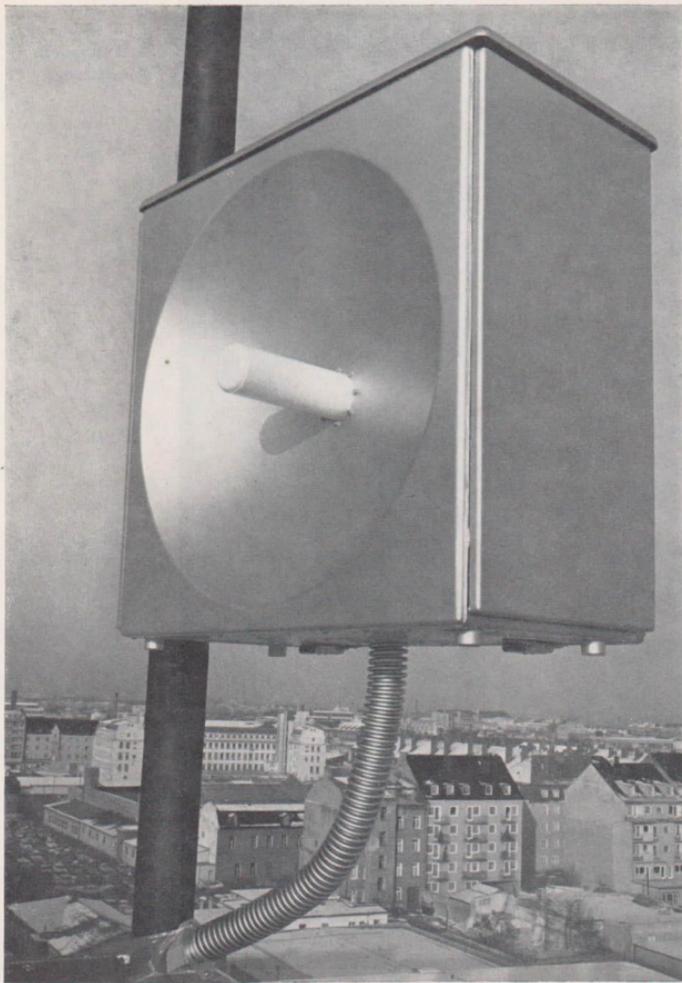
Noch weiter geht das gleichfalls britische Viewdatasystem. Bei ihm ist der Fernsehteilnehmer zusätzlich über das Fernsprechnetz mit Computern und Datenbanken verbunden, bei denen er Informationen vom Fahrplan bis zum Kochrezept, von Kleinanzeigen bis zu Literaturstellen, von Warenangeboten bis zu Fernlehrgängen erhalten kann. Vor allem durch Verknüpfen mit dem Kabelfernsehen könnte dieses Verfahren allgemein große Bedeutung erlangen.

## Auf Dächern – unter Straßen

Ein Wohnhaus ohne Fernsehantenne ist heute fast eine Rarität; mit Fernsehantennen gespickte Dächer ziehen kaum noch Blicke auf sich. Architekten und Fernseh Technikern sind die wuchernden Antennenwälder längst ein Dorn im Auge – jenen wegen verschandelter Dächer und Fassaden, diesen wegen des hohen Materialverbrauchs, des raschen Verschleißes und der trotzdem oft unbefriedigenden Empfangsergebnisse.

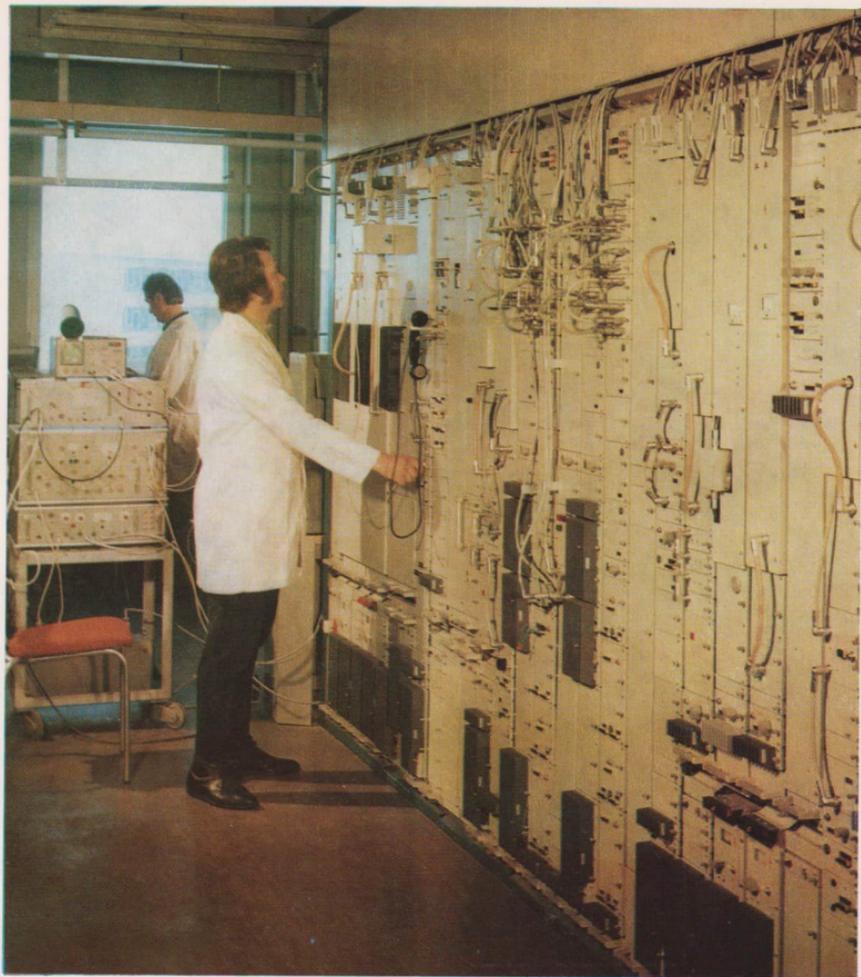


*Fernsehtürme  
erfüllen meistens  
auch Aufgaben  
der Richtfunk-  
technik*



*Sender,  
Empfänger und  
Antenne in einem  
Gehäuse: Erst die  
Mikroelektronik  
machte solche  
Verringerungen  
der Abmessungen  
bei Richtfunk-  
strecken möglich*

*«Elektronik-  
Konzentrat»: An-  
lagen der Richt-  
funktechnik*





*Moderne Empfangsgeräte sind aus leicht auswechselbaren «Modulen» zusammengesetzt; sie werden auf «Herz und Nieren» geprüft*

*Die Empfänger sehen wieder «technischer» aus: Ausschnitt aus der Frontplatte eines HF-Stereo-Steuergerätes*

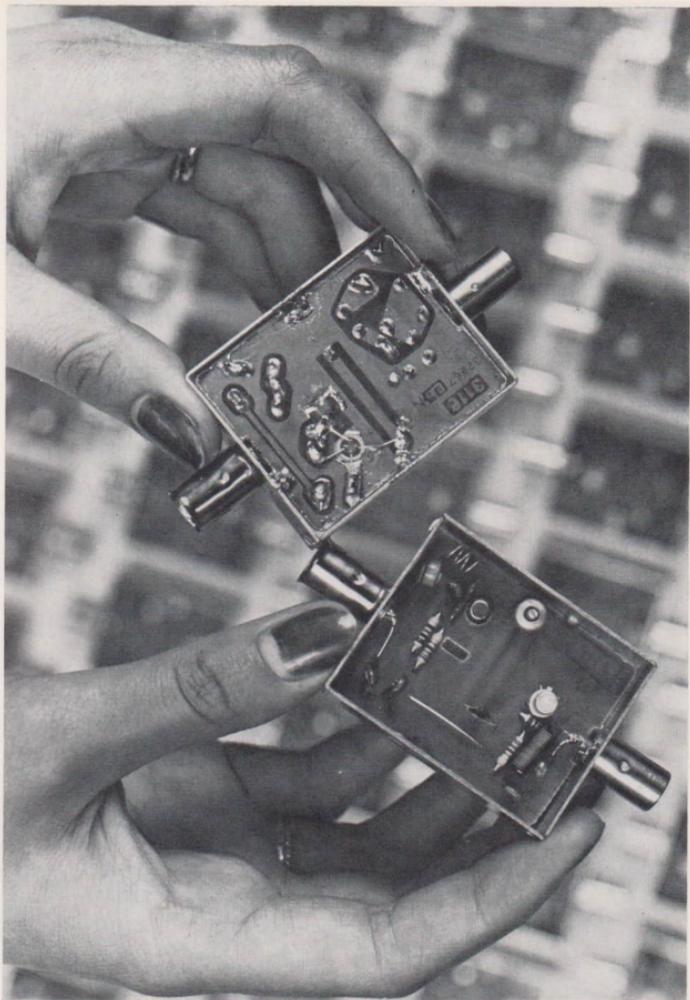
*Vor 50 Jahren genügte ein Meßinstrument für die Empfängerprüfung . . . Hier ein moderner Stereospitzenempfänger bei Laboruntersuchungen*





*Kompakt-Stereoanlage, bestehend aus Rundfunkteil, Plattenspieler und Kassettenteil*

*Einst wogen Antennenverstärker mehrere Kilogramm. Heute könnten wir einen UHF-Antennenverstärker in der kleinen Tasche unterbringen*





*Eine Erdefunk-  
stelle im Bau –  
Aufsetzen des  
Parabolreflektors*

Vor allem Fernsehteilnehmer in Städten wissen davon ein Lied zu singen. Brachte ihnen einst eine einfache Antenne guten Empfang, wurde es mit zunehmender Fernsehdichte immer schwieriger, noch einen günstigen Antennenstandplatz auf Dach oder Dachboden zu finden.

Neue Hochhäuser, Industriebauten usw. verschlimmerten die Situation. Wellenabschattungen und «Geisterbilder» durch Umwege und Reflexionen der Wellen machten in manchen Gebieten einwandfreien Fernsehempfang nahezu unmöglich.

An den Außenmauern moderner Wohnblocks sind kaum noch Antennenkabel zu entdecken. Auch das Antennengewirr auf den Dächern hat sich gelichtet. Ein Standrohr trägt Fernsehantennen für VHF- und UHF-Kanäle, die Antenne für UKW-Hörfunk und für die Sender der übrigen Wellenbereiche. Man muß nämlich nicht unbedingt jedem Empfänger «seine» Antenne geben. Seit Jahrzehnten werden in vielen Funkstationen sämtliche Empfänger an einigen wenigen Antennen betrieben, ohne sich zu stören. Dieses Prinzip, auf die Unterhaltungselektronik übertragen, führte zur Gemeinschaftsantenne. Sie kann Hörfunk- und Fernsehgeräte eines ganzen Häuserblocks versorgen.

Die Vorzüge liegen auf der Hand. Zwar ist eine Gemeinschaftsantenne teurer als die Einzelantenne, doch der Kostenanteil der Teilnehmer sinkt mit der Zahl der angeschlossenen Empfänger und unterschreitet bald den Aufwand für eine individuelle Antennenanlage.

Die Materialersparnis ist erheblich, einmal wegen des von vornherein geringeren Bedarfs; zum anderen, weil im Hausinneren verlegte Antennenkabel nicht verrotten und infolgedessen nicht nach wenigen Jahren ausgewechselt werden müssen. Vor allem aber kann man hocheffektive sowie auch aufwendige Antennen einsetzen.

Im Prinzip gleichen sich alle Gemeinschaftsantennen-Anlagen. Die Signale von Fernseh- und Hörfunkantennen erreichen zunächst Antennenverstärker, Hochfrequenzverstärker, die möglichst nahe den Antennen auf dem Dachboden installiert sind, alle interessierenden Frequenzbereiche verstärken

und jahraus-jahre in nahezu wartungsfrei im 24-Stunden-Betrieb laufen.

Vom Antennenverstärker führen «Stammleitungen» durch den Wohnblock. An sie sind, oft über abzweigende «Stichleitungen», die Antennensteckdosen in den Wohnungen angeschlossen. «Entkoppellglieder», aus wenigen Bauelementen bestehend und in die Steckdosen eingebaut, verhindern gegenseitige Störungen der Empfänger.

Dezimeterwellen zu verstärken und in viele Wohnungen zu verteilen, bereitete anfänglich Schwierigkeiten. Mit einem technischen Kunstgriff wurden sie umgangen: Man verstärkte die empfangenen Signale der UHF-Kanäle im Antennenverstärker nicht nur, sondern setzte sie auf niedrigere, leichter beherrschbare Frequenzen um – in VHF-Kanäle, in denen am Empfangsort kein Sender einfiel. In diesen Kanälen wurde das Programm im Hause verteilt.

Das hatte einen weiteren Vorteil: Besitzer älterer Fernsehempfänger mußten nicht auf UHF-Empfang verzichten oder ihrem Gerät einen Konverter vorschalten. Die Umsetzung VHF/UHF übernahm für sie der Konverter der Gemeinschaftsantenne.

Heute können wir zwar meistens auch das UHF-Programm ohne Umsetzung vom Antennenverstärker beziehen; die Methode selbst aber hat von ihrer Bedeutung nichts eingebüßt. Wenn man künftig zu noch höheren Fernsehfrequenzen übergeht, wird man am «Verbrauchsort» wieder auf Kanäle niedrigerer Frequenz konvertieren müssen. Vor allem wird das nötig sein, wenn das Satellitendirektfernsehen eingeführt wird.

Der Benutzer einer Gemeinschaftsantenne hat nicht mehr zu tun, als sein Gerät mit der Antennensteckdose zu verbinden. Was das bedeutet, kann jeder erlernen, der mit seiner Antenne das Dach absuchte, und zuletzt doch nicht sicher war, wirklich den besten Standort gefunden zu haben.

Trotzdem ist auch die Gemeinschaftsantenne für ein Haus oder einen Wohnblock nicht in jedem Falle die beste Lösung, z. B. dann nicht, wenn in der Nachbarschaft noch höhere Bauten entstehen und ihrerseits den Empfang beeinträchtigen.

Hier hilft der Übergang von der Gemeinschaftsantenne zur Großgemeinschaftsantennenanlage («GGA»). Sie speist von einem optimalen Empfangsort aus über Kabel, die wie Strom- oder Fernmeldeleitungen unter dem Pflaster verlegt sind, ein Wohngebiet oder einen ganzen Ort.

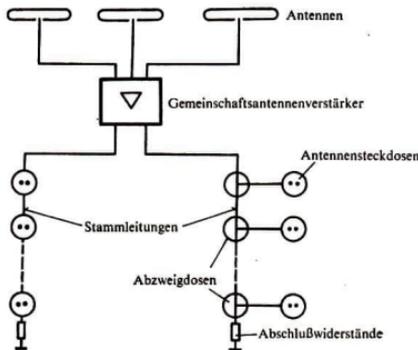
Die Ausdehnung des Kabelnetzes erreicht oftmals viele Kilometer. Man muß daher, wie in der Trägerfrequenztechnik, in Abständen Verstärker in die Leitungen einfügen. Jeder Teilnehmer, ob am Anfang oder am letzten Zipfel des Netzes, empfängt gleichbleibend gute Signale. Anlagen für mehrere Tausende Teilnehmeranschlüsse bewähren sich seit Jahren auch in der DDR.

Eine Großgemeinschaftsantennenanlage bietet jedoch noch mehr:

- Mit ausgeklügelten, teilweise auf hohen Gittermasten (bis > 200 m!) installierten Antennen «bring» sie Sender, die wegen ihrer Entfernung mit üblichen Antennen nicht aufnehmbar wären.
- Die Einspeisung künftiger Satellitenprogramme ist unproblematisch, die anteiligen Kosten je Teilnehmer bleiben auch bei sehr leistungsfähigen Empfangsanlagen gering.
- Das Einbeziehen von Normwandlern in die Anlage erschließt (z. B. in den Grenzbereichen DDR/VR Polen bzw. ČSSR) den Empfang von nach anderer Norm arbeitenden Fernsehsendern mit normalen Fernsehempfängern.
- Eine Großgemeinschaftsantennenanlage läßt sich leicht in ein Kabelfernsehtsystem integrieren oder zu einem solchen erweitern.

Damit fiel das nächste Stichwort: «Kabelfernsehen». Es ist seit Jahren nicht nur im Gespräch, sondern Realität, vor allem in Nordamerika, wo Systeme mit über 10000 Teilnehmern und von mehr als 800 km Kabellänge existieren.

Wir können uns Kabelfernsehen vereinfacht als Großgemeinschaftsantennenanlage vorstellen, über deren Verteilernetz nicht nur von Fernsehsendern empfangene, sondern auch örtlich produzierte Programme laufen. Das ist möglich, weil die angebotenen drahtlosen Fernsehprogramme die Über-



*Schema einer einfachen Gemeinschaftsantennenanlage*

tragungskapazität der Kabel selten ausschöpfen; ein Teil des verfügbaren Frequenzspektrums bleibt ungenutzt. Er wird beim Kabelfernsehen gefüllt.

Technisches Zentrum jedes Kabelfernsehensystems ist die Kopfstation. Hier sind, außer den Verstärkern und Verteilern im Kabelnetz, alle technischen Einrichtungen konzentriert:

Von der Antennenanlage kommen die Signale der Fernsehsender und von UKW-Hörrundfunkstationen, deren Programme ebenfalls über das Kabelfernsehnetz verteilt werden.

Hier stehen Videorecorder und Filmgeber, um gespeicherte Programme übertragen zu können.

Häufig sind in der Kopfstation auch die Studioeinrichtungen für die Produktion lokaler Programme untergebracht; wenn nicht, bestehen Verbindungen zu solchen Studios.

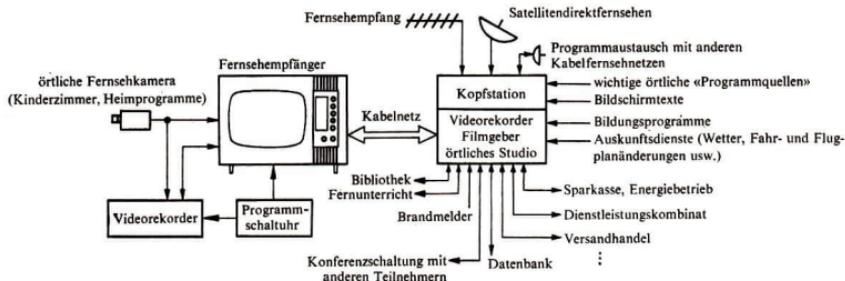
Signale der Satellitendirektübertragung werden empfangen und zur Verteilung aufbereitet.

Es gibt, z. B. über Richtfunkstrecken, Verbindungen zum Programmaustausch mit anderen Kabelfernsehensystemen, Direktleitungen zu Nach-

richtenagenturen, Wetterdienststellen, Sportredaktionen, Stadien, Konzertsälen usw.

Nicht zuletzt aber wird von der Kopfstation aus das ganze Netz gesteuert, überwacht, werden auftretende Fehler lokalisiert.

Das alles ist kostenaufwendig. In kapitalistischen Staaten, die mit dem Kabelfernsehen begannen, werden Kosten und erstrebter Gewinn dem Teilnehmer auferlegt. In den USA z. B. zahlt er neben der einmaligen hohen Anschlußgebühr monatliche Programmgebühren, die ganz erheblich sind. Die Rechnung der Konsortien, die Kabelfernsehensysteme einrichteten, ging zunächst auf. US-Fernsehteilnehmer, bislang auf zwar kostenloses, aber fast ausschließlich durch Werbung finanziertes Fernsehen angewiesen, zahlten gern für Sendungen, die nicht aller zwei Minuten durch Werbespots unterbrochen wurden. Inzwischen allerdings klagen auch sie. Kabelfernsehen wird schließlich gleichfalls kommerziell betrieben, es soll Geld bringen. Die Programmqualität rückt dabei zunehmend in den Hintergrund.



*Kabelfernsehen vervielfacht die Möglichkeiten des Fernsehhempfängers*

## Kabelfernsehen – nur Einbahnstraße?

Meistens sind nicht alle vom Kabelfernsehen angebotenen Kanäle zur Verteilung drahtlos empfangener oder regional bzw. örtlich gestalteter konventioneller Fernsehprogramme vorgesehen. Was fängt man mit den noch freien Kanälen an?

Zahlreiche Möglichkeiten tun sich auf. Unter ihnen ist für uns z. B. die von «Bildungskanälen» besonders attraktiv:

Ihre Sendungen könnten den Schulunterricht wirkungsvoll unterstützen und beleben; sie könnten Lehrgänge zur Erwachsenenqualifizierung übertragen, vom Sprachkurs bis zum Mathematikunterricht, von der «Hobbyberatung» bis zum Fernsehabitur, vom populärwissenschaftlichen Wissenschafts- und Technikmosaik bis zur postgradualen Fortbildung abgegrenzter Berufsgruppen.

Schulen, Institutionen, individuelle Teilnehmer könnten die Sendungen unmittelbar verwerten oder auf Videorecordern zur späteren Nutzung oder Wiederholung speichern.

In weiteren Kanälen könnten, ständig periodisch wiederholt und jeweils aktualisiert, die neuesten Schlagzeilen auf den Bildschirm geschrieben werden. Ähnlich würde ein Regionalkanal über Wetter, lokale Ereignisse, Sport, Kulturveranstaltungen usw. informieren.

Auskünfte über Fahr- und Flugpläne, eventuelle Änderungen oder Verspätungen könnten ebenso erteilt werden wie Informationen über Angebote des Handels bis zu den dazugehörigen Kochrezepten.

Die technische Seite dieser Möglichkeiten kann im Prinzip als gelöst betrachtet werden; ihre Nutzung steckt noch in den Anfängen. Die Techniker aber komponieren bereits weitere Zukunftsmusik. Ihr Standpunkt: Bisher ist ein Kabelfernsehensystem ein Netz von Einbahnstraßen, auf denen Informationen nur von der Kopfstation zum Konsumenten fließen. In Zukunft soll aus der Einweg- eine Zweigwegverbindung werden; der bisherige Informationskonsument wird Kommunikationspartner werden.

Technisch wäre dies schon heute machbar. Mit

Verfahren der modernen Nachrichtenübertragung, z. B. der Pulsmodulation, ließen sich im Kabelfernsehensystem weitere Informationen übermitteln, und zwar in beiden Richtungen. Sollte eines Tages die Übertragungskapazität gegenwärtiger Hochfrequenzkabel trotzdem nicht mehr ausreichen, könnten Glasfasern ihren Platz einnehmen.

Was vielen Technikern heute vorschwebt, ist ein Heimkommunikationszentrum. Dank der Mikroelektronik würde es leistungsfähiger, kleiner, zuverlässiger und energiesparemer sein als ein «Musikschrank» von 1950. In ihm werden die Programme vom Hörfunk- und Fernsehempfänger aufgenommen, wiedergegeben oder mit Hilfe von Schaltuhren oder Kennfrequenzen gespeichert. Es verarbeitet die Signale von elektronischen Kleinkameras im Kinderzimmer oder auf dem Spielplatz, es vermittelt über die Tasten seines Bediengerätes die Kommunikation nach außen. Der Teilnehmer kann:

- bei Datenbanken Informationen abrufen, kann sozusagen in einem umfassenden und stets aktuellen elektronischen Lexikon nachschlagen;
- in einem Rechenzentrum die Resultate kniffliger Berechnungen anfordern, von der Steuerabrechnung bis zur Differentialgleichung;
- in Bibliotheken Bücher anfordern oder Kopien von Seiten, Auszüge, Zeichnungen usw., die ihm zum Lesen oder Speichern übermittelt werden;
- beim Versandhandel Waren bestellen, die er sich vorher auf dem Bildschirm vorführen ließ;
- aus einem «Bildungsspeicher» seinen speziellen Lehrgang abrufen, Lösungen von Kontrollaufgaben eingeben oder Rückfragen stellen;
- seinen Kontostand erfahren, seine Gas-, Strom- und Wasserrechnung elektronisch ablesen und den Betrag abbuchen lassen;
- bei einer Reise Rauch-, Brand- oder Einbruchsmelder mit einer Zentrale verbinden lassen;
- vielleicht auf Briefe oder Dienstreisen verzichten, weil er sich mit Partnern in einer Konferenzschaltung «per Auge und Ohr» verständigen kann.

# Funkwellen aus dem Weltraum

Die hellhörigsten Ohren der Welt 125  
«Himmelsgeflüster» 127  
C E T I 131

## Die hellhörigsten Ohren der Welt

Einem Raumschiff einer fernen Zivilisation, nahe unserem Sonnensystem unterwegs, würde der Radiolärm des «blauen Planeten» auffallen, ein Gemisch aus zahllosen, an Bord vielleicht schwer entschlüsselbaren, aber zweifellos von intelligenten Wesen erzeugten Funksignalen. Sie könnten Anlaß sein, sich den Planeten Erde näher anzusehen.

Umgekehrt erreichen uns fortwährend Radiowellen von außerirdischen Quellen. Sie wurden bald nach der Jahrhundertwende vorausgesagt und um 1930 nachgewiesen. Seit 1946 werden sie systematisch erforscht. Als neue Wissenschaftsdisziplin entstand die Radioastronomie. Aus ihren Resultaten zieht auch die Raumfahrt größten Nutzen für die unentbehrlichen und vielfältigen Verbindungen mit der Erde, und sie trägt dazu bei, reale von utopischen Möglichkeiten einer Kontaktaufnahme mit «außerirdischen Intelligenzen» zu trennen.

Allerdings können nicht alle Radiowellen die Erdatmosphäre durchdringen. Sehr kurze Wellen werden durch Gase und Dämpfe in der Troposphäre (bis etwa 10 km Höhe) nahezu verschluckt, Wellen über etwa 20 m Länge werden durch die Ionosphäre (ab etwa 60 km Höhe) reflektiert oder stark gedämpft. So bleibt für Radiowellen von der Erde zum Weltraum umgekehrt nur ein atmosphärisches «Radiofenster», das sich von

Wellenlängen um 1 cm (30 GHz) bis um 20 m (15 MHz) erstreckt. Es läßt sich durch technische Maßnahmen nicht vergrößern; immerhin ist es, wenn wir vom Verhältnis zwischen niedrigster und höchster Frequenz ausgehen, ungefähr tausendmal breiter als das «optische» Fenster, durch das Astronomen den Weltraum beobachten.

Radiowellen aus dem Weltraum erreichen uns stets mit äußerst geringer Intensität: vieltausend-, ja millionenfach schwächer als die Signale, die eine Antenne von Hörfunk- oder Fernsehsendern aufnimmt. Das ist verständlich: Die natürlichen Radioquellen, für die sich Radioastronomen interessieren, liegen meistens in größten – eben in «astronomischen» – Entfernungen. Raumflugkörper sind uns zwar näher, doch ist ihre Sendeleistung aus technischen Gründen vorerst noch recht begrenzt. Für interplanetare Sonden trifft sogar beides zu: geringe Sendeleistung bei rasch wachsender Entfernung.

Diese Hürden können nur durch extrem leistungsfähige Bodenstationen genommen werden. Sie bestehen im wesentlichen aus einer Antennenanlage und einer höchstempfindlichen Empfangsapparatur.

Die nötige Empfängerempfindlichkeit läßt sich nicht durch eine große Zahl von Verstärkerstufen allein erreichen. Zwar bereitet millionenfache elektronische Verstärkung keine unüberwindlichen Schwierigkeiten; doch es existiert eine Grenze

nach unten. Damit Signale überhaupt verstärkt werden können, müssen sie die «Anschwelle» des Empfängers oder Verstärkers überschreiten. Ihre Ursache sind unregelmäßige, in einem sehr breiten Frequenzbereich und ständig vorhandene Störsignale, die z. B. von der Antenne aufgenommen werden, im Empfänger selbst entstehen und sich in einem angeschlossenen Lautsprecher als Rauschen bemerkbar machen (es ist zu hören, wenn wir einen Empfänger zwischen zwei Sendern voll «aufdrehen»). Signale können im allgemeinen nur erkannt werden, wenn sie nicht im Rauschen «untergehen».

Besonders kritisch ist der Rauschanteil der ersten (also mit der Antenne verbundenen) Empfängerstufe. Dieses Rauschen wird nämlich von allen folgenden Stufen wie ein Nutzsignal mit verstärkt. Es kommt daher darauf an, das Rauschen der ersten Stufe möglichst niedrig zu halten. Das gelingt mit Bauelementen und Anordnungen, die nach jahrelangen Mühen eigens für rauscharme Verstärker geschaffen wurden. Zwei erlangten besondere Bedeutung:

Im parametrischen Verstärker wird mit Hilfe einer speziellen Halbleiterdiode und periodisch zugeführter elektrischer «Pumpenergie» eine Verstärkung der an einem Schwingungskreis auftretenden sehr schwachen Nutzsignale erreicht. Bereits bei Zimmertemperatur ist das Rauschen des parametrischen Verstärkers gering. Es kann noch be-

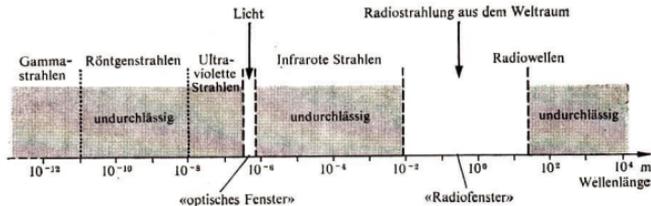
deutend vermindert werden, wenn man die Anordnung z. B. durch flüssigen Stickstoff kühlt.

Im MASER (entstanden aus: microwave amplification by stimulated emission of radiation; Mikrowellenverstärkung durch angeregte Strahlungsemission) werden durch die eintreffenden Signale in einem Kristall Elektronenschauer ausgelöst – auch das läuft bei geeignetem Anordnen auf eine Verstärkung hinaus. Der mit flüssigem Helium gekühlte MASER arbeitet gleichfalls extrem rauscharm. Übrigens hat sein «optischer Bruder» in den letzten Jahren Weltberühmtheit erlangt. Es ist der inzwischen in viele Bereiche der Wissenschaft und Technik eingezogene LASER.

Antennen für Radiowellen aus dem All sind stets Richtantennen. Sie sollen einerseits möglichst viel Radiostrahlung einfangen, andererseits aber durch Funksignale und Störungen irdischen Ursprungs möglichst wenig beeinflusst werden. Außerdem verlangen die Radioastronomen ein hohes Auflösungsvermögen. Die Antenne soll punktförmige Radioquellen auseinanderhalten können, die nur einen geringen Winkelabstand haben.

Ein Maß für die von der Antenne aufgenommene Leistung ist der Antennengewinn. Er gibt an, um wieviel größer die Leistung am Empfängerzugang wird, wenn statt einer Vergleichsantenne ohne jede Richtwirkung eine Richtantenne benutzt wird.

Besonders häufig werden für den Empfänger kos-



*Nur ein kleiner Teil der elektromagnetischen Wellen aus dem Weltraum erreicht die Erdoberfläche*

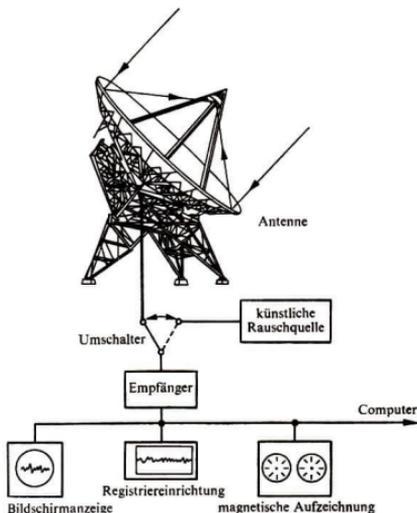
mischer Radiowellen, gleich, ob von natürlichen oder künstlichen Quellen ausgestrahlt, Parabolantennen verwendet. Ein paraboloidförmiger Hohlspiegel, aus Metallblechen oder einem engmaschigen Metallgitter angefertigt, fängt die Strahlung auf und reflektiert sie zu einem «Brennpunkt», in dem die eigentliche, z. B. trichterähnliche Empfangsantenne angeordnet ist. Gewinn und Auflösungsvermögen steigen mit den Antennenabmessungen gegenüber der Wellenlänge der aufzunehmenden Strahlung. Eine Parabolantenne von 10 m Durchmesser z. B. hat bei 50 cm Wellenlänge einen Gewinn um 5000, bei einem 50-m-Paraboloid von etwa 120000. Das Auflösungsvermögen wächst nicht so stark; für sehr hohes Auflösungsvermögen sind die Radioastronomen daher auf eine andere Antennenart (s. u.) angewiesen.

Schwenkbare Parabolantennen für die Radioastronomie erreichen gegenwärtig Durchmesser um 100 m. Die exakt und oft selbsttätig zu bewegende Masse nähert sich dabei der Masse eines Güterzuges. Trotz Winddruck, Temperaturschwankungen usw. muß das Paraboloid seine Form genauestens beibehalten – insgesamt also eine ingenieurtechnische Leistung ersten Ranges.

Antennen für Signale von Satelliten und Raumstationen auf der Umlaufbahn sind zwar in ihren Ausmaßen oft bescheidener, stehen ihren großen Verwandten aber in Exaktheit nicht nach.

### «Himmelsgeflüster»

Radioteleskope nennt man, in Anlehnung an optische Instrumente, die aus Antennen und Empfangsapparaturen zusammengesetzten Anlagen der Radioastronomie. Die von ihnen eingefangenen Signale sind mit denen von Funksendern überhaupt nicht vergleichbar. Ein leises Rauschen, dessen Intensität von Herkunftsrichtung und Frequenz abhängt, ist meistens alles, was den Radioastronomen angeboten wird. Tauchen deutlich aus dem Rauschen ragende, womöglich regelmäßig wiederkehrende Impulse auf, gilt das als besonderes Ereignis, fast als



*Auswertung kosmischer Radiosignale durch Vergleich mit künstlich erzeugter Rauschspannung*

sensationell – es sei denn, es stellt sich, wie des öfteren geschehen, nachträglich heraus, daß die Impulse irdischen Ursprungs waren.

Aus diesem Rauschen, diesem Geflüster des Welt- raumes, leiten Radioastronomen ihre Forschungs- resultate ab. Es bedarf dazu eines mehr als kriminalistischen Spürsinnns und eines ausgefeilten tech- nischen Instrumentariums.

Die Empfänger sind zwar rauscharm, aber nicht rauschfrei. Die Empfangsapparatur muß daher zu- sätzlich die schwierige Aufgabe übernehmen, ihr Eigenrauschen vom zu beobachtenden Rauschen zu trennen.

Die dafür üblichen Verfahren gehen auf einen von zwei Grundgedanken zurück:

Man kompensiert das unerwünschte Rauschen so durch eine Gegenspannung (die gleichfalls Rauschcharakter haben muß), daß am Empfänger- ausgang nur das zu beobachtende Rauschen, das Nutzsignal, auftritt; oder man schaltet in raschem Wechsel die Antenne sowie eine künstliche Rausch- quelle an den Empfänger, vergleicht die erhaltenen Spannungen elektrisch und gewinnt aus ihrer Diffe- renz die Steuerspannung für die Registriereinrich- tungen. In beiden Fällen sind im Empfänger defi- nierte Rauschquellen nötig. Sie werden durch «Rauschgeneratoren» dargestellt, die Rauschen be- kannter und veränderbarer Leistung erzeugen.

Mit einem optischen Teleskop kann im gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes beobachtet werden. Ein Radioteleskop hingegen erfaßt nur einen Aus- schnitt des Radiofensters, oftmals nur ein sehr schmales Band «rechts und links» einer bestimmten Frequenz; denn Allwellenantennen hoher Richt- wirkung (und damit hohen Gewinns) gibt es weder für die Radioastronomie noch für andere Bereiche der drahtlosen Signalübertragung.

Etwa 100 m nannten wir als gegenwärtige Maxi- maldurchmesser für schwenkbare Parabolantennen von Radioteleskopen. Weit größere Durchmesser sind wünschenswert. Man kann sie realisieren, wenn man auf die Schwenkvorrichtung verzichtet und an ihre Stelle die Erddrehung treten läßt. Ein imposan- tes Beispiel hierfür gibt es seit 1963:

Auf der Karibikinsel Puerto Rico wurde in einem Talkessel ein dichtes Maschendrahtnetz so ange- bracht, daß es für Radiowellen einen schalen- förmigen Kugelspiegel von 305 m Durchmesser bildet. An drei Stahlbetontürmen sind Drahtseile verankert; sie halten, 130 m über der Talsohle, eine Plattform mit der eigentlichen Antenne in der Schwebe. Das Instrument weist zum Zenit, doch kann durch Schwenken der Antenne die Haupt- empfangsrichtung um einige Winkelgrade verändert werden, so daß sich, der Erddrehung folgend, ein breiter Himmelstreifen absuchen läßt.

Das gegenwärtig größte Radioteleskop der Welt, RATAN 600, arbeitet bei Selentschukskaja im Kaukasus in 2000 m Höhe. Um zusätzlich gegen Störungen irdischen Ursprungs abgeschirmt zu sein, wurde als Standort ebenfalls eine Talsenke gewählt. 895 parabolisch gekrümmte, auf einem Kreis von 600 m Durchmesser angeordnete Alu- miniumtafeln, die mittels einer Rechnersteuerung ge- schwenkt und einer Radioquelle nachgeführt wer- den können, fangen die Radiowellen ein.

Selbst das Auflösungsvermögen solch gigantischer Radioteleskope (es erreicht am «kurzwelligen Ende» des Radiofensters nicht einmal eine Winkel- minute) aber liegt weit unter dem optischer Instru- mente.

Radiointerferometer (eine gleichfalls der Optik entlehnte Bezeichnung) überwinden diese Grenze. In einfacher Form bestehen sie aus zwei auf das gleiche Objekt gerichteten Antennen, in einem gegenüber der Wellenlänge großen Abstand in Ost- West-Richtung aufgestellt und *einen* Empfänger speisend.

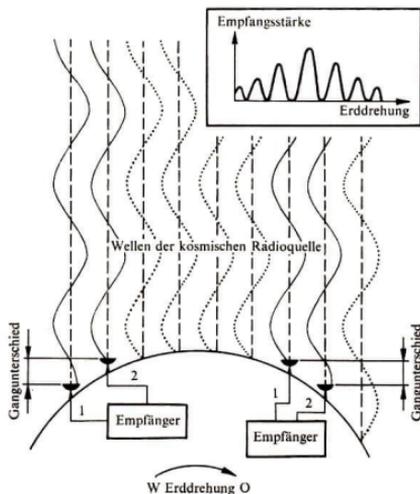
Die Wellen einer Radioquelle (also auch eines Funksenders) erreichen beide Antennen mit einem vom Einfallswinkel abhängigen Gangunterschied. Dieser ändert sich ständig, weil sich Erde und An- tennen unter einer kosmischen Radioquelle hinweg- drehen. Je nach seiner augenblicklichen Größe werden die Signale am Empfänger verstärkt, ge- schwächt oder ausgelöscht. Registriert man sie während eines Zeitabschnitts der Erddrehung, er- hält man eine Folge von Empfangsmaxima und

-minima. Aus ihr lassen sich die Herkunftsrichtung und unter gewissen Voraussetzungen auch die Größe der Radioquelle bestimmen.

Radiointerferometer sind meistens nicht nur mit zwei, sondern mit zahlreichen zusammengeschalteten Einzelantennen ausgestattet. Auch wird die so gebildete Antennenzeile in Ost-West-Richtung oft durch eine Zeile in Nord-Süd-Richtung ergänzt, so daß insgesamt das Radiointerferometer kreuz- oder T-förmige Gestalt annimmt. Über 2000 Einzelantennen arbeiten in manchen dieser Systeme!

Je länger die Basis eines Radiointerferometers (d. h. der Abstand zwischen den beiden «äußeren» Antennen), desto besser ist das Auflösungsvermögen. Diese lapidare Feststellung hat in der «Langbasisinterferometrie» konsequente Anwendung gefunden. Man schaltet zwei (häufig bereits vorhandene) in großer Entfernung voneinander befindliche Radioteleskope zusammen. Für Distanzen von einigen Hundert Kilometern genügen zur Verbindung mit der Empfangsapparatur Kabel- oder Funkverbindungen. Doch inzwischen arbeiten Radioteleskope als Interferometer, die Tausende Kilometer voneinander entfernt, oft auf verschiedenen Kontinenten, stehen, z. B. mit Basen UdSSR-USA, USA-Australien, Schweden-USA. Bei solchen Entfernungen wäre die Signalübertragung, bei der ja auch genauestes zeitliches Übereinstimmen zwischen der Tätigkeit der Radioteleskope und pünktlichstes Übertragen der Signale zum Empfänger gesichert sein müssen, so nicht durchführbar. Die Antennensignale werden daher nicht unmittelbar zur entfernten Empfangsapparatur weitergeleitet, sondern zunächst getrennt – zusammen mit exakten Zeitmarkierungen – magnetisch gespeichert. Anschließend übernimmt eine elektronische Rechanlage das Auswerten. Auf diese Weise wird mit einem Auflösungsvermögen bis 1/1 000 Winkelsekunde sogar die Leistungsfähigkeit der größten optischen Instrumente übertroffen.

Radiointerferometer in Kreuzform und mit zahlreichen Einzelantennen erfordern einen recht hohen technischen Aufwand (man denke, abgesehen von der komplizierten Elektronik, nur an das Problem



*Durch die Erddrehung treten beim Empfang einer kosmischen Radioquelle zeitlich Gangunterschiede auf (zu beachten auch der «Nulldurchgang» bei Antenne 1 in östlicher, Antenne 2 in westlicher Stellung.) Im Rahmen ist das Registrierdiagramm der Anordnung dargestellt*

der exakten Justierung der Einzelantennen), ersetzen aber zugleich eine sehr große Antennenfläche.

Man kann eine solche Fläche jedoch auf einfachere Weise simulieren, und zwar mit Hilfe der sogenannten Apertursynthese. An die Stelle zahlreicher als Zeile aufgestellter Einzelantennen treten wenige (im Extremfall nur zwei). Einige davon sind ortsfest montiert, die übrigen können, z. B. auf Schienen, verschoben werden. Man bringt nun nacheinander die festen und beweglichen Antennen in verschiedene Kombinationen sowie Stellungen zueinander und erhält so gewissermaßen jedesmal ein «anderes» Interferometer. Jede Beobachtung wird gespeichert. Nachdem genügend viele Kombinationen «durchgespielt» wurden, übernimmt eine elektronische Rechenanlage das Zusammensetzen und Auswerten.

Noch vor wenigen Jahren waren die Radioastronomen überzeugt, daß sie noch für lange Zeit die Geheimnisse des Weltraumes nur durch das Radiofenster würden erlauschen können. Doch im Sommer 1979 demonstrierte die Besatzung von «Salut 6», daß die Forscher schon bald «vor» diesem Fenster stehen werden. «KRT 10», das erste an der Grenze zum Weltraum montierte Radioteleskop, nahm seine Arbeit auf. Die Bedeutung dieses Schrittes kann kaum hoch genug bewertet werden. Radioteleskope außerhalb der Erdatmosphäre werden die Beobachtungen auf Wellenbereiche auszuweiten gestatten, für die das Radiofenster undurchsichtig ist und in denen störende Einflüsse der Atmosphäre entfallen.

Der Länge von Interferometerbasen sind durch die Abmessungen unseres Planeten Grenzen gesetzt. Kosmische Interferometer, deren eine Antenne sich z. B. in Erdnähe befände, während die andere von einem Planeten oder einem weit entfernten Raumflugkörper getragen würde, ließen diese Grenze hinaufschoben werden. Schon denkt man an Systeme zur Apertursynthese in kosmischen Maßstäben.

Das bisher Beschriebene ist bloßes Abhören der Radio«stimmen», die aus dem Weltraum eintreffen. Seit mehr als drei Jahrzehnten «rufen» wir aber auch.

In den 40er Jahren wurden – zufällig zunächst, dann in systematischen Experimenten – Radarimpulse in den Raum geschickt, ihre Echos gesucht und beobachtet. Erstes Radarziel war der Mond, Meteoriten und Planeten folgten. Heute ist Radarerkundung ein wichtiger Zweig der Radioastronomie.

Die Unterschiede gegenüber der Radartechnik im Verkehrs- und Militärwesen sind erheblich. So verzichtet man meistens auf spezielle Radarantennen; die Parabolantennen vieler Radioteleskope sind auch für Senden und Empfang von Radarimpulsen eingerichtet. Weil sehr große Entfernungen überbrückt werden müssen, ist die Impulsleistung enorm; 50 MW und mehr sind keine Seltenheit. Um die sehr schwachen Impulsechos vom Rauschhintergrund abzuheben, wird das gesamte Arsenal der Radioastronomie aufgeboten.

Die Radioastronomie hat in mehr als drei Jahrzehnten ihrer Existenz nicht nur zahlreiche Resultate sowie Vermutungen der Lichtastronomie bestätigt, sondern selbst immer wieder zur Vermehrung unserer Kenntnisse und Erkenntnisse beigetragen.

Das hat unter anderem zwei in Zusammenhang stehende natürliche Ursachen: Radioteleskope dringen weit tiefer in den Raum vor als optische. 10 Milliarden Jahre sind mitunter Funkwellen mit Lichtgeschwindigkeit bis zu ihren Antennen unterwegs. Wolken kosmischen Staubs, die uns den optischen Einblick in manches interessante Himmelsgebiet verwehren, durchdringen Radiowellen mühelos.

Zählen wir nur einige wichtige Resultate der Radioastronomie auf:

- Die radioastronomische Untersuchung der Sonne mit ihrer Grundstrahlung, den plötzlichen heftigen Ausbrüchen von Radiostrahlung und «Radio-stürmen» hilft, die Sonnenaktivität zu erforschen. Ihre Kenntnis hat auch unmittelbare Auswirkungen für uns Erdbewohner; denn die Sonnenaktivität beeinflusst die Vorgänge in der Ionosphäre und damit auch den Funkfernverkehr in hohem Maße.

- Wichtige Aufschlüsse über genaue Entfernung, Oberflächenbeschaffenheit und -temperatur, etwaige Atmosphären oder Reste davon, über Magnetfelder und Rotationsgeschwindigkeiten der Planeten (sowie des Mondes) verdanken wir der Radioastronomie.
- Der auf einer Wellenlänge von 21 cm «sendende» neutrale interstellare Wasserstoff erlaubt Rückschlüsse auf die Struktur der Galaxien, insbesondere auf die unseres Milchstraßensystems, dessen zentrale Regionen für optische Instrumente undurchdringlich sind.
- Die erfolgreiche Suche nach örtlich begrenzten Radioquellen (mehrere Tausend wurden bisher gefunden) führte zur Entdeckung der Pulsare (vermutlich rasch rotierende Neutronensterne) und Quasare (mit optisch benachbarten Objekten zusammenfallende «Radiosterne»), beide gegenwärtig wichtige Themen von Astronomie sowie Astrophysik, von deren Bearbeitung man Aufschlüsse über das Entstehen und «Sterben» von Sternen erwartet.
- Vielleicht die wichtigste bisherige Entdeckung aber ist, daß sich in der Radiostrahlung interstellaren Gases untrügliche Anzeichen für das Vorhandensein organischer Verbindungen wie Ameisensäure, Methylalkohol und Acetaldehyd finden – ein außerordentlich wichtiger Beitrag zum Problemkreis «Entwicklung des Lebens».

## C E T I

Communication with Extra Terrestrial Intelligence, Verbindung mit außerirdischer Intelligenz, bedeutet diese in jüngster Zeit bekannt gewordene Abkürzung. Der Wunsch, mit «Nachbarn irgendwo im Weltall» in Verbindung zu treten, ist alt und faszinierend; er war und bleibt ein Lieblingsthema der wissenschaftlich-phantastischen Literatur. Erst in den letzten Jahrzehnten wurde CETI Gegenstand internationaler wissenschaftlicher Tagungen,<sup>1</sup> von Fachaufsätzen und -büchern. Das kam nicht von ungefähr; denn in jüngster Zeit haben Wissenschaft

und Technik Voraussetzungen geschaffen, die entsprechende Versuche nicht als grundsätzlich aussichtslos erscheinen lassen.

Zwar besteht wohl auf sehr lange Zeit keine Aussicht, kosmischen «Nachbarn» von uns aus einen Besuch abzustatten. Doch sind wir überzeugt, daß jede Technik betreibende Zivilisation früher oder später Radiowellen entdecken, zur Signalübertragung nutzen und dabei vielleicht ungleich bessere Mittel einsetzen wird, als uns gegenwärtig zur Verfügung stehen.

Wäre es nicht denkbar, daß die Erde gerade jetzt von Funksignalen gleichfalls nach Kontakten suchender fremder Welten getroffen wird, daß dies vielleicht schon vor 100, vor 1000 oder mehr Jahren geschah oder morgen geschehen wird?

1960 wurde erstmals ein Radioteleskop, verbunden mit einem Spezialempfänger, auf einen Stern im «Walfisch», später auf einen Stern im «Eridanus» gerichtet, um nach künstlich erzeugten Funksignalen zu suchen. 400 Frequenzkanäle dicht ober- und unterhalb der 21-cm-Welle des kosmischen Wasserstoffs wurden überwacht. Das Ergebnis war zwar negativ, entmutigte die Radioastronomen aber nicht. Zahlreiche weitere Versuche folgten, seit 1968 auch in der Sowjetunion, mit verschiedenen Radioteleskopen und in unterschiedlichen Frequenzbereichen. Mehrere Hunderte der uns nächstgelegenen Sterne wurden auf diese Weise «abgehört», ohne jedoch bis heute Nachbarn zu entdecken.

Nur im Sommer 1967 schien es für kurze Zeit, als seien die Versuche von Erfolg gekrönt. Ein großes Interferometersystem empfing einander in äußerst exakt eingehaltenen Zeitabständen folgende Impulse. Ihre Quelle konnte, wie weitere Untersuchungen nahelegten, allenfalls die Größenordnung eines Planeten haben. Doch die Zeichen waren zu genau. Bei einem um seine Sonne kreisenden Planeten hätten sie geringfügige, aber meßbare Frequenz- und Zeitänderungen aufweisen müssen. Impulsfolgen, wenig später auch aus anderen Richtungen empfangen, ließen keinen Zweifel: Es handelte sich um natürliche Signale. Trotzdem waren

die Versuchsergebnisse eine Sensation; bedeuteten sie doch die Entdeckung der Pulsare, durch deren Rotation und Magnetfeld die Radioimpulse ausgelöst wurden. Zahlreiche solcher kosmischen «Funkfeuer» kennen wir inzwischen.

Betrachtet man eine Aufstellung der Horchaktionen, fällt auf, daß der Wellenlängenbereich um 21 cm bevorzugt wird. Das hat gute Gründe:

Einer fernen Zivilisation, deren technische Entwicklung so vorangeschritten ist, daß sie nach Kontakten mit anderen Intelligenzen sucht, dürfte bekannt sein, daß die Naturgesetze hierfür den Wellenbereich von etwa 3 cm bis 30 cm Wellenlänge als besonders günstig ausweisen. Sie wird außerdem, auch wenn sie über äußerst leistungsfähige Sender verfügt, aus Gründen der Effektivität auf schmalen Frequenzkanälen senden. Nun ist aber der Bereich zwischen 3 cm und 30 cm Wellenlänge 9000 MHz breit. Nahezu 1300 unserer Fernsehkanäle ließen sich darin nebeneinander unterbringen. Die Zahl der viel schmaleren kosmischen Funkkanäle wäre unvergleichlich größer. Selbst bei einer noch als sehr hoch angenommenen Kanalbreite von 1 kHz müßten 9 Millionen Kanäle, und zwar nach Möglichkeit dauernd, überwacht werden. Die technische Möglichkeit dazu kann kaum vorausgesetzt werden.

Es gilt also, gleich, ob *wir* andere oder andere *uns* suchen, eine engere Frequenzauswahl zu treffen. Da sicherlich entwickelten außerirdischen Intelligenzen auch die überall im Kosmos auftretende 21-cm-Wasserstoffstrahlung bekannt ist und sie diese Kenntnis auch von uns annehmen werden, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit damit zu rechnen, daß vor allem Kanäle nahe dieser Frequenz für Versuche zur Kontaktaufnahme herangezogen werden.

Wie erwähnt, die Suche blieb bis heute erfolglos. Doch sie geht weiter, auch wenn man nicht so spektakuläre Mittel einsetzen kann wie in jenem Projekt, das mit etwa 10000 Parabolantennen von jeweils 20 m bis 30 m Durchmesser das interessierende Spektrum nahezu lückenlos überwachen möchte.

Die Erde hat sich bei der Suche nach außer-

irdischen Kontakten nicht auf eine passive Rolle beschränkt – schließlich könnte es ja sein, daß unsere kosmischen Nachbarn auf Signale von uns warten.

1974 schickte das Riesenteleskop von Puerto Rico 3-Minuten-Botschaften zum Sternhaufen «Messier 13», der aus technischen Überlegungen hierfür besonders geeignet erschien. Sie bestanden aus jeweils 1679 Impulsen, deren Entzifferung (unter der Annahme, daß sie dem Empfänger gelingt) Grundinformationen über die Erde und ihre Bewohner mitteilt. Eine etwaige Antwort wird freilich noch lange auf sich warten lassen. Bis zum Ziel sind die Impulse fast 25000 Jahre unterwegs; ebensolange brauchte die Antwort.

Mit etwas einfacherem, trotzdem noch sehr erheblichem Aufwand könnten Signale in einen Umkreis von mehreren 100 Lichtjahren geschickt werden. Auch dann aber heißt es warten, ob und bis vielleicht eine Antwort eintrifft.

Wir werden hier mit einer Tatsache konfrontiert, die in der wissenschaftlich-phantastischen Literatur gern übergangen wird. Stets breiten sich die Funksignale «nur» mit Lichtgeschwindigkeit aus. Selbst aus der Gegend des uns nächsten Fixsterns könnte, sofern es dort Intelligenz gäbe, Antwort bestenfalls nach etwa 8 Jahren eintreffen. Eine Unterhaltung, einen unmittelbaren Dialog zwischen kosmischen Partnern kann es nicht geben. Aber auch ein nicht in Dialogform geführter Wissens- und Erfahrungsaustausch wäre von unschätzbarem Wert. Seine Möglichkeit rechtfertigt weitere Anstrengungen und Versuche, die – darin sind die meisten Fachleute optimistisch – wahrscheinlich eines Tages zum Erfolg führen werden.

# Auf Straßen und Schienen

Tankstelle Steckdose 133  
Von der Raumfahrt stimuliert 135  
Schranken, Signale, Weichen 145  
Ist der Lokführer entbehrlich? 146  
Helfer für Autobahn und Straße 148

## Tankstelle Steckdose

Am Ende dieses Jahrhunderts wird, so schätzt man, die Zahl der Kraftfahrzeuge auf der Welt nicht weit von der Milliardenengrenze entfernt sein. Viele sehen dieser Entwicklung mit Besorgnis entgegen. Vielerorts hat die Umweltbelastung durch Abgabe von Verbrennungsmotoren das gerade noch erträgliche Maß erreicht, mitunter schon überschritten. Das Kraftfahrzeug von morgen darf kein umweltverschmutzendes Gefährt sein, das fossilen Brennstoff «vergeudet».

Eine Alternativlösung für seinen Antrieb ist so alt wie das Kraftfahrzeug überhaupt. Die ersten Automobile wurden durchaus nicht immer durch Verbrennungsmotoren bewegt; neben wenigen und bald der Vergessenheit anheimgefallenen Dampfwagen führen zahlreiche «Elektromobile».

Trotz des Siegeszuges von Otto- und Dieselmotor ist das Elektrofahrzeug für Sonderzwecke im Nahverkehr allerdings niemals völlig verschwunden. Der Obus mit seinem Leitungsnetz, von Akkumulatoren gespeiste Fahrzeuge für innerbetrieblichen Transport, Gabelstapler usw. beweisen es.

Der Elektromotor ist als Antriebsquelle für Straßenfahrzeuge vorzüglich geeignet. Er ist technisch ausgereift, klein, zuverlässig, robust, abgasfrei, leicht steuer- und regelbar und kann beim Abbremsen sogar Energie «zurückgeben».

Weil kraftübertragendes und drehzahlveränderndes Getriebe, Zündanlage, Anlasser und weiteres für die gegenwärtigen Kraftfahrzeuge unentbehrliches «Beiwerk» entfallen können, ergäben sich auch nicht zu unterschätzende Vorzüge für Produktion, Bedienung, Wartung und Preis der Kraftwagen.

Problem des Elektrofahrzeugs ist nicht sein Motor, sondern dessen Energiequelle. Verlangen wir gleiche freie Beweglichkeit und nach Möglichkeit gleichen Aktionsradius wie von konventionellen Kraftwagen, muß das Elektrofahrzeug seine Energiequelle mit sich führen. Energiezufuhr von außen, etwa wie beim Obus, oder über elektromagnetische Induktion von unter der Straßendecke verlegten Speisekabeln, scheidet aus.

Eine allen Erfordernissen genügende bordeigene Energiequelle gibt es noch nicht, obwohl es an Vorschlägen und auch Experimenten nicht gefehlt hat. So führte man schon vor zwei Jahrzehnten ein Elektrofahrzeug vor, dessen Motor von aus Sonnenbatterien geladenen Akkumulatoren gespeist wurde. Es blieb eine Kuriosität. Auch wenn ähnliche Versuche mehrfach wiederholt wurden, räumt man dem Sonnenenergieantrieb nur geringe Chancen ein. Nur in Sonderfällen (z. B. für leichte und unbemannte Fahrzeuge auf sonnennahen Himmelskörpern) könnte er Bedeutung erlangen.

Auch «Kernenergieantrieb» – sei es über Thermo-

oder über Radionuklidbatterien – kommt kaum in Betracht. Abmessungen, Masse, unumgängliche Abschirm- und Sicherheitsvorkehrungen (Verkehrsunfälle!) schieben einen Riegel vor.

So bleiben vorerst (und sicherlich noch für längere Zeit) für den Fahrzeugantrieb die ältesten stetig fließenden, also die elektrochemischen Stromquellen übrig.

Zunächst bietet sich der seit über 100 Jahren bekannte Akkumulator an. Er speist seit jeher nicht nur Elektrofahrzeuge, sondern ist, wenngleich für andere Aufgaben, in jedem konventionellen Kraftwagen vorhanden.

Bestehend scheint vor allem die Möglichkeit, ihn immer wieder aufzuladen. Für den Autobesitzer erübrigte sich damit die Fahrt zur Tankstelle. Er könnte seinen Wagen abends über ein einfaches Ladegerät (wahrscheinlich in den Wagen eingebaut) an das Stromversorgungsnetz anschließen; am nächsten Morgen wäre er «aufgetankt». Energiewirtschaftlich wäre diese Lösung gleichfalls interessant: Die Benutzung von billigem Nachtstrom zum Laden käme dem Streben um gleichmäßiges Auslasten der Kraftwerke und Energienetze entgegen.

Diesen unübersehbaren Vorteilen steht bei den gegenwärtig bekannten Akkumulatoren ein im Sinne des Wortes schwerwiegender Nachteil gegenüber. Ihre Energiedichte, die auf Kilogramm oder Tonne Batteriemasse bezogene nutzbare Elektroenergie, ist zu gering. Eine Batteriemasse von 1 t gibt nach dem Aufladen gegenwärtig höchstens wenige 10 kWh her. Damit kommt ein Kraftfahrzeug nicht weit. 60 km bis 100 km etwa beträgt die Reichweite, dann muß die nächste Steckdose angefahren werden. Das Laden aber dauert Stunden.

Somit ist klar: Für den Fahrzeug-Fernverkehr sind Akkumulatoren fehl am Platze. Ihr Aufgabenbereich – und hier haben sie zweifelsohne Zukunftsaussichten – ist der Nahverkehr, vor allem der Stadtverkehr.

Im Stadtverkehr legen viele Fahrzeuge (wie Lieferwagen) während eines Tages nur relativ geringe Strecken zurück, die überdies nicht selten von

längeren, durchaus zum Laden nutzbaren Pausen unterbrochen werden. Außerdem ist in Städten die Umweltfreundlichkeit solcher Fahrzeuge besonders dringend nötig. Elektro-Taxis, -Kleintransporter, -Kleinbusse fahren gegenwärtig in Großstädten mehrerer Länder.

Gleichfalls ist man bemüht, die Akkumulatoren zu verbessern. Es scheint nicht ausgeschlossen, eine Energiedichte von 50 kWh/t und mehr für den Bleiakkumulator zu erreichen. Akkumulatoren mit anderen Elektrodenmaterialien nähern sich zwar 100 kWh/t, benötigen zu ihrer Herstellung aber unter anderem erhebliche Mengen kostbaren Silbers.

Als aussichtsreich wird der in jüngster Zeit entwickelte Natrium-Schwefel-Akkumulator angesehen. Die Materialien zu seiner Herstellung sind in den meisten Ländern, auch bei uns, vorhanden. Ein Nachteil allerdings ist seine verhältnismäßig hohe Arbeitstemperatur von  $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sie im «rauhem» praktischen Betrieb zu erreichen und aufrechtzuerhalten, wirft noch manche technische Frage auf.

Der Natrium-Schwefel-Akkumulator, dessen technische Einsatzreife für die nächsten Jahre zu erwarten ist, wird den Aktionsradius der Elektrofahrzeuge erweitern und könnte auch auf anderen Gebieten nützlich sein. Das Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor wird auch er nicht verdrängen können.

Das hat übrigens, und dies gilt für jeden Akkumulatorenantrieb, auch eine ganz simple Ursache. Die vom Akkumulator abgegebene Elektroenergie muß ihm vorher durch Laden zugeführt und erst einmal in Kraftwerken gewonnen werden. Sämtliche Kraftwerke der Welt aber würden gegenwärtig nicht ausreichen, den gegenwärtigen Autopark «elektrisch aufzutanken».

So wird es noch eine gute Weile dauern, bis die Tankstelle Steckdose für jedermann, wenn überhaupt, Wirklichkeit werden kann. Bis dahin aber werden mehr und mehr Elektrofahrzeuge für den Nahverkehr dazu beitragen, daß wir auch im Verkehrsstrubel unserer Städte wieder tief durchatmen können.

## Von der Raumfahrt stimuliert

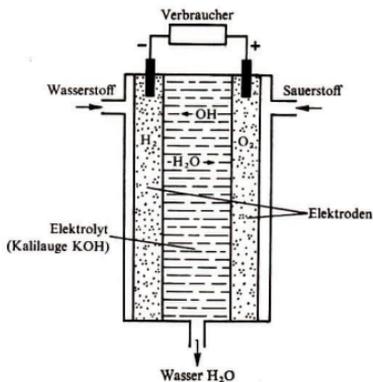
Aus Gründen des Materialverbrauchs, der geringen Energiedichte und des hohen Preises kommen für das Verkehrswesen nicht wiederaufladbare Stromquellen zunächst nicht in Frage.

Seit einem guten Menschenalter jedoch kennt man eine ganz andere Möglichkeit elektrochemischer Energiegewinnung: das Brennstoffelement, die Brennstoffzelle. Ihr Grundgedanke ist, in einem galvanischen Element kontinuierlich zugeführte brennbare Gase oder Flüssigkeiten wie Wasserstoff, Erdgas, Methan, Propan, Methanol usw. zu oxidieren und die dabei freigesetzte Energie unmittelbar als Elektroenergie zu entnehmen.

Jahrzehntelang stand das Brennstoffelement am Rande technischer Entwicklungen, ohne über das Experimentierstadium hinauszukommen. Auftrieb erhielt es vor allem durch die Bedürfnisse der Raumfahrt. Auch hier tat sich, besonders für bemannte und längere Raumflüge, ein Energieproblem auf, das mit Sonnenbatterien allein nicht zu lösen war. Als zuverlässige Langzeit-Elektroenergiequelle erschien das Brennstoffelement aussichtsreich. In den USA, in der Sowjetunion, in Frankreich und einigen anderen Staaten wurde es schnell zur Einsatzreife gebracht. Bereits die Unternehmen «Gemini» und «Apollo» stützten sich auf Brennstoffzellen als Elektroenergiequellen.

Die bekanntesten und am meisten technisch vorgeantriebenen Brennstoffelemente sind die Knallgaszellen. Ihr Name erinnert an einen bekannten Schulversuch. Wasserstoff und Sauerstoff ergeben, entsprechend gemischt, Knallgas. Ein Funke genügt, um es explosionsartig zu Wasser zu verbinden.

In der Knallgaszelle läuft diese Vereinigung langsam ab. In ein z. B. mit Kalilauge als Elektrolyt gefülltes Gefäß tauchen zwei poröse Elektroden. Der einen wird Wasserstoff, der anderen Sauerstoff zugeführt. Vor allem an den Porenwänden laufen elektrochemische Teilprozesse ab, als deren Ergebnis in der Wasserstoffelektrode Elektronen freigesetzt werden. Sie fließen als Strom über einen äußeren Leiter mit zwischengeschaltetem



Aufbau einer Knallgaszelle (schematisch)

Verbraucher zur Sauerstoffelektrode. Dort werden unter Mitwirkung des Elektrolyten negative Ionen gebildet. Sie vereinigen sich mit den an der Wasserstoffelektrode entstandenen positiven Wasserstoffionen zu Wasser, das abgeführt werden muß.

Der ganze Vorgang dauert an, solange Wasserstoff als «Brennstoff» und Sauerstoff als «Oxydator» zugeführt werden. Die Elektroden selbst verbrauchen oder verändern sich nicht. Außer Wasser, eine für die bemannte Raumfahrt sehr erwünschte Beigabe, gibt es kein Abfallprodukt.

Weitere Brennstoffzellen werden erprobt, sind teilweise bereits im Einsatz. So ist man mit Erfolg bemüht, Wasserstoff durch preiswertere, ungefährlichere, überall verfügbare oder mit geringem Aufwand transportierbare Brennstoffe zu ersetzen sowie Luft an die Stelle reinen Sauerstoffs treten zu lassen.

Man arbeitet an «Biozellen», in denen organische Prozesse sowie Organismen an der Energieumsetzung beteiligt sind, und an «Regenerativzellen», deren Abfallprodukte durch anderweitig nicht verwertbare Verlustenergie (Abwärme von Motoren, Kernreaktoren usw.), aber auch durch kostenlose Sonnenenergie aufbereitet und erneut in den Kreislauf der Brennstoffzelle eingespeist werden.

Zählen wir wichtige Eigenschaften der Brennstoffzellen auf:

- Energiedichten von 50 kWh/t sind erreichbar;
- der Wirkungsgrad nähert sich bereits Werten um 60%; weitere Steigerungen sind möglich und «im Visier»;
- ständig bewegte und verschleißende Teile entfallen, die Zellen arbeiten geräuschfrei und wartungsarm;
- die Zellenspannung liegt zwar nur bei 1 V, doch kann man Einzelzellen zu Batterien zusammenschalten, wobei außerdem die gemeinsamen Regeleinrichtungen (z. B. für die Brennstoffzufuhr) relativ kleiner, leichter und billiger werden;
- umweltfeindliche Reaktionsprodukte treten nicht auf;

- kurzzeitige Überlastungen machen den Zellen kaum etwas aus.

Solche Merkmale sind für Anwendungen auf der Erdoberfläche nicht weniger wichtig als für das Einsatzfeld Weltraum. So versorgen inzwischen Brennstoffelemente Funkfeuer, automatische Wetterstationen, Fernsehumschalter, Funkstationen, und es gibt sie als Klein- und Behelfskraftwerke im zivilen und militärischen Bereich.

Und das Brennstoffzellenfahrzeug? Es «rollt» seit langem durch die Spalten der Tagespresse und technischer Zeitschriften, es beschäftigt Doktoranden und Konstrukteure, aber es fährt auch schon wirklich, probeweise, als Kleintransporter, als Traktor, als Unterseeboot, als Rangierlokomotive. Vom Brennstoffzellenkraftwagen für jedermann aber sind wir noch ein gutes Stück entfernt.

So leicht und raumsparend sich nämlich Brennstoffzellenbatterien bauen lassen – das «Drum und Dran» ist schwer und voluminös. Druckflaschen für Gase z. B. sind hundertfach schwerer als ihr Inhalt, und damit wird das Mitführen einer ausreichenden Brennstoffmenge recht problematisch. Bei manchen Zellentypen muß der ganze Brennstoffzellenblock drucksicher gekapselt werden usw. Noch gilt als Faustregel: Der Brennstoffzellenantrieb eines Kleinwagens hätte die gleiche Masse wie der *gesamte* Wagen in konventioneller Technik.

Doch diese Regel wird sicherlich nicht für immer gelten. Wenigstens im Nahverkehr wird der Brennstoffzellenwagen *ein* Fahrzeug der Zukunft sein. Vielleicht benutzen schon unsere Kinder Fahrzeuge, die man wegen ihrer Elektromotoren kaum noch hört und vor allem nicht mehr riecht. Vielleicht erhalten sie dann an jeder «Tankstelle» in Abmessungen sowie Anschlüssen standardisierte Brennstoffbehälter oder gar «Päckchen», die mit wenigen Griffen auszutauschen sind und Antrieb für die nächsten 300 km liefern.

Das klingt recht utopisch. Doch auch die Uhr, die für ein Jahr von einer Monozelle angetrieben wird, galt vor 30 Jahren als Utopie ...



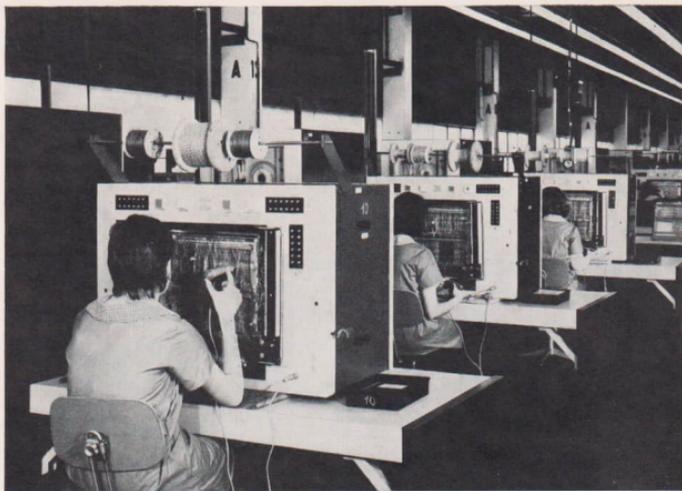
*Zur Peripherie von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen gehören Magnetbandspeicher – sie sind Archiv, Lexikon, Ablage einer Datenverarbeitungsanlage*



*Der Lichtstift vereinfacht den «Dialog mit dem Computer»*



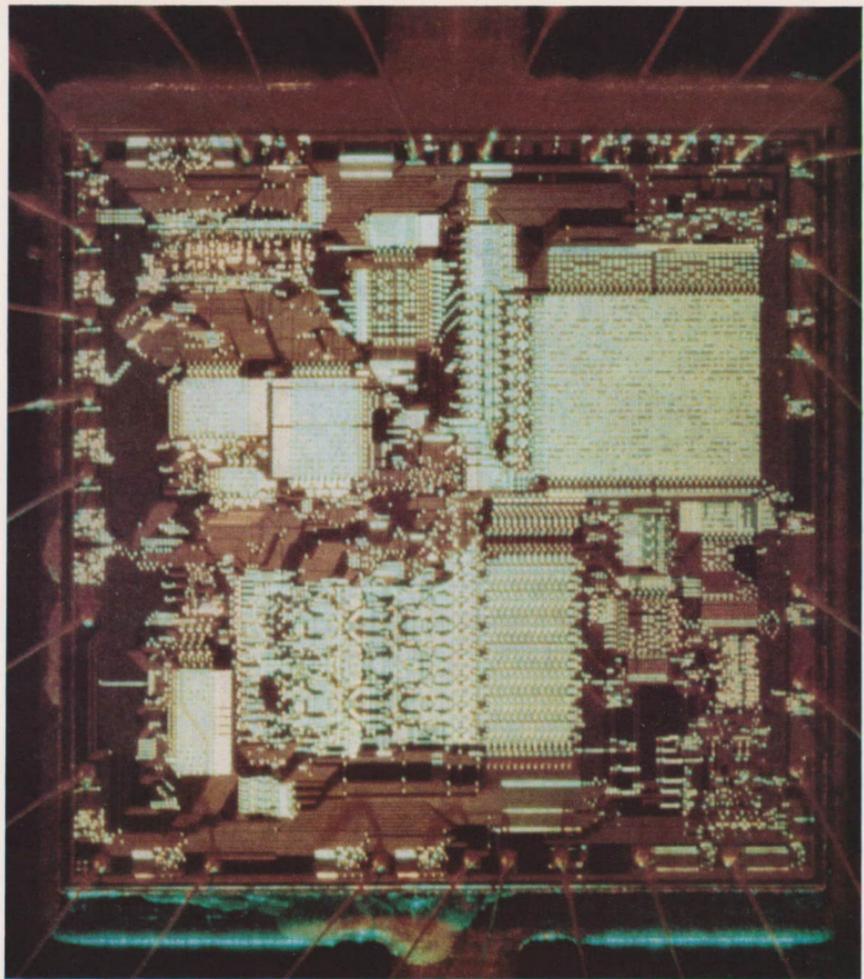
*Übersichtlich, hell, sauber – so zeigen sich moderne elektronische Datenverarbeitungsanlagen*

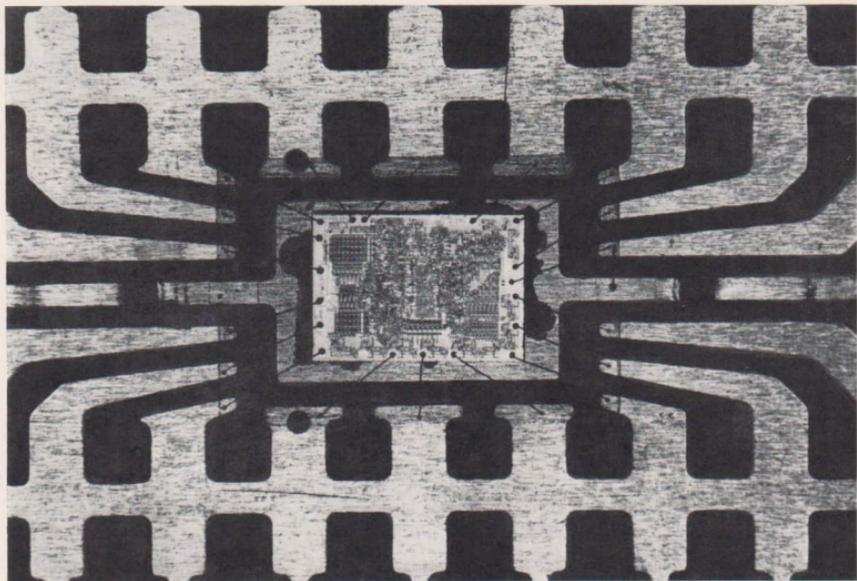


*«Jeder Draht hat seinen und nur seinen ganz bestimmten Platz» – Verdrahtungsarbeiten an Elektronenrechnern*



*Ehe eine Datenverarbeitungsanlage die Produktionsstätte verläßt, heißt es prüfen, prüfen und immer wieder prüfen*



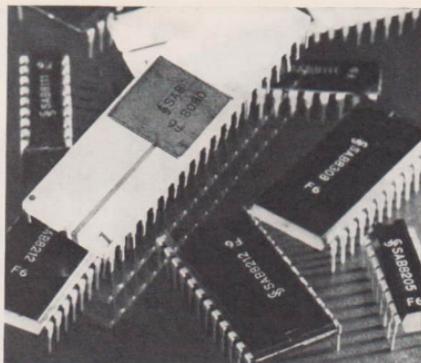


*«Innenleben» vom Mikroprozessor U 808 D*

*«Farbenspiel der Elektronik»: Rechterschaltkreis  
U 821 D in Vergrößerung (Seite 141)*



*Bildschirmanzeige – seit wenigen Jahren in der  
Datenverarbeitung selbstverständlich*



*Mikroprozessor, Speicher-, Ein- und Ausgabebau-  
steine eines Mikrorechners*

*Orgelspiel und Mikroprozessor: 40 Registerkombi-  
nationen lassen sich durch Tastendruck (links oben)  
elektronisch speichern und abrufen*



## Schranken, Signale, Weichen

Für jedes größere Schiff ist die Selbststeueranlage heute eine Selbstverständlichkeit. Sie wacht, mit den Navigationseinrichtungen zusammenwirkend, darüber, ob der vorgegebene Kurs eingehalten wird, stellt Abweichungen fest und gibt entsprechende Korrektursignale an die Rudermaschine.

Was der Seefahrt recht ist, ist dem Luftverkehr billig: Der Autopilot hält selbsttätig Kurs sowie Flughöhe ein und entlastet die Besatzung.

Automatische Einrichtungen im Verkehrswesen haben als Zielstellungen, Durchlässigkeit der Verkehrswege und Effektivität der Verkehrsmittel zu erhöhen, vor allem aber beide sicherer zu machen sowie Havarien oder Katastrophen zu verhindern.

Schienenwege sind für solche Einrichtungen gut geeignet; denn der Weg der Fahrzeuge liegt fest. Sie können Gleiskontakte betätigen und durch Überbrücken elektrisch voneinander isolierter Gleisabschnitte Stromkreise zur Informationsübertragung (z. B. «Gleis besetzt» oder «frei») ein- und ausschalten. Berührungsfreie Signalübertragung, z. B. durch aufeinander einwirkende Magnetfelder an Gleiskörper und Fahrzeug, bereitet ebenfalls keine Schwierigkeiten.

Diese Möglichkeiten werden seit Jahrzehnten angewandt. Zwangsbremmung stoppt Züge, die ein Halt-Signal überfahren. Der sich nähernde Zug schließt Schranken und öffnet sie nach der Durchfahrt wieder – der Bahnwärter mit seinem Gärtchen ist meist nur noch nostalgische Reminiszenz. Beim Automatischen Streckenblock sichern die Züge durch Auslösen entsprechender Signale selbst ihre Fahrt.

Elektrisch/elektronische Geräte sowie Steuerungen verlängerten die Liste der Sicherungs- und Automatisierungsmaßnahmen erheblich.

In den auf vielen Bahnhöfen eingeführten Gleisbildstellwerken gibt es eine Leuchttafel. Sie symbolisiert die Anlagen mit sämtlichen Gleisen, Weichen, Signalen, ihrem jeweiligen Besetzt- oder Freizustand bzw. ihrer Stellung, eingestellten Fahrstraßen usw. Die Bedientasten sind auf der Leuch-

tafel neben den zugehörigen Symbolen angebracht. Gegenüber den früheren Stellhebeln ist die Bedienung nicht nur bedeutend vereinfacht und übersichtlicher, sondern auch sicherer. Weil sich die elektrischen Steuer- und Meldesignale auch über größere Entfernung übertragen lassen, können mehrere Einzelstellwerke oder ein ganzer Streckenabschnitt zentral zusammengefaßt werden.

Fernsehkameras beobachten Bahnsteige, unübersichtliche Streckenabschnitte oder den Zugschluß. Rangierfunkgeräte dienen mündlicher Verständigung zwischen Stellwerk, dem Rangiermeister auf dem Ablaufberg, Lokomotiven und über Handfunkprechgeräte mit Rangierern.

Automatische Ablaufanlagen auf Rangierbahnhöfen beschleunigen das Zusammenstellen von Zügen oder Waggongruppen. Ihr Kernstück ist ein Rechner. Über Kontakte und Meßfühler an den Schienen ermittelt er Zahl und Masse der über den Ablaufberg rollenden Waggons. Ein modifiziertes Verkehrsradargerät mißt ihre Geschwindigkeit. Anhand dieser Werte steuert der Rechner Gleisbremsen so, daß der Wagen sein Zielgleis mit der vorgeschriebenen Geschwindigkeit erreicht. Sogar Witterungsbedingungen (Reif, Nässe, Windrichtung und -geschwindigkeit) werden berücksichtigt.

Nach eingegebenem Programm, das außerdem die Waggonnummern und die Zielgleise enthält, können die Weichen selbsttätig gestellt und die Zugzusammenstellung völlig automatisiert werden.

Verfahren, die Waggonnummern, die Art der Ladung sowie andere für Organisation und Disponierung wichtige Daten von rollenden Waggons abzufragen, gibt es seit einigen Jahren.

Man strahlt z. B. «Resonatoren» am Wagenboden von einer Sende-/Empfangsantenne zwischen den Schienen ein Frequenzband im Mikrowellenbereich zu. Die Mikrowellenstrahlung wird von einem (keinerlei Stromquelle benötigenden) Reflektor am Wagenboden zurückgeworfen, die den Resonatoren entsprechenden Frequenzen werden jedoch stark geschwächt. Werden die Resonatorfrequenzen nach einem vereinbarten und verbindlichen Schlüssel festgelegt, liefern die elektronisch

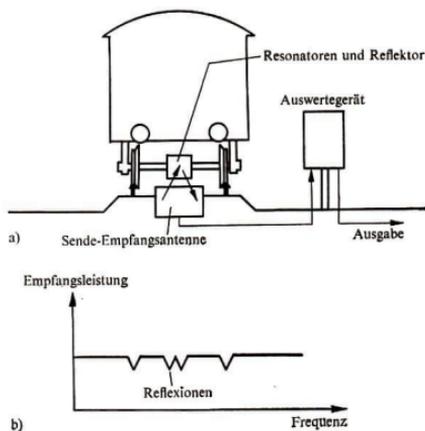
analysierten reflektierten Signale die interessierenden Auskünfte. Sie können angezeigt, ausgedruckt oder zur Steuerung der Zugzusammenstellung verwendet werden.

## Ist der Lokführer entbehrlich?

Seit jeher ist man bestrebt, Reisegeschwindigkeit und Dichte der Zugfolge zu erhöhen. Schnellverkehr bis 200 km/h und darüber wird erprobt, zum Teil ist er eingeführt. Abgesehen von den umfangreichen baulichen Maßnahmen, die Strecken für den Schnellverkehr geeignet zu machen, muß auch das Signal-, Sicherungs- sowie Kommunikationssystem zwischen Zügen und den sie leitenden Dienststellen gründlich verändert werden. Bei Höchstgeschwindigkeiten genügen in bestimmten Abständen aufgestellte optische Signale nicht mehr. Für optimales und sicheres Fahren muß ständige Verständigungsmöglichkeit zwischen Fahrzeugen und Leitstellen bestehen.

Diese müssen z. B. stets genau unterrichtet sein, wo sich die Züge gerade befinden und welche Geschwindigkeit sie haben. Jene benötigen fortlaufend Informationen über einzuhaltende oder einzustellende Sollgeschwindigkeiten usf. Dabei muß das System, das Sprechverbindung, Meß- und Steuerimpulse, Auslösung optisch/akustischer Signale im Führerstand, Rückmeldung der Kommandoausführung sichert, technisch so gestaltet sein, daß Störungen zwischen den zahlreichen gleichzeitigen Verbindungen mit verschiedenen Zügen unmöglich sind. Das sind keine einfach zu lösenden Aufgaben, doch bieten elektronische Nachrichten-, Impuls- und Datenverarbeitungstechnik hierfür in anderen Bereichen erprobte sowie bewährte Verfahren an.

Die Informationsübertragung zum und vom fahrenden Zug geschieht z. B. durch Mikrowellenfunkverbindungen. In Abständen von einigen Kilometern stellt man entlang der Strecke Dezimeterwellensender und -empfänger als Zwischenstationen auf. Sie werden von Zentralen in Abständen und an wichtigen Streckenpunkten fernbedient.



### Mikrowellenverfahren

a) z. B. zum Abfragen von Daten über die Ladung von Waggons eingesetzt;

b) schematische Darstellung

Die Gegenstationen, ebenfalls aus Sender und Empfänger bestehend, sind in den Triebfahrzeugen installiert.

Wegen der Eigenschaften der Dezimeterwellenausbreitung muß der Standortwahl für die Zwischenstationen große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Abschattungen durch Wälder oder Gebäudekomplexe, Empfangsschwund in Streckeneinschnitten und bei Tunneldurchfahrten sind zu berücksichtigen. Arbeitsfrequenzen sowie Sendeleistungen dürfen nicht zu Störungen anderer oder durch andere Funkdienste führen. Außerdem können die Zwischenstationen nicht sämtlich die gleiche Sendefrequenz benutzen; weil es durch gelegentliche «Überreichweiten» zu gegenseitigen Beeinflussungen und damit gefährlichen Kommunikationsstörungen kommen könnte. In den Fahrzeuggeräten sind infolgedessen Zusatzschaltungen notwendig, die selbsttätig und im richtigen Zeitpunkt auf die Frequenz der nächsten Zwischenstation umschalten.

Solche Komplikationen entfallen bei «Linienförmiger Zugbeeinflussung». Die Informationsübermittlung übernimmt das magnetische Feld eines zwischen den Schienen verlegten Leiters. Er überträgt die Signale z. B. auf Frequenzen im Langwellenbereich. Die Verbindung zu den Zügen stellt eine Fahrzeugantenne her. Wie bei der Trägerfrequenztechnik lassen sich zahlreiche Informationskanäle in beiden Richtungen übertragen.

Die Geländegestaltung ist völlig unkritisch; bereits in geringer Entfernung vom Linienleiter ist die Stärke des magnetischen Feldes so gering, daß Störungen anderer Dienste nicht zu befürchten sind.

Das erste große Schnellfernbahnssystem dieser Art gibt es in Japan. 1964 wurde es auf der eigens gebauten und über 500 km langen Strecke Tokio-Osaka in Betrieb genommen. Das Netz der «Super-Expreßzüge» wurde seitdem erheblich erweitert. Es umfaßt gegenwärtig über 1000 Streckenkilometer und verknüpft wichtige Industrie- sowie Ballungszentren des Landes miteinander.

Die Geschwindigkeit der einander dicht auf dicht folgenden Gliederzüge überschreitet 200 km/h; jeder

Zug befördert 1000 Reisende und mehr. Von zentral aufgestellten Computern wird die Fahrt jedes Zuges kontrolliert, gesteuert und auf Leuchttafeln angezeigt.

Das Anfahren auf Reisegeschwindigkeit vollzieht sich automatisch, ebenso das Abbremsen vor Bahnhöfen – nur die «Feinarbeit der letzten Meter» obliegt dem Zugpersonal, das sich überdies jederzeit mit den Leitzentralen verständigen kann. Unversehens auf dem Gleiskörper auftauchende Hindernisse werden durch ein radarähnliches Gerät erfaßt, das sofortiges Bremsen veranlaßt. Bei den in Japan nicht seltenen Erdstößen wird der Zugverkehr sofort automatisch unterbrochen.

Unwillkürlich fragt man sich, ob es durch Ausbau dieses oder eines ähnlichen Systems nicht möglich sei, auf einen «Lokführer» überhaupt zu verzichten. Versuche in dieser Richtung sind nicht neu. Sie begannen schon 1955 für eine unbemannte Elektrolokomotive probeweise in Frankreich. Experimente auf Metro- und Stadtbahnlinien folgten unter anderem in der Sowjetunion sowie in der BRD. In England liegen Pläne vor, den gesamten Londoner Betrieb der Metro in den kommenden Jahrzehnten auf fahrerlose Züge umzustellen.

Obwohl noch zahlreiche Einzelfragen einer befriedigenden Antwort bedürfen – meistens sind es solche der Sicherheit unter allen nur denkbaren Umständen – stehen einem völlig automatisierten Schienenverkehr keine unüberwindbaren technischen Probleme im Wege. Er wird seine Bewährungsprobe, so ist anzunehmen, zunächst auf wichtigen Magistralen im Güterverkehr bestehen. Auch Passagiere werden eines Tages den fahrerlosen «Geisterzug» mit der gleichen Selbstverständlichkeit bestaunen wie heute einen Aufzug.

Vorerst also bleibt der Lokführer «an Bord». Schon heute aber können mikroelektronische Bordrechner seine Arbeit erleichtern. Sie ermitteln fortlaufend das optimale Fahrprogramm und helfen durch Vermeiden unnötigen Bremsens und Beschleunigungs Energie sparen – bis etwa 15 %, wie Versuche mit Schnellbahnzügen in der DDR ergaben.

## Helfer für Autobahn und Straße

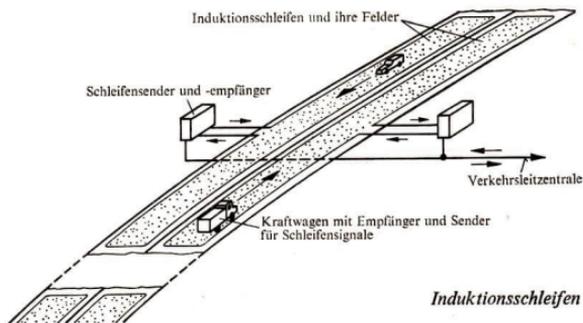
Kraftfahrzeuge können sich ungebundener als Schienenfahrzeuge bewegen. Sehen wir von den über Rundfunksender ausgestrahlten Verkehrshinweisen und den technischen Möglichkeiten ihrer Nutzung einmal ab, werden «elektronische» Hilfen, Warnungen oder Beratungen für Kraftfahrer dadurch nicht gerade erleichtert. Das Bedürfnis nach derartigen Hilfen aber wächst. Zahlreiche Systeme wurden vorgeschlagen und ausprobiert – aber noch ist «alles im Fluß», bis zur Einführung eines oder einiger weniger Verfahren dürfte noch eine Weile vergehen.

Das gilt sogar für das seit Jahren immer wieder genannte und auch vorgeführte «Kraftfahrzeugradar» zum Erkennen von Hindernissen und zum Vermeiden von Auffahrunfällen. Zwar ist das Radargerät selbst recht unkompliziert und nicht größer als eine Zigarrenkiste, doch verlangt der Kraftfahrer von den Signalen, die eine Antenne an der Frontseite des Wagens ausstrahlt und als Echo empfängt, mehr als die bloße Feststellung: «Da ist etwas auf der Fahrbahn». Bei einem ortsfesten Hindernis ist die Entfernung zu messen, ein opti-

ches oder akustisches Warnsignal im Fahrzeug auszulösen und notfalls unverzüglich ein Bremsmanöver einzuleiten; bei sich bewegenden Hindernissen (vor allem vorausfahrende Wagen) ist neben der Entfernung die Relativgeschwindigkeit zu ermitteln, daraus unter Berücksichtigung von Absolutgeschwindigkeit und Straßenzustand der nötige Sicherheitsabstand zu errechnen, sein Unterschreiten zu signalisieren oder zur automatischen Geschwindigkeitsverminderung zu nutzen. Umgekehrt könnte bei unnötigen Abständen die Geschwindigkeit erhöht werden, so daß stets zügiges Fahren bei sicheren Abständen möglich ist.

Mit dem Radargerät gekoppelte Kleinstrechner können diese Aufgabe übernehmen. Nur eines bereite bis vor kurzem erhebliche Schwierigkeiten: festzustellen, ob ein vom Radargerät erfaßtes Ziel wirklich ein Hindernis ist oder nicht. Ein Straßenschild, ein Leuchtenmast, eine Hauswand bei Durchfahren einer Kurve dürfen keine «Ziele» vortäuschen. Der Fahrer, über zu häufigen blinden Alarm verärgert, würde sein Gerät bald abschalten.

Das Anwenden von Mikroprozessoren bietet einen auf Versuchsstrecken bereits gut funktionierenden Ausweg an. Die Signale vom Radargerät,



*Induktionsschleifen im Fahrbahnuntergrund*

geeignet aufbereitet, werden blitzschnell mit «Signal-mustern» für typische Hindernisse verglichen. Diese Muster sind im Bordrechner gespeichert; nur wenn Muster und empfangene Echosignale annähernd übereinstimmen, wird eine Warnung ausgelöst. Zwar können so Fehlinterpretationen nicht völlig vermieden werden, doch sinkt ihre Zahl erheblich.

Weniger Anhänger findet der Vorschlag, nur vorausfahrende Wagen, etwa durch besondere Radarreflektoren oder «Antwortgeber», anzuzeigen – die Möglichkeiten des Kraftfahrzeugradars würden dadurch unnötig eingeschränkt.

Versuche, ständige Verbindung mit fahrenden Wagen zu ermöglichen, gehen meistens auf ein bei sogenannten drahtlosen Rufanlagen in Betrieben, Kliniken usw. bewährtes System zurück, auf die «Induktionsschleifen-Technik». Unter der Straßendecke werden, etwa in Fahrbahnweite und mit Längen bis zu mehreren Hundert Metern, Leiter-schleifen verlegt. Diesen werden die zu übermittelnden Informationen auf Frequenzen im Langwellenbereich eingespeist. Empfänger in Fahrzeugen, die sich «innerhalb» der Schleifen befinden, können die Signale empfangen. Umgekehrt kann ein Fahrzeugsender Informationen zur Weiterleitung auf die Schleifen übertragen. Die Liste dessen, was sich mit der Induktionsschleifentechnik auf Autobahnen und Fernstraßen anfangen ließe, ist lang und keineswegs abgeschlossen.

Zunächst könnten die Schleifen eine oder mehrere Verkehrsleitzentralen fortlaufend über Fahrzeugdichte und -geschwindigkeiten sowie die Belegung der Fahrspuren unterrichten. Daraus abgeleitete Warnungen über sich anbahnende Stauungen, Hinweise auf Richtgeschwindigkeiten oder Umleitungen könnten – wieder über die Schleifen – den Fahrzeugen zugeleitet werden und so dazu beitragen, den Verkehr flüssiger zu gestalten. Es wäre möglich, den Fahrer zu warnen, wenn er zu schnell oder zu «dicht» fährt. Angaben über Entfernungen zur nächsten Abfahrt, Tankstelle, zum nächsten Rastplatz wären ebenso zu erhalten wie aktuelle Informationen über Verkehrssituationen, Annäherung an Unfall- oder Baustellen usw.

Manche Vorschläge gehen noch weiter: Der Fahrer wählt anhand einer Liste den Zielort, drückt eine entsprechende Zahl in sein Bordgerät und bekommt auf einem Bildschirm oder in knappen Schriftzeilen «seinen» Fahrplan mit der jeweils günstigsten Fahrtroute übermittelt, er erhält Signale vor einer Kreuzung oder Abzweigung, über Parkmöglichkeiten, kann sogar erfragen, ob sein Treibstoffvorrat reicht oder wo er ihn ergänzen kann. Ein System, das nicht nur im Fernverkehr, sondern, wie ein 1978 in Tokio angestellter Großversuch erwies, auch in überfüllten Großstädten manches für sich hätte. Vielleicht aber gibt es – viele hoffen das –, bis es technisch ausgereift und ökonomisch vertretbar ist, gar kein Verkehrschaos mehr auf Straßen und Städten, weil sich effektivere, umweltfreundlichere sowie vernünftiger Lösungen im Verkehrswesen durchsetzen.

# ENIAC ... Mikroprozessor - und weiter?

Vier Jahrzehnte – vier Generationen 150  
Vom Taschen- zum Mikrorechner 152  
Hören – Sehen – Sprechen 155

## Vier Jahrzehnte – vier Generationen

Kein Leser wird etwas Besonderes dabei gefunden, sich «gewundert» haben, daß in diesem Buch des öfteren «Rechner», «Computer», «Datenverarbeitungsanlagen» erwähnt wurden. Jeder weiß schließlich, daß diese elektronischen Hilfsmittel und Systeme unentbehrlich geworden sind.

Dabei wurde ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator; «elektronischer numerischer Integrator und Rechner»), der erste elektronische Rechenautomat, der Öffentlichkeit vor noch nicht einmal 40 Jahren vorgestellt. Er war, verglichen mit seinen Nachfolgern, ein Ungeheuer, das einen ganzen Saal belegte und außer 18000 Elektronenröhren Tausende anderer Bauelemente enthielt. Aber, und darauf vor allem kam es an, er leistete 250 einfache Rechenoperationen in der Sekunde und übertraf damit an Rechengeschwindigkeit die besten seiner mit elektromagnetischen Bauelementen ausgestatteten Vorläufer (sogenannte Relaisrechner) um weit mehr als das Hundertfache.

Die nun folgende Entwicklung stellte selbst die Erwartungen der Mehrzahl der Fachleute weit in den Schatten und vollzog sich in einem solchen Tempo, daß gegenwärtig mit der vierten Elektronenrechnergeneration gearbeitet wird.

Bereits in Rechnern der zweiten Generation, etwa

ab 1959, vertreten z. B. durch die DDR-Anlagen R 300, waren Halbleiterbauelemente sowie als gedruckte Schaltungen ausgeführte Baugruppen an die Stelle der Röhren und einzeln verdrahteter Bauelemente getreten.

Fünf Jahre später folgte die nächste Generation, in ihrem Aufbau zunehmend durch integrierte Schaltkreise bestimmt. In der vierten Generation (ab 1971) begegnen uns Großschaltkreise, Mikroprozessoren und Mikrorechner (s. u.).

Die Zeitspanne für eine Rechenoperation schrumpfte von Millisekunden bis zu Bruchteilen von Mikrosekunden. Hochleistungsrechner führen in der Sekunde bis zu mehreren Millionen Rechenoperationen aus.

Auch die Arbeitsspeicher, «Gedächtnis» der Rechenautomaten, durchliefen grundsätzliche Wandlungen. Die rotierende Magnetrommel wurde von Tausenden kleiner, auf Drähte «gefädelter» Ferritringe abgelöst. Diesen wieder folgten Speicher auf der Grundlage hauchdünner magnetisierbarer Schichten und mehrere Arten von Halbleiterspeichern, nach der Technologie integrierter Schaltkreise hergestellt.

Der rasche Generationswechsel wurde durch die Fortschritte der Festkörperphysik und der Mikroelektronik ermöglicht. Neue Aufgabenstellungen stimulierten ihn immer wieder.

Sehr bald sollten Rechner nicht «nur» komplizierte

oder langwierige mathematische Probleme aus allen möglichen Gebieten lösen helfen.

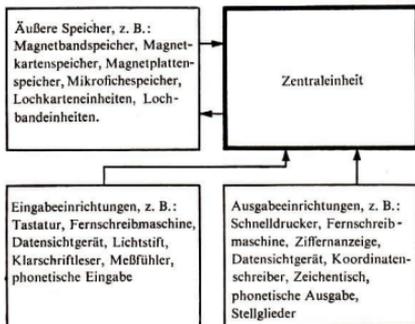
In vielen Bereichen der Forschung, der Technik, der Planung und Leitung der Volkswirtschaft, des Handels, des Verkehrswesens, der Organisation sowie Verwaltung fallen unentwegt große Datenmengen (Meßwerte, Kontrollziffern, statistische Angaben, Bestandsmengen und unterschiedlichste weitere Informationen) an. Sie müssen nach mannigfachen Gesichtspunkten und Regeln gesammelt, sortiert, ausgewählt, zusammengefaßt, weitergeleitet, miteinander verknüpft, kurz: ausgewertet werden. Eine oft immense, aber eintönige Tätigkeit, die überdies in vielen Fällen nur sinnvoll ist, wenn sie so schnell vollzogen wird, daß notwendige Maßnahmen und Entscheidungen unverzüglich aus den Daten abgeleitet werden können.

Hier liegt das beinahe unübersehbare Arbeitsfeld elektronischer Datenverarbeitungsanlagen, elektronischer Rechner, die in ihrer Konzeption den Erfordernissen der Datenverarbeitung besonders angepaßt sind. Sie haben in der jüngsten Vergangenheit – diesmal ist eine Phrase nur wenig übertrieben – «die Welt erobert». Ihre Anwendungen auch nur aufzuzählen – von der Astronomie bis zur Sprachwissenschaft, von der Medizin bis zur Buchführung, von der Materialplanung bis zur optimalen Steuerung komplizierter Produktionsprozesse – würde den Umfang dieses Abschnitts sprengen.

Neue Berufe, neue Lehrbücher, neue Industrien entstanden; neue Organisationsformen zur effektiven Nutzung der durch die elektronische Datenverarbeitung gebotenen Möglichkeiten bildeten sich heraus. Tausende qualifizierten sich, wurden umgeschult – oder auf die Straße gesetzt, wo elektronische Datenverarbeitung des Profits halber eingeführt wurde.

Die «wunderbaren» Leistungen elektronischer Datenverarbeitung wären nicht denkbar ohne Geräte sowie Einrichtungen zur Verbindung zwischen Computer und Umwelt, zur «Verständigung» mit ihm.

Zu dieser «Peripherie» zählen «äußere Speicher». Für den Computer sind sie umfassende, ständig



*Beispiele für Peripherie-Einrichtungen und -Geräte einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage*

aktualisierbare Bibliothek und Notizbuch oder Kartei zugleich. Sie nehmen bis zu vielen Millionen Daten auf, die nicht sofort und ständig benötigt werden, aber auf Abruf bereitstehen müssen. Von der Anlage erarbeitete Daten können in äußeren Speichern zur späteren Verwendung «abgelegt» werden. Datenbanken, von denen heute soviel die Rede ist, enthalten vor allem leistungsfähige äußere Speicher.

Zur Peripherie gehören ferner die verschiedenen Ein- und Ausgabegeräte, mit deren Hilfe wir Daten eingeben oder Ergebnisse erfassen: Tastaturen, elektrische Schreib- und Fernschreibmaschinen, Lochbandleser und -stanzer, Schnelldrucker, Zeichentische, Koordinatenschreiber usw.

Datensichtgeräte fallen besonders «ins Auge». Auf dem Bildschirm einer Elektronenstrahlröhre erscheint, was wir vom Computer erfahren wollen oder, zur Kontrolle, ihm eingeben, als Text aus Schriftzeilen, als Grafik, Kurve, technische Zeichnung – häufig sogar mehrfarbig. Niemand, der Text eintastet und gleichzeitig aufleuchten sieht, bemerkt auch nur das Geringste von den zahlreichen elektronischen Prozessen «hinter den Kulissen». Speicher werden «befragt», aus welchen Punkten, Strecken- oder Kurvenelementen jedes getastete Zeichen zusammengesetzt ist; ihre Antwort, aus Tausenden Impulsen bestehend, setzt Steuerschaltungen in Tätigkeit, die den wie beim Fernsehen zeilenweise über den Bildschirm geführten Elektronenstrahl genau an den richtigen Stellen aufblenden, das Zeichen schreiben und periodisch so «überschreiben», daß es für den gewünschten Zeitraum sichtbar bleibt.

Noch «wunderbarer» ist das Arbeiten mit dem elektronischen Lichtstift. Setzen wir ihn auf einen beliebigen Bildschirmpunkt, leuchtet dieser auf. Drücken wir gleichzeitig eine Taste, wird an eben dieser Stelle das eingegebene Zeichen geschrieben. Wir können mit dem Lichtstift aber auch Zeichen löschen, einen Text korrigieren und ganze Zeichnungen entwerfen sowie verändern.

Arbeitsplätze für Datenein- und -ausgabe sowie Computer sind oft viele Kilometer voneinander ent-

fernt. Datenfernübertragung überbrückt diese Distanzen. Sie nutzt alle Hilfsmittel und Übertragungswege der Nachrichtentechnik. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, von mehreren Datenendplätzen aus ohne gegenseitige Behinderung gleichzeitig mit einem Computer zu arbeiten. Sogar ganze Rechenanlagen lassen sich über große Entfernungen zusammenschalten. Sie können einander «ergänzen» oder «helfen» – etwa durch Zugriff zu entfernten äußeren Speichern.

Dies alles setzt voraus, daß Geräte, Übertragungsverfahren usw. zueinander «passen», daß sie flexibel, kombinierbar, austauschbar, erweiterbar und – bei der «schnellebigen» Elektronik besonders schwierig – wenigstens für einige Jahre zukunftssicher sind.

Das im Auftrag des Rates für Gegenseitige Wirtschaftshilfe von sozialistischen Ländern gemeinsam entwickelte, produzierte und eingeführte «Einheits-system elektronischer Rechentechnik» (ESER) erfüllt diese Forderungen weitgehend. Es ist ein überzeugendes Beispiel für die Möglichkeiten sozialistischer Integration.

Rechner verschiedener Leistungsklassen, Peripheriegeräte, Übertragungs- und Anschlußeinrichtungen, Programmsysteme sind so aufeinander abgestimmt, daß Arbeit über die Ländergrenzen hinweg keinerlei Schwierigkeiten bereitet und längst selbstverständlich ist.

## Vom Taschen- zum Mikrorechner

Die Leistungsfähigkeit elektronischer Rechenanlagen nahm zu, ihre Baugruppen wurden dank den Fortschritten mikroelektronischer Technologien immer kleiner. Der in der DDR entwickelte und produzierte Mikroprozessorschaltkreis «U 808 D» z. B. «ersetzt» 12000 Dioden und Transistoren, 12000 Widerstände und 6000 Kondensatoren. Mehrere dieser Schaltkreise ließen sich in einer Streichholzschachtel verschicken, wobei den größten Teil des Schaltkreisvolumens die Verkappung und die nach außen führenden Anschlüsse beanspruchen.

Bei solchen Miniaturisierungsgraden konnte die Frage nicht ausbleiben: Lassen sich elektronische Rechner nicht im Taschenformat konstruieren – Rechner, die zwar nicht alles «können» müssen, leistungsmäßig aber etwa dem Rechenstab nahekommen, ihn vielleicht sogar an Genauigkeit übertreffen?

Antwort auf diese Frage gaben mikroelektronische «Rechnerschaltkreise» (in der DDR z. B. «U 821 D»). Sie vereinen auf einem Chip, auf einem winzigen Siliziumplättchen, die gesamte «Zentraleinheit» einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage: Steuer- und Rechenwerk zur Durchführung arithmetischer und logischer Operationen, den Arbeitsspeicher zur Aufnahme des zu erledigenden Programms, der Eingabedaten und der im Rechenverlauf anfallenden Zwischenresultate.

Wenige ergänzende Bausteine lassen aus dem Rechnerschaltkreis einen Taschenrechner werden:

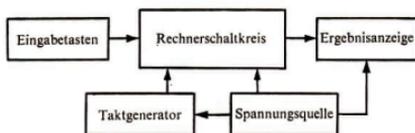
Ein Taktgenerator sichert pünktlichen Datentransport und pünktlich ablaufende Operationen. Tasten übernehmen Dateneingabe und Operationsanweisungen. Leuchtdioden oder die besonders energiesparsamen Flüssigkristallanzeigen machen die Resultate sichtbar. Batterien oder nachladbare Kleinstakkumulatoren sichern die Stromversorgung.

Die von einem Taschenrechner ausführbaren Operationen liegen meist fest. Sie sind als Programm im Arbeitsspeicher «verdrahtet» und entscheiden über die Anwendungsmöglichkeiten des Taschenrechners:

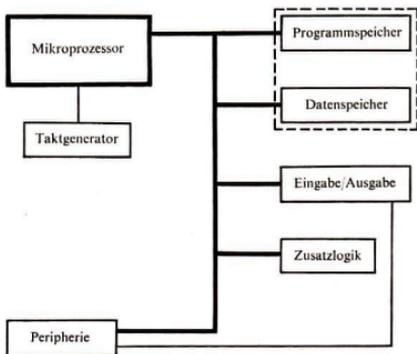
Einfachste Ausführungen beherrschen die Grundrechenarten; sie addieren, multiplizieren, subtrahieren und dividieren. «Ökonomische» Taschenrechner übernehmen außerdem Prozentrechnungen; der «wissenschaftliche» Taschenrechner gestattet darüber z. B. Wurzel- und Potenzberechnungen sowie das Rechnen mit Logarithmen, Winkel- und Exponentialfunktionen.

Selten hat ein elektronisches Gerät so rasch Verbreitung erlangt wie der Taschenrechner. Er steht heute in einer sehr großen Typenvielfalt zur Verfügung.

Es gibt Taschenrechner mit einem oder mehreren



*Die Baugruppen eines einfachen Taschenrechners*



*Die Baugruppen eines einfachen Mikrorechners*

eingebauten zusätzlichen Speichern, solche, an die man eine Druckeinrichtung für die Resultate anschließen kann, Rechner mit eingebauter Uhr (z. B. «MR 411» aus der DDR) und Rechner, die aus einer Sonnenbatterie im «Deckel» gespeist werden. Auch so fragwürdige Lösungen werden «vermarktet» wie jener amerikanische Kleinstrechner, der in eine Armbanduhr integriert ist und nur mit Lupe sowie einer Nadel (zum Drücken der «Tasten») zu bedienen ist.

Extrem miniaturisierte, billige Rechner waren aber nicht nur «für die Tasche», sondern auch an vielen anderen Stellen erwünscht, wo «große» Rechner wegen Aufwand, Platzbedarf und Preis ausschieden: bei der elektronischen Steuerung einzelner Maschinen, von Registrierkassen, von Belichtungszeiten in der Fotografie, zur Patientenüberwachung, in der Fernsprechvermittlungstechnik, bei Manipulatoren sowie Industrierobotern.

Rechnerschaltkreise waren hier meistens nicht einsetzbar – ihr Programm liegt fest und ist unveränderbar. Auf Kundenwünsche konnte man, da die Produktion von Rechnerschaltkreisen nur bei großen Stückzahlen vertretbar ist, nur selten eingehen.

Seit 1971 wird ein hochintegrierter Schaltkreis angeboten, für den diese Einschränkungen nicht gelten: der «Mikroprozessor». Hinter diesem Begriff verbirgt sich nichts anderes als das auf einem Halbleiterchip untergebrachte Rechen- und Steuerwerk einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage (auch dort spricht man von «Prozessor»).

Der Arbeitsspeicher ist nicht, wie beim Rechnerschaltkreis, mit integriert, sondern wird von außen angeschlossen. Diesem Kunstgriff verdankt der Mikroprozessor seine vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. Je nach dem Programm im Arbeitsspeicher kann der gleiche Mikroprozessor für unterschiedlichste Aufgaben eingesetzt werden. Speicherwechsel oder Umprogrammieren genügen; ein Eingriff in den Mikroprozessor ist nicht nötig.

Speicher für diese Zwecke gibt es in mehreren Varianten: In «Nur-Lese-Speichern» ist das vom Kunden bestellte Programm unveränderbar «ver-

drahtet». Entschließt sich der Benutzer für einen «programmierbaren» Speicher, kann er selbst programmieren, schließlich existieren Speicher, die sich (z. B. durch Ultraviolettbestrahlung) löschen und erneut programmieren lassen.

Wie ein Rechnerschaltkreis muß der Mikroprozessor, um «arbeiten» zu können, durch einige Baugruppen ergänzt werden: durch weitere Speicher, durch einen Taktgenerator, durch Ein- sowie Ausgabeinrichtungen. Ergebnis ist der «Mikrorechner», der «Mikrocomputer». Er ist preiswert, klein (oft wird das ganze System auf einer postkartengroßen Leiterplatte untergebracht) und sehr zuverlässig. Seine Bedienung ist häufig so einfach, daß der Benutzer gar nicht empfindet, daß er mit einem hochkomplizierten elektronischen System umgeht.

Der Mikrorechner kann nicht nur arithmetische Operationen ausführen. Er ist, wie seine «großen Brüder» (wenngleich in bescheidenerem Umfang) ebenso für logische Operationen und Verknüpfungen geeignet, sofern ihm diese durch ein entsprechendes Programm angewiesen werden.

Es ist keine Übertreibung: Gegenwärtig kommen fast täglich neue Anwendungen des Mikroprozessors bzw. des Mikrorechners hinzu.

Klein- und Großwaagen, Münzwechsellautomaten, Tanksäulen werden von Mikrorechnern gesteuert. Patienten auf Intensivstationen und bei Operationen werden ständig überwacht, Bestrahlungen dosiert, Substanzen analysiert, in bestimmten Verhältnissen gemischt und in vorgegebenen Mengen abgefüllt.

Nach den von Meßfühler eingeleiteten Signalen steuern Mikrorechner Werkzeugmaschinen, Mährescher, Fließbänder, Taktstraßen, wobei die Ausgangssignale – oft mit Hilfe der Leistungselektronik – sofort in Handlungen umgesetzt werden.

Sogar im Haushalt hilft der Mikroprozessor inzwischen. Er führt die Programme von Wasch- und Nähmaschinen, steuert Geschirrspülautomaten sowie elektrische Herde. Er regelt Heizungssysteme und ist an der Bedienung des Fernsehempfängers sowie den «berühmten» Bildschirmspielen beteiligt. Er bedient elektrische Schreibmaschinen und Fern-

schreiber, Setzmaschinen und Kopierautomaten, ganz abgesehen von zahllosen weiteren Anwendungen in der Nachrichtentechnik sowie im Verkehrswesen.

Bauen wir mit Hilfe eines Mikroprozessors einen Taschenrechner auf, wird dieser «programmierbar» – wir brauchen nur die einsteckbare Programmkarte auszuwechseln.

Der Mikroprozessor ist fast ein «Zauberer». Daß viele, die durch ihn ihren Arbeitsplatz verloren (allein in einem westlichen Konzern wurden 600 Feinmechaniker arbeitslos, weil man die Produktion auf mikrorechnergesteuerte Fernschreiber umstellte), ihn als «bösen Zauberer» ansehen, geht freilich nicht zu Lasten der Mikroelektronik, sondern derjenigen, die sie nur als Werkzeug eigener Bereicherung ansehen.

## Hören – Sehen – Sprechen

Bereits die ersten leistungsfähigen elektronischen Datenverarbeitungsanlagen versuchten, Fachtexte zu übersetzen. Zwar las sich ihre Übersetzung anfänglich recht ungehobelt, doch war das nicht Schuld der Rechner, sondern der noch nicht ausgefeilten Programme und der zu geringen Speicherkapazitäten. Inzwischen sind elektronische Übersetzungen längst keine Sensation mehr; die vielen Anekdoten, zu denen sie Anlaß gaben, sind fast vergessen.

Sogar Taschen-Sprachübersetzer sind bereits im Handel. Wörter und einfachste Wendungen werden einem Mikrocomputer eingetastet, die Übersetzung leuchtet in einem Anzeigefeld auf. Etwa 1 500 Vokabeln und 200 Wendungen «weiß» das Gerät. Durch Speicherwechsel wird es für mehrere Sprachen verwendbar.

Der elektronische Simultandolmetscher existiert bisher nur in utopischen Filmen. Überhaupt bleibt auf dem Gebiet der hörenden, sprechenden und sehenden Computer noch recht viel zu tun. Zwar gibt es Datenverarbeitungsanlagen, die gesprochene Wörter als akustische Eingabe anerken-

nen, die Druckschrift lesen können, die endlich selbst sprechen – aber das alles sind vorerst Anfänge. Noch kann kein Computer jede «Apothekerschrift» entziffern, eine undeutliche, verzerrte oder dialektgefärbte Sprache verstehen, mit «natürlicher» Stimme reden.

Wahrscheinlich wird uns das Studium unserer Sinnesorgane und vor allem der Vorgänge im Hirn auf diesem Wege weiterhelfen, eine wichtige Aufgabe auch für die noch junge Wissenschaft Bionik. Gewiß ist auch, daß es gelingen muß, noch «informationsdichtere», d. h. kleinere und leistungsfähigere Speicher als bisher einzusetzen. «Magnetblasen», «Lichtblasen», endlich die Anwendung der Holographie erscheinen hier aussichtsreich.

Was der hörende, sehende, sprechende Computer bedeuten könnte und eines Tages bedeuten wird, ist gegenwärtig nur schwer vorstellbar.

Wie «hilfreich» würde sich allein ein Mikrorechner auswirken, der Blinde sicher führt, ihnen das Lesen ermöglicht. Wie nützlich könnte eine Anlage sein, die jeden Text lesen, nach bestimmten Kriterien inhaltlich ordnen und speichern, die vielleicht sogar vorlesen könnte.

Irgendwann in der Perspektive werden diese Ziele erreicht. Auch der elektronische Simultandolmetscher wird dann nicht mehr Utopie bleiben, sondern nur eines unter den «Wundern» sein, die uns täglich begleiten.

# Sachwortverzeichnis

- Ablenksystem 51, 55  
Akkumulator 28, 43, 98, 134  
Aluminium-Stahlseil 23  
Anode 49  
Antennenverstärker 121  
Apertursynthese 130  
Arbeitspeicher 150  
Aufdampfen 69  
automatischer Sendersuchlauf 109  
– Streckenblock 145  
automatische Scharfabstimmung 109  
Automatisierung 66  
Autopilot 145
- Bahnstrom 62  
Bild-element 51  
--fernsprecher 84  
--röhre 50  
– –, flache 111  
--schirm 50  
– --spiele 112  
– --textsystem 112  
binäre Signale 82  
Bionik 155  
Biozelle 136  
Blockzentrale 9  
Brennspannung 58  
Brennstoffblock 41  
Brennstoffe, fossile 11  
Brennstoff-element 135  
--zelle 135
- Brutreaktor 12  
Bündelleiter 25
- chemische Stromquelle 42  
Chip 82  
CETTI 131  
Computer 55, 152
- Daten-fernübertragung 152  
--sichtgerät 152  
Deuterium 13  
Diffusions-maske 72  
--technologie 72  
Dotieren 71  
drahtlose Energieübertragung 26  
– Rufanlage 84, 149  
Druckwasserreaktor 11
- Echo 1 A 95  
Einschlafaste 109  
Einseitenbandbetrieb 93, 110  
Ekran 98  
Elektro-energieverbundsystem 20  
--fahrzeug 133  
--magnet 47  
Elektronen 49  
--linse 50  
--mikroskop 53  
--optik 50  
--sonde 52  
--strahl 49, 55, 70
- Elektronenstrahl-ofen 56  
– --schmelzen 56  
– --schmelzofen 56  
– --schweißen 55  
Energie-dichte 43  
--erzeugungskosten, spezifische 10  
--system der SU 20  
--übertragung, drahtlose 26  
--verluste 25  
ENIAC 150  
ESER 152
- Feldelektronenmikroskop 54  
Fernleitung 23  
Fernsehempfänger 51  
Fernsehen 105  
Fernseh-kamera 51  
--telefon 84  
Fernsprecher 83  
Festkörperschaltkreis 69, 71, 81  
Filmschaltkreis 69  
Flip-Flop-Schaltung 82  
fossile Brennstoffe 11  
Foto-diode 88  
--element 28  
--Jack 55  
Frequenzmodulation 106  
Funkfeld 91
- Gas-entladungsröhre 58  
--turbinenanlage 23

- gedruckte Schaltung 68  
Geisterbild 121  
Gemeinschaftsantenne 121  
Generator-leistung 10  
-, magnetohydrodynamischer 17  
-, supraleitender 48  
geostationärer Satellit 96  
Glasfasernachrichtenübertragung 88  
Gleichrichter 58  
--anlage 25  
--lokomotive 63  
-, steuerbarer 59  
Gleichstrommotor, kommutatorloser 64  
Gleisbildstellwerk 145  
Großgemeinschaftsantennenanlage 122  
Großschaltkreis 82, 150
- Haftmaske 55  
Halbleiter-diode 61  
--gleichrichter 61  
--technik 42  
Halbwertszeit 42  
Heimkommunikationszentrum 124  
Heliolicht-Anlage 30  
Hochspannungs-Gleichstromübertragung 25, 63  
Hohlleiter 26, 87  
Hörrundfunk 105  
Hybridschaltkreis 71
- Ignitron 60  
Induktionsschleifen-Technik 149  
INMARSAT 103  
Inselbetrieb 21  
integrierter Schaltkreis 54, 68, 150  
integrierte Schaltung 68  
Ionenröhre 58  
Ionosphäre 93  
Isolatoren 24  
Isolierwanne 81
- Kabel-baum 66  
--fernsehen 122  
-, supraleitendes 45  
Kältekabel 26  
Katode 49  
Katodenstrahlen 49
- Kennfrequenz 110  
Kern-energieantrieb 133  
--fusion 13  
--fusionskraftwerk 13  
--kraftwerk 11, 13  
--reaktor 11, 19, 41  
--spaltung 12  
--verschmelzung 16  
Knallgaszelle 135  
Koaxialkabel 87  
kommutatorloser Gleichstrommotor 64  
Kompatibilität 108  
Kondensator 71  
Konverter 121  
kopfbezogene Stereophonie 107  
Kopfstation 123  
Koronaverluste 25  
Kransteuerung 61  
kreiselstabilisierte Plattform 104  
KRT 10 130  
Kryoelektronik 48  
Kryotron 48  
Kunstkopfstereophonie 107  
Kurzwellenverkehr 93
- Lackhaftmaske 72  
Langbasisinterferometrie 129  
Laser 27, 126  
--diode 88  
--licht 91  
--verbindung 91  
Lauffen 20  
Leistungselektronik 58  
Leiterplatte 68  
Leitungswiderstand 23, 26  
Leuchtdiode 111  
Licht-bogen 24  
--stift 152  
linienförmige Zugbeeinflussung 147  
Lochstreifensender 93
- magentische Flasche 16  
magnetohydrodynamischer Generator 17  
Magnet, supraleitender 18  
MASER 126  
Mehrebenenplatte 68
- Meßwertgeber 61  
MHD-Generator 17, 32, 47  
Mikro-elektronik 65  
--prozessor 82, 148, 150, 154  
--schaltkreis 152  
--rechner 150, 154  
--wellen 26  
MIR 20, 25  
Mittelwellenbereich 106, 110  
Modulationsverfahren 89  
Molnija 97  
Morsezeichen 89
- Nachrichten-kanal 85  
--satellit 95  
Natrium-Schwefel-Akkumulator 134  
Normwandler 122  
Nuklide, radioaktive 41
- Obninsk 11  
Oszilloskop 51
- Parabolantenne 127  
parametrischer Verstärker 126  
PCM 89  
Pilottonverfahren 107  
Planartechnologie 71  
Plasma 16, 17  
Plattform, kreiselstabilisierte 104  
Plutonium 13  
Produktivität 66  
Programmgeber 61  
Pseudquadrofonie 108  
Pulsodemodulation 89  
Pumpspeicherwerk 21
- Quadrofonie 107  
Quarzuhr 112  
Quecksilberdampfgleichrichter 61
- radioaktive Nuklide 41  
Radio-fenster 125  
--interferometer 128  
--nuklidbatterie 41, 98, 134  
--teleskop 128, 138  
Rasterelektronenmikroskop 53  
RATAN 600 128  
Rauschgenerator 128

- Reaktortypen 11  
 Rechnerschaltkreis 153  
 Regenerativzelle 136  
 Relaisstation 91  
 Repeater 88  
 Richtfunk-strecke 90  
 --technik 90  
 Röhrengeräte 105  
 Romaschka 42  
 Röntgenschattemikroskop 52  
 Rufanlage, drahtlose 84, 149
- Saatstoffe 18  
 Saharasat 100  
 Sajano-Schuschenskoje 9  
 Satellitendirektfernsehen 100  
 Satellit, geostationärer 96  
 Schaltkreis, integrierter 54, 68, 150  
 Schaltung, gedruckte 68  
 --, integrierte 68  
 Scharfbestimmung, automatische 109  
 Schichtplatten, thermoelektrische 32  
 Schiffsfunk 93  
 Seebeck-Effekt 31  
 Selbststeueranlage 145  
 Selektivruverfahren 94  
 Sendersuchlauf, automatischer 109  
 Sensortaste 109  
 Siedewasserreaktor 11  
 Signale, binäre 82  
 Siliziumgleichrichter 61  
 Solarzelle 28  
 Sonnen-batterie 28, 98  
 --matte 31
- Sonnenbatterie-energie 28  
 --kraftwerk 29  
 --zelle 28  
 Speicher 152  
 Spitzenbelastungszeit 22  
 Spitzenkraftwerk 22  
 Sprungtemperatur 44, 46, 47  
 Sputnik 1, 95  
 Stereophonie 107  
 Strahlendetektor 53  
 Streckenblock, automatischer 145  
 Stromquelle, chemische 42  
 Substrat 69  
 supraleitender Generator 48  
 -- Magnet 18  
 supraleitendes Kabel 45  
 Supraleitfähigkeit 26, 44, 47  
 Synchronisierimpulse 51  
 Synchronsatellit 96, 101
- Taschenrechner 153  
 Telesat 100  
 Teletextsystem 112  
 Thermo-batterie 32  
 --effekt 31  
 thermoelektrische Schichtplatten 32  
 Thermo-element 31, 41  
 --kompression 81  
 --spannung 31  
 Thyatron 60  
 --steuerung 60  
 Thyristor 61  
 TOKAMAK 16  
 Trägerfrequenz-kabel 87, 93
- Trägerfrequenz-technik 85  
 Transformator 24  
 Transistor 61  
 --radio 106  
 Transozeanfernsprechkabel 93  
 Tritium 13
- Übertragungsspannung 23  
 UKW-Rundfunk 106  
 Ultraschallschweißen 81  
 Umspannwerk 20
- Verbund-betrieb 20  
 --netz 25  
 --system MIR 20, 25  
 Verlustleistung 23  
 Verstärker, parametrischer 126  
 Vielfachzugriff 98
- Wärmekraftwerk 9  
 Wasserkraftwerk 9  
 Wechsel-maske 70  
 --richter 26  
 Wechselstromtechnik 10  
 Widerstand 23, 44, 71, 81  
 Widerstandswärme 44
- Zentraleinheit 153  
 Zifferntasten 83  
 Zschornowitz 11  
 Zugbeeinflussung, linienförmige 147  
 Zündspannung 58  
 Zwischenverstärker 87

## Bildnachweis

- VEB Carl Zeiss JENA 73, 77 oben, 137  
 VEB Funkwerk Erfurt 75, 76 unten,  
 77 unten, 141, 142  
 VEB Gerätebau Limbach 117 oben  
 VEB Kombinat Robotron 139, 140,  
 143  
 VEB Robotron-Elektronik Radeberg  
 113, 115
- VEB Stern-Radio Sonneberg 116,  
 117 unten, 118  
 VEB Ultraschalltechnik Halle 74  
 oben  
 VEB Transformatoren- und Röntgen-  
 werk „Hermann Matern“ (TuR  
 Dresden) 33, 34, 35  
 RFT-Information 119
- IZE-Informationszentrale der  
 Elektrizitätswirtschaft e. V., Bonn  
 36, 38, 39  
 Siemens-PresseDienst 37, 40, 74 unten,  
 76 oben, 78, 80, 79 unten, 114, 120,  
 144  
 The Marconi Co. Ltd. 79 oben  
 Archiv des Verfassers

Dieser Band erscheint in Zusammenarbeit  
mit der «URANIA» Gesellschaft  
zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse

Vorsatzpapier vorn  
Elektrizität läßt den Verkehr auf Autobahnen  
und Straßen auch nachts pulsieren

© VEB Fachbuchverlag Leipzig 1981  
1. Auflage  
Lizenznummer: 114-210/69/81  
LSV 3009  
Verlagslektor: Helga Schmiedel  
Gestaltung: Renate Schiwiek  
Technische Zeichnungen: Günter Peter  
Printed in GDR  
Gesamtherstellung: INTERDRUCK  
Graphischer Großbetrieb Leipzig - III/18/97  
Redaktionsschluß: 30. 1. 1981  
Bestellnummer: 546 6031  
DDR 22,— M

