

Walter Conrad
Roboter
in unserer Hand

REGEN
BOGEN
REIHE



Regenbogenreihe

Walter Conrad

Roboter in unserer Hand —
die Elektronik
hilft dem Menschen

Illustrationen von Heinz Grothmann und Konrad Golz
Einband Konrad Golz

Der Kinderbuchverlag Berlin

Elektronen unterwegs

Täglich begegnet uns die Elektronik. Ohne sie gäbe es weder Rundfunk noch Fernsehen, weder Raumfahrt noch elektronische Datenverarbeitung. Wir könnten kein Ferngespräch führen; Krankenhäuser und Polikliniken müßten auf wichtige Geräte verzichten. Die Möglichkeiten der Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik könnten nur sehr unvollkommen ausgeschöpft werden.

Die Bedeutung der Elektronik wächst mit nahezu atemberaubender Geschwindigkeit. Als Leistungselektronik steuert sie Ströme von Hunderten Ampere, wie sie durch die Motoren von Elektrolokomotiven und Baggern fließen; als Kraftfahrzeugelektronik ersetzt sie störanfällige Kontakte, erhöht die Verkehrssicherheit und hilft Kraftstoff sparen. Die Elektronik findet in Haushaltsgeräten, ja sogar bei der Modelleisenbahn Anwendung und ist dabei, zahlreiche weitere Gebiete zu erobern. Kaum ein Berufs- oder Produktionszweig wird sie künftig entbehren können. Die wissenschaftlich-technische Revolution wäre ohne Elektronik schwerlich vorstellbar. Das alles ist Grund genug, sie kennenzulernen.

Ihren Namen verdankt die Elektronik dem *Elektron*, einem winzigen Elementarteilchen mit negativer Ladung, das gegen Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt wurde. Elektronen sind Bestandteile aller Atome, deren Kerne sie umkreisen; an sämtlichen elektrischen Erscheinungen sind sie entscheidend beteiligt.

Wo immer sich die Elektrizität bemerkbar macht, sind Elektronen im Spiel. Sie lassen, zu Billionen und Trillionen durch Leitungen wandernd, Lampen leuchten, treiben Motoren und rufen, häufig zusammen mit anderen „Ladungsträgern“, die Erscheinungen hervor, auf denen die Elektronik beruht.

Schlagen wir in einem Lexikon unter Elektronik nach,

lesen wir etwa: „ . . . Gegenwärtig zählt man zur Elektronik alle Geräte, Einrichtungen und Verfahren, deren Wirkungsweise völlig oder zum Teil auf der gesteuerten Bewegung von Elektronen im luftleeren Raum, in Gasen oder Halbleitern beruht . . . “.

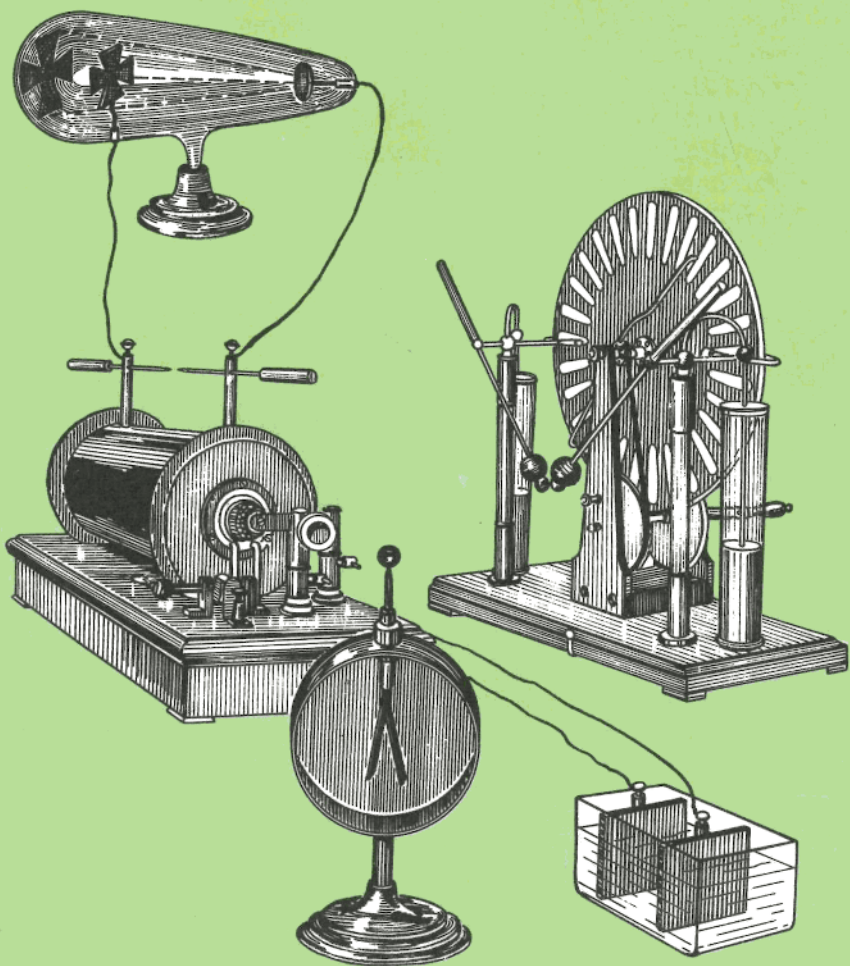
Die Elektronik macht es uns nicht allzu schwer, sie näher kennenzulernen: So wie zu einem Schachspiel verhältnismäßig wenige unterschiedliche Figuren gehören, die nur nach bestimmten Regeln gezogen werden können, deren Zusammenwirken jedoch viele Millionen Zugkombinationen ergibt, ist die Zahl der verschiedenartigen elektronischen Bauelemente nicht sehr groß; auch die Funktionen, die sie – zu Baugruppen vereint – ausüben, kehren immer wieder. Erst die Verknüpfung von Hunderten, Tausenden, nicht selten Hunderttausenden Bauelementen ergibt die Vielfalt elektronischer Schaltungen und Geräte.

In elektronischen Bauelementen werden die Elektronen gesteuert, indem man sie bremst oder beschleunigt, ihre Bewegungsrichtung beeinflusst oder sie in bestimmte Bahnen zwingt. Das kann durch elektrische oder magnetische Kräfte, durch Licht- oder auch Temperaturänderungen erfolgen. Die Steuerwirkung setzt unverzüglich ein. Elektronen „gehören“ auch schnellsten und innerhalb kürzester Zeit aufeinanderfolgenden Steuerkommandos; elektronische Geräte reagieren infolgedessen blitzschnell.

Mit den wichtigsten und zugleich verbreitetsten elektronischen Bauelementen wollen wir uns bekannt machen und zunächst zwischen Elektronenröhren und Halbleiterbauelementen unterscheiden. In jenen bewegen sich die Elektronen in möglichst luftleerem Raum, im Vakuum, in diesen in einem festen Stoff, jedoch nach anderen Gesetzen als in Metallen.

Ältestes elektronisches Bauelement ist die *Diode*, die wir zunächst als Elektronenröhre kennenlernen wollen. Sie

*Mit solchen Geräten wurde
das Elektron entdeckt,
und erforscht*



besteht, wie alle Elektronenröhren, aus einem luftleer gepumpten Gefäß, gewöhnlich einem gläsernen Röhrenkolben, der metallische Gebilde, Elektroden, einschließt. Sie führen der Röhre die Betriebsspannungen bzw. -ströme zu und verbinden sie mit anderen Bauelementen.

Die Diode (Bild 1) enthält zwei Elektroden, *Katode* und *Anode*. Die Katode ist eine „Elektronenquelle“, die auf der schon gegen Ende des 19. Jahrhunderts bekannten Erscheinung beruht, daß ein erhitzter Leiter Elektronen freisetzt, und folgendermaßen konstruiert ist:

Ein Röhrchen trägt außen eine Schicht aus Stoffen, die für die Elektronenabgabe besonders gut geeignet sind. Im Inneren des Röhrchens und gegenüber diesem isoliert ist eine Heizwendel untergebracht. Wird sie von einem Strom durchflossen, erhitzt sie Katodenröhrchen und Schicht. Sobald diese die nötige Temperatur erreicht hat, sobald die Röhre „warm“ geworden ist, beginnt der Elektronenaustritt.

Die Anode nimmt die aus der Katode tretenden Elektronen auf. Sie ist zylinder- oder kastenähnlich geformt und umgibt die Katode in geringem Abstand. Getter und Getterniederschlag, aus bestimmten Chemikalien bestehend, binden Gasreste, die im Laufe der Zeit aus den Röhrenteilen treten und das Vakuum verschlechtern würden.

Damit Elektronen die Anode erreichen können, muß zwischen Katode und Anode eine elektrische Spannungsquelle so geschaltet werden, daß ihr positiver Pol mit der Anode, ihr negativer mit der Katode verbunden ist. Dann zieht die positive Anode die negativen Elektronen an. Sie treten in die Anode ein und wandern über das Strommeßinstrument und die Spannungsquelle wieder zur Katode. Solange die Diode „geheizt“ wird, hält dieser Kreislauf an. Es fließt ein *Anodenstrom*. Er fehlt, wenn die Spannungsquelle umgekehrt angeschlossen wird; denn die nunmehr negative Anode stößt die Elektronen ab.

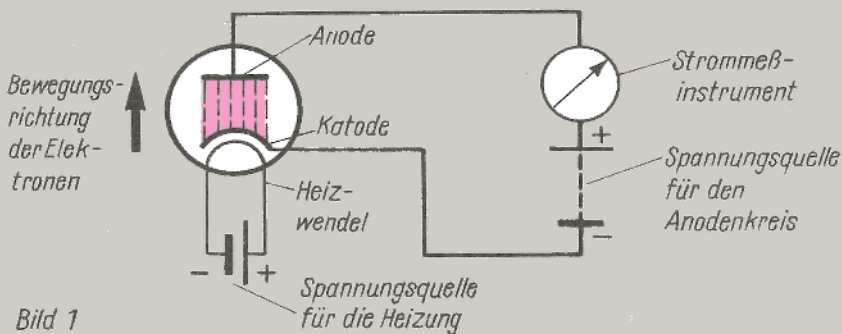
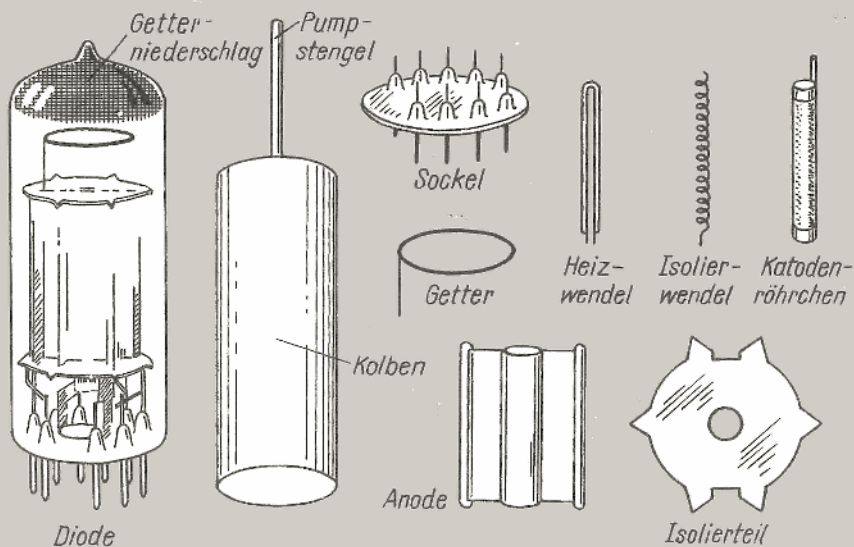


Bild 1

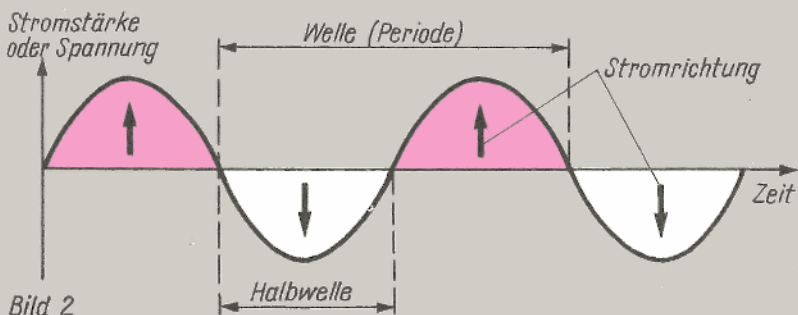


Bild 2

Damit kennen wir die für die Elektronik wichtigste Eigenschaft einer Diode: Sie läßt den Stromfluß nur in einer Richtung zu, sperrt ihn in der Gegenrichtung und verhält sich somit wie ein „elektrisches Ventil“.

Solche Ventile sind nötig, um Stromstöße verschiedener Richtung, Spannung oder Stärke voneinander zu trennen, elektrischen Signalen zeitweilig Leitungswege zu öffnen oder zu versperren, sie nach bestimmten Regeln miteinander zu verknüpfen, in ihrer Größe zu begrenzen usw.

Vor allem aber wird die Diode zur *Gleichrichtung*, zum Umwandeln von Wechselstrom in Gleichstrom, eingesetzt. Das ist unter anderem immer dann erforderlich, wenn elektronische Geräte, deren Baustufen mit Gleichstrom gespeist werden müssen, zum Beispiel Rundfunk- oder Fernsehempfänger, an das Wechselstrom führende Stromnetz angeschlossen werden sollen.

Gleichstrom (z. B. aus einer Taschenlampenbatterie) fließt ständig in derselben Richtung und Stärke. Wechselstrom (Bild 2) hingegen verläuft wellenartig, Strom und Spannung steigen auf einen Höchstwert und sinken wieder auf Null. Am Ende der „Halbwelle“ kehrt sich die Stromrichtung um, es folgt eine Halbwelle in Gegenrichtung usw. Die Zahl der Wellen (Perioden) je Sekunde wird als Frequenz bezeichnet und in *Hertz* (Hz), Kilohertz (kHz), Megahertz (MHz) und Gigahertz (GHz) ausgedrückt. Es ist $1 \text{ GHz} = 10^3 \text{ MHz} = 10^6 \text{ kHz} = 10^9 \text{ Hz}$.

Das Bild zeigt die Möglichkeit zur Umwandlung: Jede zweite Halbwelle „muß weg“; dann bleiben nur Halbwellen *einer* Stromrichtung, aus Wechselstrom wird Gleichstrom. Wir erreichen das, indem wir eine Diode als Ventil in den Wechselstromkreis schalten. Mit Gleichstrom, wie etwa aus der Taschenlampenbatterie, hat dieser aus einzelnen Stromschüben zusammengesetzte Strom zunächst nur die gleichbleibende Richtung gemein. Doch kann man auf verhältnismäßig einfache Weise erreichen, daß die

Lücken zwischen den verbleibenden Halbwellen gefüllt und die Strom- und Spannungsschwankungen nahezu eingeebnet werden.

Dioden richten Ströme von den niedrigsten bis zu den höchsten Frequenzen gleich. In den Empfängern der drahtlosen Nachrichtentechnik dienen sie als „Gleichrichter-röhren“ für die Stromversorgung und auch zur Rückgewinnung der durch Funkwellen übertragenen Signale. Weit größere Bedeutung erlangte die Elektronenröhre als *Verstärkerröhre*. Diese interessierte zunächst vor allem Nachrichtentechniker: Telegramme, Ferngespräche, Funktelegramme erlitten unterwegs Verluste. Bei großen Entfernungen erreichten sie ihre Gegenstelle so geschwächt, daß Telegrafienapparate oder der Hörer eines Fernsprechers nicht mehr ansprachen.

Nur eine *Verstärkung* konnte Abhilfe bringen. Ihr Grundprinzip (Bild 3) ist: Das „schwache“ Signal, das *Eingangssignal*, steuert einen „kräftigen“ Strom genau im Takt, im Rhythmus des Eingangssignals. Aus seinen Änderungen ergibt sich ein *Ausgangssignal*, dessen Energie nicht dem Eingangssignal, sondern einer zusätzlichen Energiequelle entstammt. Übrigens wird dieses Prinzip der Verstärkung in der Technik sehr häufig angewandt: Der Fingerdruck des Kranführers als Eingangssignal genügt, um die Energie zur Bewegung schwerster Lasten zu steuern; mit dem Gaspedal läßt sich der größte LKW beschleunigen.

Für die Übermittlung von Telegrammen auf Leitungen gab es eine einfache Lösung: Man schaltete in Abständen „Relais“ in den Leitungsweg, Bauelemente, in denen ein vom Eingangssignal erregter Elektromagnet im Rhythmus der Telegrafiezeichen Kontakte betätigte, die einen kräftigen Strom für den folgenden Leitungsabschnitt ein- und ausschalteten. Mit Hilfe mehrerer Relais konnte man beliebig weit telegrafieren.

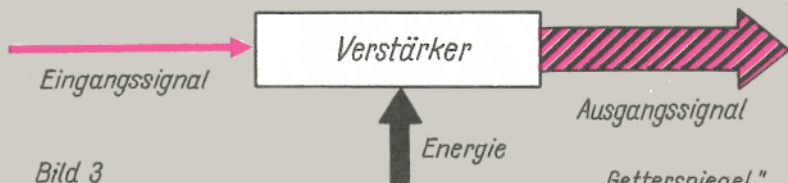
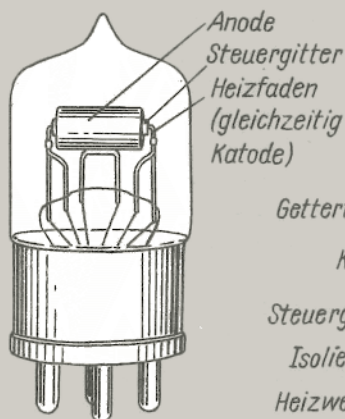
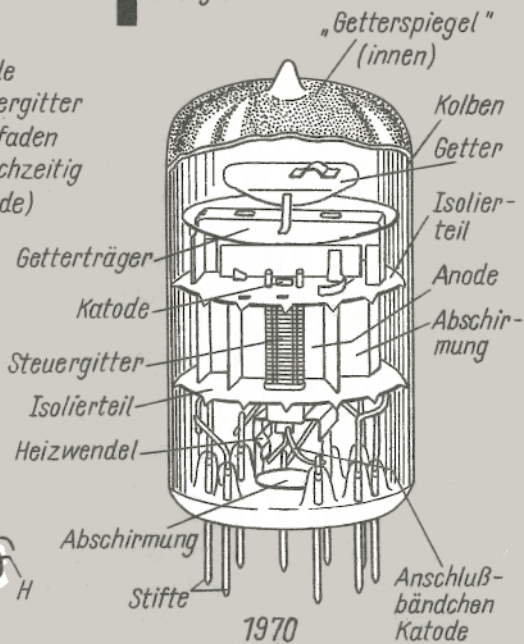
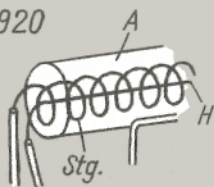


Bild 3



1920



1970

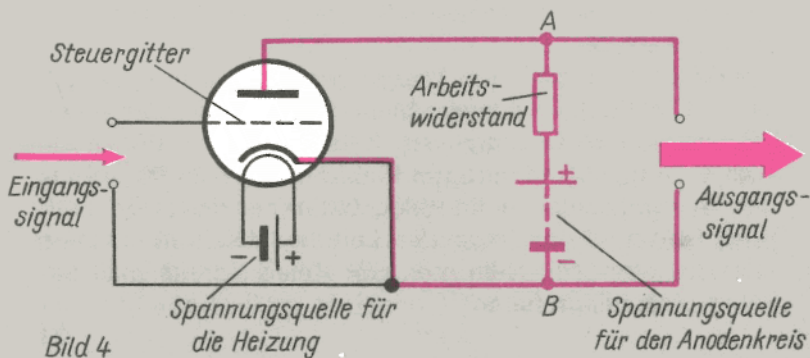


Bild 4

Beim Telefonieren war das Relais nicht anwendbar. Telegrafiezeichen sind Stromstöße mit Pausen dazwischen, das Relais braucht nur zwischen den zwei Zuständen Strom – kein Strom zu unterscheiden. Beim Telefonieren hingegen verwandelt das Mikrofon Schallschwingungen in Wechselstrom, dessen Stärke und Frequenz sich fortwährend ändern. Auch in der Funktechnik hat man es mit Wechselströmen (von meistens sehr hoher Frequenz) zu tun. Diese „Sprache“ versteht das Relais nicht.

Eine verstärkende Anordnung für die Fernsprech- und Funktechnik muß stetig verlaufende Eingangssignale oft bis zu höchsten Frequenzen verarbeiten, und das Ausgangssignal muß ein möglichst genaues, unverzerrtes „Bild“ der Eingangssignale sein.

Das erste verstärkende elektronische Bauelement, die *Triode* (Bild 4), entstand, als man zwischen Katode und Anode einer Diode als dritte Elektrode das *Steuergitter* anbrachte. Die Bezeichnung rührt daher, daß diese Elektrode anfänglich die Gestalt eines Drahtgitters hatte (heute ist sie eine Drahtwendel oder ein mit dünnen Drähten bespanntes Rähmchen) und dazu bestimmt ist, den Elektronenstrom zu steuern.

Auf ihrem Wege zur Anode passieren die Elektronen die Lücken im Steuergitter. Jede elektrische Spannung zwischen Steuergitter und Katode wirkt sich auf die Elektronenbewegung aus. Ist das Steuergitter gegenüber der Katode negativ, stößt es Elektronen ab, hemmt ihre Bewegung und vermindert so den Anodenstrom, und zwar um so mehr, je höher die Spannung ist. Von einer bestimmten Spannung ab gelangen überhaupt keine Elektronen mehr durch das Gitter – der Anodenstrom wird unterbrochen. Durch eine Steuerspannung zwischen Steuergitter und Katode kann man also den Anodenstrom ein- und ausschalten; die Triode läßt sich als „elektro-nischer Schalter“ benutzen.

Eine gegenüber der Katode positive Spannung am Steuergitter würde, wie die Spannung an der Anode, anziehend auf die Elektronen wirken. Beide Anziehungswirkungen unterstützen sich, der Anodenstrom nimmt zu. Gleichzeitig fängt das positive Gitter Elektronen ein, neben dem Anodenstrom fließt ein Gitterstrom. Er ist meistens unerwünscht. Man vermeidet daher ein positives Steuergitter und macht es gegenüber der Katode nur „mehr“ oder „weniger“ negativ.

Wird dem Steuergitter eine zu verstärkende Spannung in entsprechender Weise als Eingangssignal zugeführt, ändert sich die Spannung zwischen Steuergitter und Katode im Rhythmus des Eingangssignals; im gleichen Rhythmus schwankt der Anodenstrom. Das Eingangssignal steuert den Anodenstrom. Durch die Konstruktion der Elektronenröhre sowie durch entsprechende Wahl ihrer Betriebsbedingungen kann erreicht werden, daß kleine Eingangssignale erhebliche Änderungen des Anodenstroms auslösen. Das Eingangssignal erscheint verstärkt in Gestalt von Anodenstromänderungen; die Triode arbeitet als Verstärkerröhre.

Sehr oft wird nicht ein im Rhythmus der Eingangssignale schwankender *Strom*, sondern eine Ausgangsspannung verlangt. Sie ist leicht zu gewinnen, indem zwischen Spannungsquelle des Anodenkreises und Anode ein Widerstand – Arbeitswiderstand genannt – geschaltet wird. An diesem ruft der schwankende Anodenstrom einen proportional schwankenden Spannungsabfall hervor; an den Punkten A und B kann eine verstärkte Ausgangsspannung abgenommen werden.

Mit einer Triode kann man eine Spannung in günstigen Fällen etwa 100fach verstärken. Reicht das nicht aus, so schaltet man mehrere Verstärkerröhren hintereinander, so daß das Ausgangssignal der ersten Eingangssignal der zweiten ist usf.

Die Triode blieb nicht lange die einzige Verstärkerröhre. Sie bekam Geschwister mit besseren elektrischen Eigenschaften, die unter anderem auf den Einbau weiterer Gitter zurückzuführen sind. So enthält die *Pentode*, eine überaus häufig angewandte Elektronenröhre, insgesamt 3 Gitter. Dem Steuergitter folgt in Richtung zur Anode zunächst das Schirmgitter. Das Bremsgitter schließt sich an, eine Sperre für Sekundärelektronen – das sind Elektronen, die durch den Aufprall der von der Katode kommenden Elektronen aus der Anode „herausgeschlagen“ werden, zum Schirmgitter gelangen und unerwünschte Effekte hervorrufen können. Mit einer Pentode läßt sich eine fast tausendfache Verstärkung erreichen.

So unentbehrlich und nützlich die Elektronenröhre für die Elektronik war und ist, Fachleute übersahen ihre Mängel nicht. Aufbau und Herstellung sind kompliziert. Der größte Teil der Elektroenergie, die zu ihrem Betrieb nötig ist, wird in Wärme umgewandelt. Auch kann man Elektronenröhren nicht beliebig verkleinern. Das fällt um so stärker ins Gewicht, je mehr Röhren elektronische Geräte enthalten. Gegenüber Stoß, Erschütterungen und mechanischer Beanspruchung überhaupt sind Elektronenröhren in der Regel empfindlich; ihre Katoden sind nach einigen tausend Betriebsstunden erschöpft. Daß diese und andere Mängel sich nicht beseitigen ließen, war einer der Gründe für die rasche Entwicklung der *Halbleitertechnik*, deren bekanntestes Bauelement, der Transistor, vor 25 Jahren erfunden wurde.

Halbleiter erhielten ihren Namen auf Grund ihrer elektrischen Eigenschaften: Sie leiten den Strom, sind also keine Isolatoren, aber sie leiten so schlecht, daß man sie keinesfalls als Leiter bezeichnen und etwa mit Kupfer oder Aluminium auf eine Stufe stellen kann. Die technische Bedeutung der Halbleiter blieb daher verhältnismäßig lange gering. Auch daß sie ermöglichten, Licht- in Strom-

schwankungen umzusetzen oder sich als Kristalldetektor in „Opas Radio“ millionenfach bewährten, änderte daran nicht viel.

Erst als sich die Physiker der Halbleiter – zu diesen zählen vor allem Germanium und Silizium, aber auch Selen und zahlreiche chemische Verbindungen wie Kadmiumsulfid, Galliumarsenid, Bleitellurid, ferner Verbindungen der organischen Chemie – annahmen und feststellten, daß es nicht so sehr auf den Wert der Leitfähigkeit ankommt, sondern vor allem darauf, wie diese entsteht, wurden Halbleiter für die Technik interessant.

In Metallen besteht der elektrische Strom aus sogenannten Leitungselektronen; das sind Elektronen, die von den Leiteratomen abgegeben werden und sich nahezu frei zwischen diesen bewegen können. Ihre Zahl ist gewaltig groß, im Durchschnitt steuert jedes Atom ein Leitungselektron bei.

In Halbleitern sind die Atome nicht so „freigebig“. In einem Germanium- oder Siliziumkristall zum Beispiel haben sich bei Zimmertemperatur nur verhältnismäßig wenige Elektronen von ihren Atomen gelöst. Ihre Zahl wächst jedoch rasch, wenn der Kristall erwärmt wird; Germanium, Silizium und andere Halbleiter leiten mit steigender Temperatur besser.

An dieser *Eigenleitung* (Bild 5) sind jedoch nicht nur Elektronen beteiligt. Wo ein Elektron seinen Platz aufgibt, hinterläßt es ein *Loch*, eine Stelle, an der negative elektrische Ladung fehlt und die sich deshalb wie eine positive elektrische Ladung verhält. Das Loch kann von einem Elektron gefüllt werden, das an anderer Stelle frei wurde, dafür aber seinerseits ein Loch hinterläßt. Es scheint, als sei das Loch in entgegengesetzter Richtung wie das Elektron gewandert. Dieser Vorgang wiederholt sich in jeder Sekunde vieltausendfach an verschiedenen Stellen des Halbleiters.

Liegt elektrische Spannung an gegenüberliegenden Seiten des Halbleiterkristalls, wandern Elektronen zum positiven, Löcher zum negativen Pol. An der Eigenleitung sind also Elektronen und Löcher beteiligt.

Bereits das ist ein wichtiger Unterschied zu den Leitungsvorgängen in Metallen. Doch Halbleiter halten als weitere Überraschung die *Störstellenleitung* für uns bereit: Wenn in Halbleitermaterial höchster Reinheit Atome fremder Elemente in genau bestimmter Menge als „Störstellen“ eingebracht werden, lassen sich die Leitfähigkeitseigenschaften in weiten Grenzen beeinflussen. Setzen wir vierwertigem Germanium zum Beispiel fünfwertiges Arsen zu, bleibt von jedem Arsenatom ein Elektron für die Stromleitung frei. Man nennt einen solchen Halbleiter, dessen Leitfähigkeit vor allem durch *negative* Elektronen hervorgerufen wird, *n-leitend*. Werden dagegen dreiwertige Atome, zum Beispiel Indium oder Aluminium, zugesetzt, entsteht an jeder Störstelle ein Loch. Es kann zwar von Elektronen anderer Atome gefüllt werden, doch bilden sich dabei erneut Löcher. Die Leitfähigkeit wird hier vor allem durch *positive* Löcher bewirkt, man nennt das Material *p-leitend*.

Durch komplizierte technologische Verfahren läßt sich erreichen, daß Stücke eines Halbleiterkristalls, zum Beispiel quadratische Plättchen, in einem Teil p-, im anderen n-leitend sind und eine Grenzfläche p- und n-Gebiet voneinander trennt. Vorgänge, die sich im Bereich solcher Grenzen, an *pn-Übergängen* (Bild 6), abspielen, sind für die Halbleitertechnik besonders wichtig und bilden unter anderem die Grundlage der Halbleiter-Diode und des Transistors.

Die *Halbleiter-Diode* hat nach Bedeutung, Anwendungsmöglichkeiten und Produktionsziffern die Elektronenröhren-Diode längst überrundet und ist so verbreitet, daß man, wenn von Dioden gesprochen wird, fast immer zu-

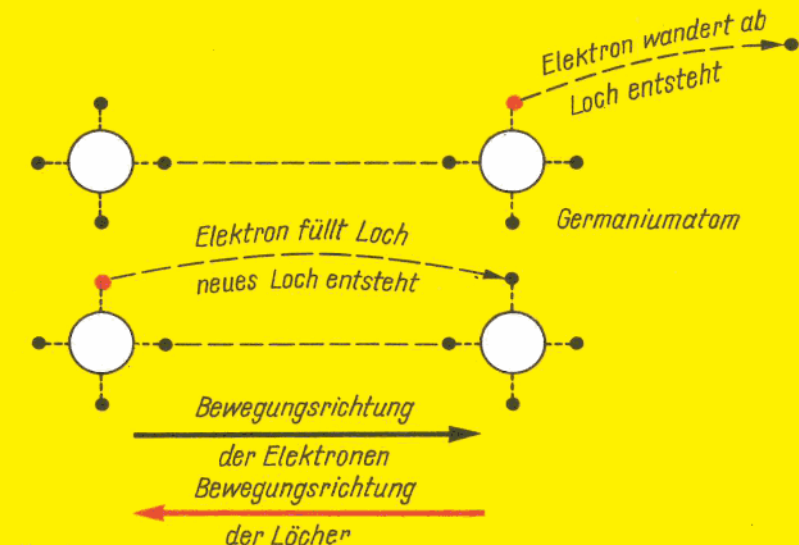


Bild 5

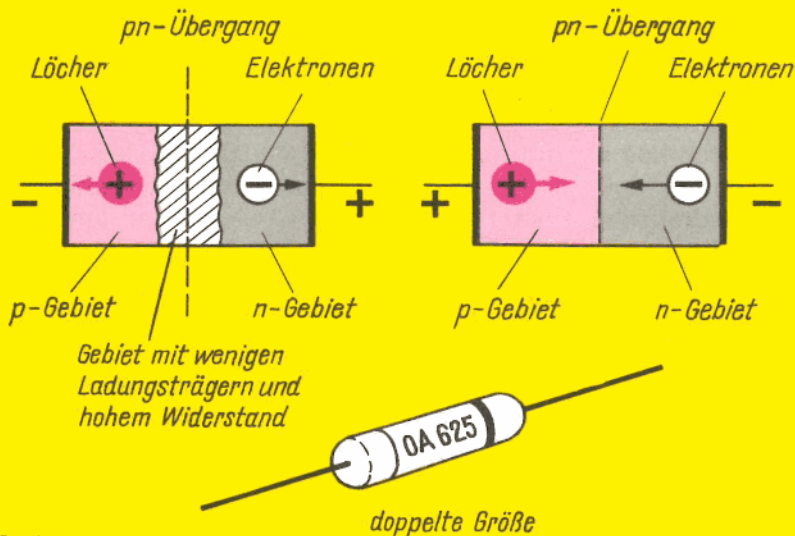


Bild 6

erst an Halbleiter-Dioden denkt. Ihre wichtigste Eigenschaft ist, wie bei der Elektronenröhren-Diode, daß sie Strom in einer Richtung gut, in der Gegenrichtung hingegen kaum hindurchläßt.

Die Ventilwirkung kommt hier, sehr vereinfacht dargestellt, folgendermaßen zustande: Die Elektronen und Löcher sind, ebenso wie die Atome des Halbleiters, niemals in Ruhe. Sie führen vielmehr ständig unregelmäßige Bewegungen aus. Dabei gelangen Elektronen in das p-Gebiet, Löcher in das n-Gebiet. Am pn-Übergang selbst vermindert sich die Zahl der beweglichen Ladungsträger, das heißt der Elektronen und Löcher.

Wird eine elektrische Spannung so an den Kristall gelegt, daß der positive Pol der Spannungsquelle mit dem n-Gebiet, der negative mit dem p-Gebiet verbunden wird, verbreitert sich dieses „Verarmungsgebiet“. Sein Widerstand nimmt so zu, daß allenfalls ein sehr schwacher „Sperrstrom“ hindurchfließen kann. Liegt der positive Anschluß der Spannungsquelle am p-, der negative am n-Gebiet, werden Elektronen und Löcher in das Grenzgebiet „gedrückt“. Sein elektrischer Widerstand sinkt auf einen sehr niedrigen Wert, so daß der elektrische Strom nahezu ungehindert durchfließen kann.

Sehr hoher Widerstand in der *Sperrichtung*, sehr geringer in der *Durchlaßrichtung* – das ist eine Ventilwirkung ganz ähnlich derjenigen von Elektronenröhren-Dioden. In der Tat: Alles, was die Elektronenröhren-Diode kann, leistet auch die Halbleiter-Diode. Sie kann es aus Gründen, von denen wir bald lesen werden, meistens sogar viel besser.

Das der Triode entsprechende Halbleiterbauelement ist der *Transistor* (Bild 7). Die meisten Transistoren sind gegenwärtig „Flächentransistoren“ aus einer Folge von drei Schichten verschiedener Leitfähigkeitsart, die durch zwei pn-Übergänge getrennt sind. Die Schichtenfolge ist p-n-p oder n-p-n, das Material fast immer Germanium oder

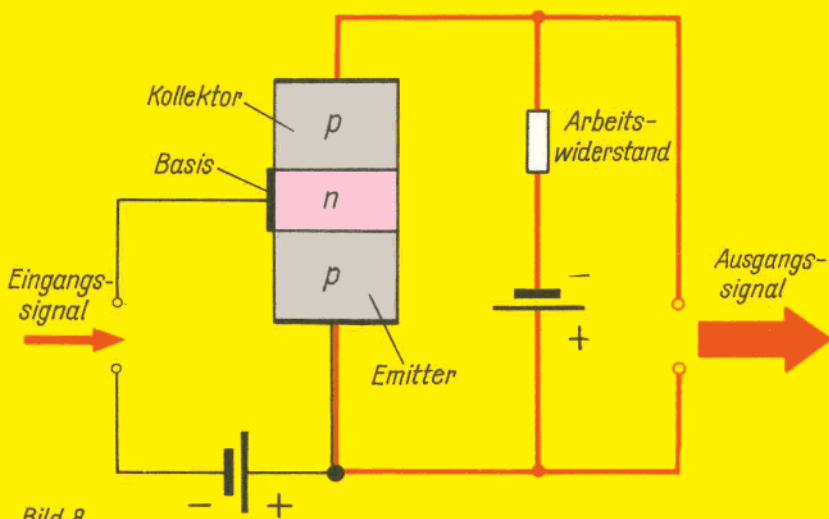
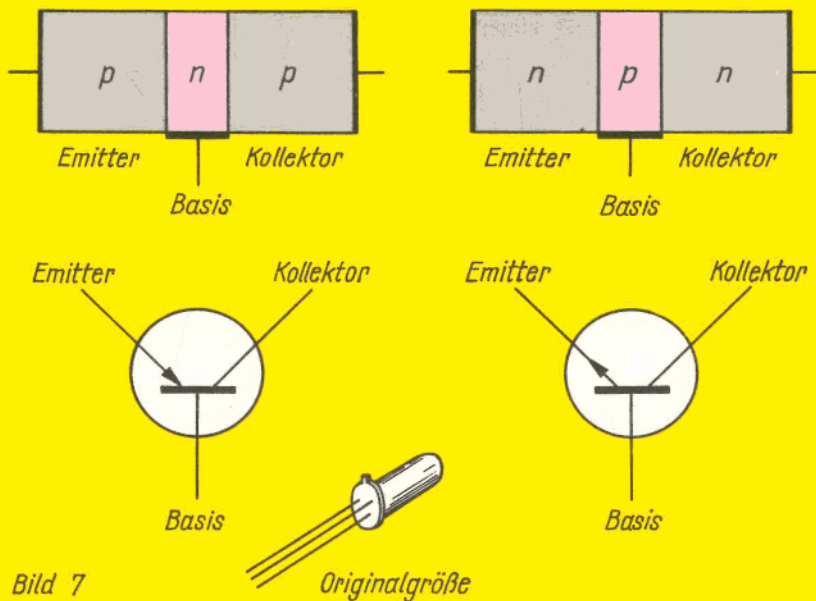
Silizium. Zwischen beiden pn-Übergängen liegt, häufig nur Bruchteile eines Mikrometers dick, die *Basis* des Transistors. Die äußeren Gebiete heißen *Emitter* (weil von hier aus Ladungsträger in die Basis geschickt, „emittiert“ werden) und *Kollektor* (weil dieses Gebiet Ladungsträger „aufammelt“).

Betrachten wir Bild 8, wobei wir zunächst annehmen wollen, daß kein Eingangssignal vorhanden ist und die beiden zugehörigen Anschlüsse direkt miteinander verbunden sind. Die Batterien, jede mit einer Spannung von wenigen Volt, werden so angeschlossen, daß der „untere“ pn-Übergang (Emitter – Basis) in Durchlaßrichtung, der „obere“ (Kollektor – Basis) in Sperrichtung liegt. Über den oberen pn-Übergang fließt zunächst nur ein schwacher Sperrstrom, über den unteren ein stärkerer Durchlaßstrom, hervorgerufen durch Löcher, die von der Batteriespannung in den Emitter und weiter in die Basis „geschoben“ werden.

Da die Basis sehr dünn ist, gelangen die meisten eingedrungenen Löcher nicht zum Basisanschluß, sondern „treiben“ bis zum oberen pn-Übergang und in den Kollektor. Im Kollektorkreis tritt ein Strom auf, der vor allem durch zugewanderte Löcher vom Emitter her bestimmt wird. Über die Basis hingegen fließt nur ein schwacher Strom.

Bereits eine kleine Spannungsschwankung im Stromkreis Emitter – Basis, hervorgerufen etwa durch ein Signal, das wir jetzt an die Eingangsanschlüsse legen, ruft wegen des geringen Widerstandes im Emitterkreis erhebliche Stromänderungen hervor. Sie teilen sich dem Kollektorkreis mit, das heißt, der Strom im Kollektorkreis läßt sich durch Signale im Kreis Emitter – Basis steuern. Da aber der Widerstand des Kollektorkreises groß ist, kommt es zu erheblichen Spannungsschwankungen, der Transistor verstärkt. Ein Vergleich mit Bild 4 zeigt, daß der Emitter der

20



Katode, die Basis dem Steuergitter und der Kollektor der Anode einer Triode entspricht.

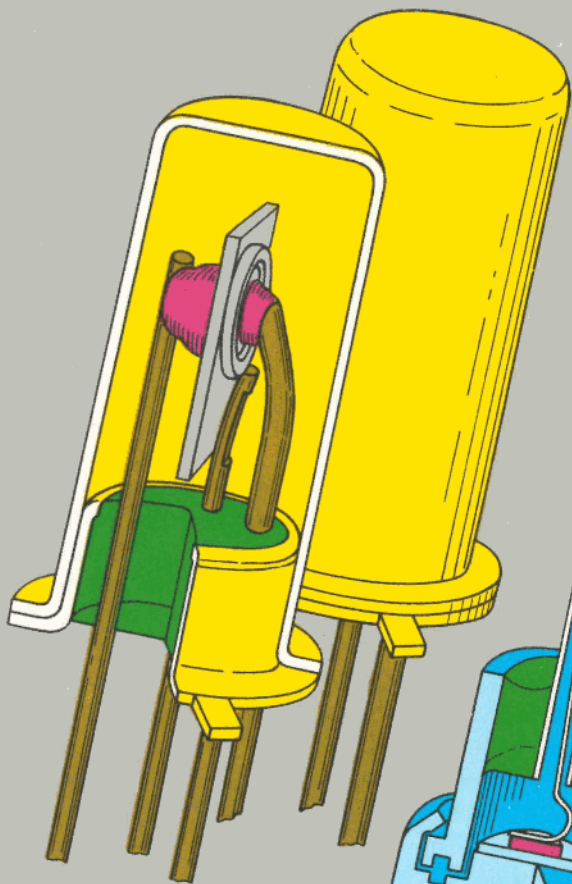
Der npn-Transistor funktioniert entsprechend. Wir brauchen nur die Anschlüsse der Batterien zu vertauschen und bei der Erklärung Elektronen an die Stelle von Löchern zu setzen.

Heute, knapp 25 Jahre nach der Erfindung des Transistors, ist ein breites Angebot an Halbleiterbauelementen verfügbar; der Fachmann kann die für eine bestimmte Aufgabe geeignetsten Typen wählen.

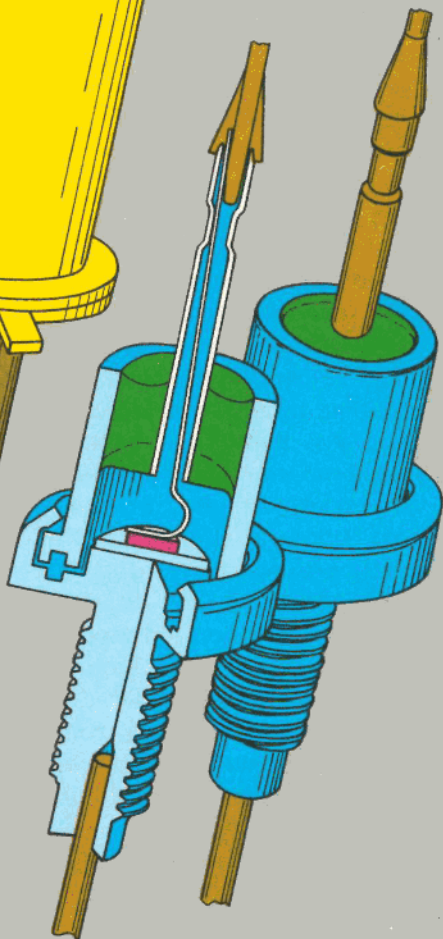
Von den verschiedenen, im Laufe der Zeit entstandenen Transistorarten erlangte vor allem der *Planartransistor* (Bild 9a) Bedeutung. Sein Name rührt daher, daß das Transistorsystem in einer Reihe aufeinanderfolgender Schritte gewissermaßen in der Ebene, in einem sehr dünnen Siliziumplättchen, erzeugt wird (meistens werden gleichzeitig Hunderte Transistorsysteme hergestellt). Während der einzelnen Arbeitsgänge überzieht sich das Plättchen immer wieder mit einer sehr widerstandsfähigen Schicht aus Siliziumdioxid. Die pn-Übergänge, die gegenüber Dämpfen, Feuchtigkeit usw. sehr empfindlich sind, bleiben von Anfang an geschützt. Auf ähnliche Weise werden auch Planardioden produziert, die ebenso wie Planartransistoren in vielen Millionen elektronischer Geräte eingebaut sind.

Der Planartransistor löste weitgehend den Legierungstransistor (Bild 9b) ab, dessen Schichtenfolge man erreichte, indem man zum Beispiel auf ein Germaniumplättchen Indiumkügelchen legte, die sich bei Wärmeeinwirkung mit dem Germanium legierten.

In jüngster Zeit werden zunehmend Transistoren eingesetzt, die nicht auf Vorgängen an pn-Übergängen beruhen. Es sind die *Feldeffekt-Transistoren*. Wir können sie uns als Widerstände aus Halbleitermaterial vorstellen, deren Widerstandswert elektrisch gesteuert wird.



Germanium - NF - Transistor



*Silizium -
Gleichrichterdiode*

Warum werden immer mehr Geräte mit Halbleiterbauelementen statt mit Elektronenröhren ausgerüstet?

Ein Grund ist jedermann bekannt: Halbleiter-Dioden und Transistoren sind viel kleiner als Elektronenröhren. Transistorsysteme erreichen oft nicht einmal die Größe eines Stecknadelkopfes; im Glaskolben einer Elektronenröhren-Diode könnte man Tausende Systeme von Halbleiter-Dioden „verpacken“. Entsprechend gering ist auch die Masse von Halbleiterbauelementen.

Damit Elektronenröhren arbeiten können, müssen sie „geheizt“ werden, und zwar wegen ihrer Anheizzeit sogar dann, wenn Geräte nur auf Anrieb betriebsbereit sein müssen – das aber gilt für zahlreiche Kontroll-, Steuer- und Überwachungseinrichtungen. Halbleiterbauelemente hingegen benötigen keine Heizung. An die Stelle der hohen Anodenspannung von Elektronenröhren (oft Hunderte Volt) tritt beim Transistor eine Betriebsspannung von nur wenigen oder einigen zehn Volt. Der Energiebedarf von Halbleiterbauelementen ist daher geringer als der vergleichbarer Elektronenröhren, und auch die bei Röhren oft störende Wärmeentwicklung entfällt zum größten Teil. Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Halbleiterbauelemente sind sehr viel größer als diejenigen von Elektronenröhren; es gibt keinen empfindlichen Glaskolben; ein luftleerer Raum braucht weder hergestellt noch aufrechterhalten zu werden.

Das alles sind Gründe, die Halbleiterbauelemente unentbehrlich machen. Moderne elektronische Datenverarbeitungsanlagen ließen sich mit Elektronenröhren nicht aufbauen, es gäbe weder die zahllosen Kleingeräte – vom Taschenempfänger bis zum Handfunksprechgerät – noch die in rascher Entwicklung befindliche Mikroelektronik, die nicht nur Halbleiterbauelemente verwendet, sondern selbst weitgehend auf Verfahren zurückgreift, die sich bei der Produktion von Halbleiterbauelementen bewährten.

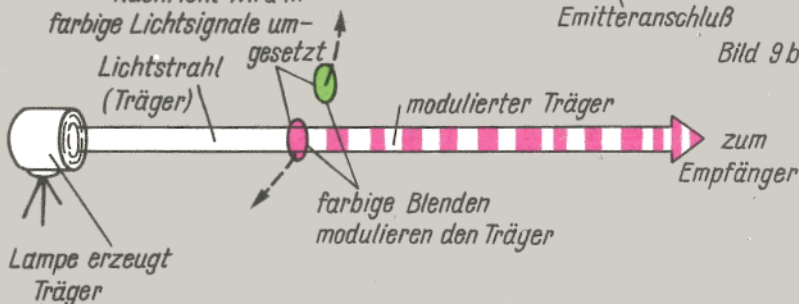
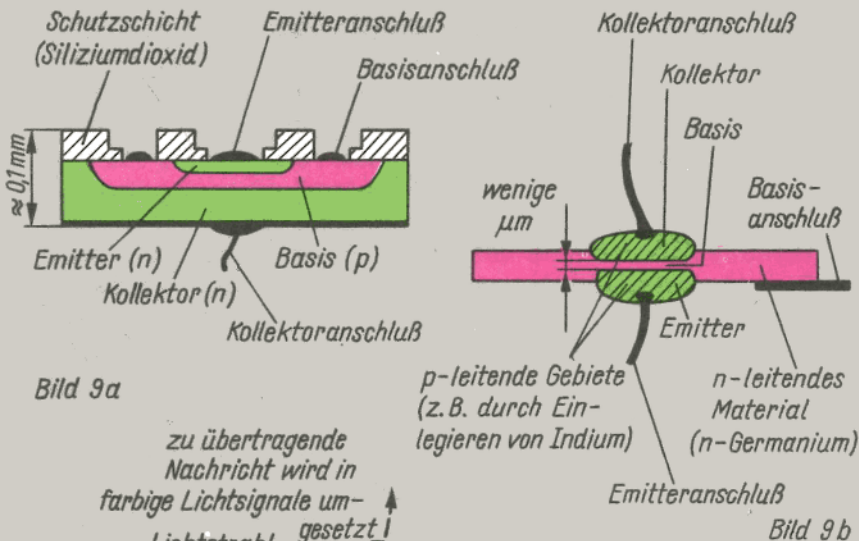


Bild 10

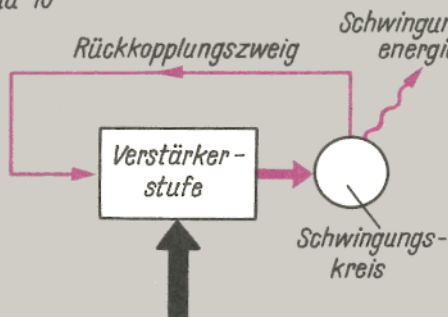


Bild 11

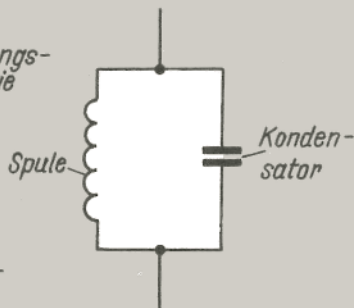


Bild 12

Von Wellen, Sendern und Empfängern

Funkverkehr, Rundfunk, sogar Fernsehversuche gab es, ehe der Begriff Elektronik geprägt war. Heute ist die drahtlose Nachrichtenübermittlung, jenes Teilgebiet der Elektronik, das sich mit der Nachrichtenübertragung durch Funkwellen, befaßt, wichtiger denn je.

Gleich, ob ein Rundfunk- oder Fernsehprogramm, ob Fernschreiben, Telefongespräche, Impulse von Radar-, Navigations- oder Datenverarbeitungsanlagen übertragen werden sollen, gleich auch, ob wenige hundert Meter auf einer Großbaustelle oder viele Millionen Kilometer bis zu einer Raumsonde zu überbrücken sind: Die wichtigsten Schritte einer Nachrichtenübertragung sind stets gleich. Um sie kennenzulernen, brauchen wir nicht einmal die Elektronik oder die Funktechnik zu bemühen.

Denken wir an zwei Freunde, „A“ und „B“, deren einer, A, B durch Lichtzeichen eine Mitteilung zukommen lassen will. Dazu braucht A einen *Sender*, etwa eine Taschenlampe. Sie erzeugt einen Lichtstrahl, den *Träger* der Nachricht. B nimmt ihn mit Hilfe eines *Empfängers*, mit dem Auge, wahr.

Bevor die Nachricht übermittelt werden kann, muß sie in *Signale* umgewandelt werden, die den Träger entsprechend verändern, ihn *modulieren*. Man kann den Lichtstrahl im Rhythmus von Morsezeichen ein- und ausschalten, aber auch verschiedenfarbige Lampen wie bei einer Verkehrsampel verwenden (Bild 10). Natürlich ist eine Verständigung nur möglich, wenn A und B einen „Code“ ausgemacht haben.

Träger von Funksignalen sind Radiowellen, enge Verwandte des Lichts; denn Radiowellen, Licht, aber auch Röntgen- und Wärmestrahlen zählen zur großen Familie der *elektromagnetischen Wellen*, deren nähere Bekanntschaft wir im Physikunterricht machen werden.

Radiowellen entstehen, wenn wir zum Beispiel einem isoliert aufgehängten Draht einen Wechselstrom hoher Frequenz (etwa $> 20 \text{ kHz}$) zuführen. Im Raum um diese *Antenne* treten im Rhythmus dieses Wechselstroms elektrische und magnetische Veränderungen auf. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit (3000 km/s) aus.

Diese sich wiederholenden und sich fortbewegenden Änderungen nennen wir Radiowellen. In ihrer Ausbreitungsrichtung sind gleiche Änderungszustände immer durch einen gleichbleibenden Abstand getrennt, ebenso wie bei gleichmäßig erregten Wasserwellen Wellenberge bzw. -täler die gleiche Entfernung voneinander haben. Dieser Abstand heißt *Wellenlänge*. Sie hängt mit der Frequenz zusammen; je höher diese ist, desto eher wiederholt sich an der Antenne der gleiche Änderungszustand, desto weniger weit ist eine Änderung ihrer nachfolgenden Zwillingsschwester „davongelaufen“. Man kann diesen Zusammenhang durch eine einfache Formel ausdrücken:

$$\text{Frequenz in kHz} = \frac{300\,000}{\text{Wellenlänge in m}}$$

Wellen zwischen weniger als 1 mm Länge (300 GHz) und mehr als $30\,000 \text{ m}$ (10 kHz) werden für drahtlose Nachrichtenübertragungen ausgenutzt. Man hat diesen sehr breiten Bereich mehrfach unterteilt:

Wellenlänge	Name	Frequenz
$> 3000 \text{ m}$	Längstwellen	$< 100 \text{ kHz}$
$3000 \dots 1000 \text{ m}$	Langwellen	$100 \dots 300 \text{ kHz}$
$1000 \dots 200 \text{ m}$	Mittelwellen	$300 \dots 1500 \text{ kHz}$
$200 \dots 100 \text{ m}$	Grenzwellen	$1,5 \dots 3 \text{ MHz}$
$100 \dots 10 \text{ m}$	Kurzwellen	$3 \dots 30 \text{ MHz}$
$10 \dots 1 \text{ m}$	Ultrakurzwellen	$30 \dots 300 \text{ MHz}$
$1 \text{ m} \dots 10 \text{ cm}$	Dezimeterwellen	$300 \dots 3000 \text{ MHz}$
$10 \text{ cm} \dots 1 \text{ cm}$	Zentimeterwellen	$3 \dots 30 \text{ GHz}$
$< 1 \text{ cm}$	Millimeterwellen	$> 30 \text{ GHz}$

Während Längst-, Lang-, Mittel- und Kurzwellen dadurch große Entfernungen überbrücken können, daß sie der Erdoberfläche folgen oder „nach oben“ gehen und von den höchsten Atmosphärenschichten, der Ionosphäre, wieder zur Erde zurückgelenkt werden, sind ultrakurze und alle noch kürzeren Wellen dem Licht um so ähnlicher, je höher ihre Frequenz ist: Ultrakurze Wellen und Wellen mit noch höherer Frequenz breiten sich geradlinig aus, Funkverbindungen sind daher nur „auf Sichtweite“ möglich. Lediglich Ultrakurzwellen von wenigen Metern Wellenlänge nehmen es nicht so genau. Sie reichen ein Stück bis hinter den Horizont; Rundfunkhörer und Fernsehteilnehmer, die nicht in Sendernähe wohnen, ziehen Nutzen daraus. Zudem werden Zentimeter- und Millimeterwellen durch Nebel, Regen und Schnee erheblich geschwächt. Jeder Sender muß hochfrequente Ströme und Spannungen bestimmter Frequenz und Leistung, hochfrequente Schwingungen, erzeugen, die von der Antenne als elektromagnetische Wellen abgestrahlt werden. Dazu bedient man sich fast immer der *Rückkopplung*. In der Elektronik versteht man darunter, daß in einem Verstärker ein Teil des Ausgangssignals nochmals dem Verstärkereingang zugeführt wird. Geschieht dies in geeigneter Weise, so können Schwingungen entstehen.

Manchmal wird uns das auf recht unangenehme Weise vorgeführt: Ist eine Übertragungsanlage mit Mikrofon, Verstärker und Lautsprecher ungeschickt aufgebaut, fängt sie an zu heulen oder zu pfeifen. „Akustische Rückkopplung“, würde uns ein Fachmann erklären. Die vom Mikrofon in elektrische Signale umgewandelten Schallwellen werden von den Lautsprechern als verstärkte Schallwellen wiedergegeben. Gelangt ein Teil davon nochmals zum Mikrofon, wird er erneut verstärkt und ausgestrahlt, trifft das Mikrofon zum drittenmal, wird wiederum verstärkt usf. Die Anlage kommt ins „Schwingen“.

Der elektronische *Generator* oder *Oszillator* (Bild 11), nicht nur in Sendern, sondern in zahlreichen anderen elektronischen Geräten als Schwingungserzeuger unentbehrlich, arbeitet ganz ähnlich, wenn auch ohne „Zwischenstufe Schallwellen“. Während es aber bei akustischer Rückkopplung von zufälligen Bedingungen abhängt, welche Frequenzen im Heulen auftreten, soll der elektronische Generator Wechselspannungen oder -ströme einer bestimmten und stabilen Frequenz erzeugen. Daher ist eine Vorrichtung nötig, mit deren Hilfe diese Frequenz eingestellt und eingehalten wird. In Sendern ist das meistens ein *Schwingungskreis*, der durch Zusammenschaltung einer Spule und eines Kondensators gebildet wird.

Schwingungskreise sind für die Elektronik, besonders aber für die drahtlose Nachrichtenübermittlung, äußerst wichtig. Das verdanken sie ihrer „Frequenzabhängigkeit“: Ein Schwingungskreis (Bild 12), dessen Spule und Kondensator so wie im Bild geschaltet sind, setzt Wechselstrom einer bestimmten Frequenz – sie heißt *Eigenfrequenz* des Schwingungskreises und hängt von den elektrischen Daten seiner Bauelemente ab – einen sehr großen Widerstand entgegen, Strömen anderer Frequenzen einen sehr geringen. Führen wir einem Schwingungskreis Wechselstrom zu, dessen Frequenz mit der Eigenfrequenz übereinstimmt, entsteht an ihm eine verhältnismäßig hohe Wechselspannung, bei Strömen anderer Frequenzen eine nur sehr geringe. Man kann einen Schwingungskreis benutzen, um aus einem Gemisch verschiedener Frequenzen *eine* auszusortieren; genau das geschieht im Generator.

Der Schwingungskreis liegt am Ausgang einer Verstärkerstufe und ist über einen Rückkopplungsweig (seine Ausführung übergehen wir) mit ihrem Eingang verbunden. Von allen Strömen am Verstärkerausgang ruft nur derjenige eine nennenswerte Spannung am Schwingungskreis hervor, dessen Frequenz mit der Eigenfrequenz über-

einstimmt. Ein Teil dieser Spannung gelangt über den Rückkopplungsweig zum Verstärkereingang, wird verstärkt, verursacht eine höhere Spannung am Schwingungskreis usf. Der Generator „schwingt“ mit der Eigenfrequenz des Schwingungskreises. Sie kann, je nach Konstruktion des Schwingungskreises, zwischen wenigen Hertz und Hunderten Megahertz liegen. Dem Generator läßt sich Schwingungsenergie dieser Frequenzen entnehmen.

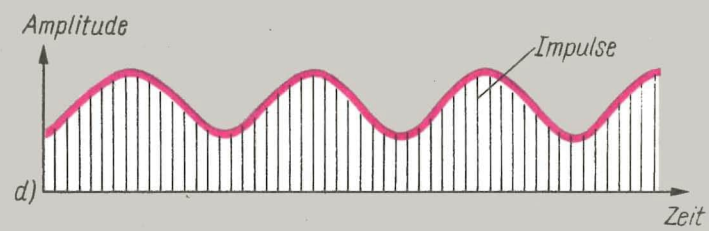
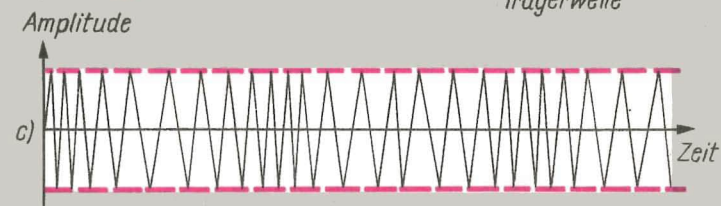
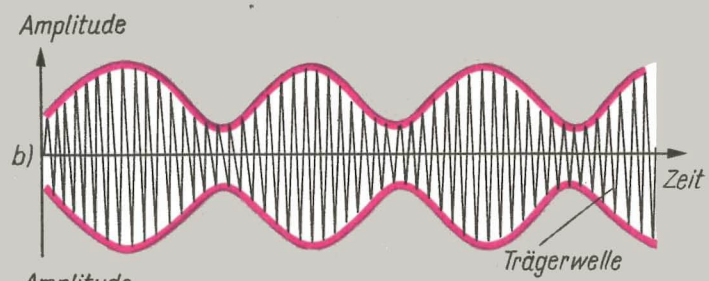
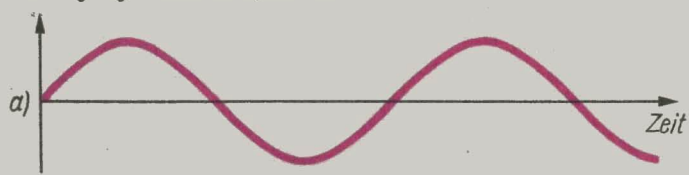
Wählt man eine Frequenz im Hochfrequenzbereich und verbindet man den Schwingungskreis mit einer Antenne, so wird der Generator zum Sender. Freilich enthalten die meisten Sender noch weitere Baustufen. Die beiden wichtigen Aufgaben „stabile Frequenz“ und (oft) „große Leistung“ zwingen nämlich zu einer Arbeitsteilung:

Der Generator, dann *Steuersender* genannt, übernimmt es, die gewünschte Frequenz zu erzeugen und genauestens einzuhalten. Seine Leistung ist nebensächlich; denn sie wird im *Senderverstärker* verstärkt, oft hunderttausendfach und mehr, und dann der Antenne zugeführt. Zur Signalübertragung muß, genau wie der Lichtstrahl beim „Lichttelegrafen“, die ausgestrahlte Radiowelle, die *Trägerwelle* (ihre Frequenz heißt *Trägerfrequenz*), mit dem zu übertragenden Signal (Bild 13a) moduliert werden. Das kann auf verschiedene Weise erfolgen: Beim Mittelwellenrundfunk und zur Bildübertragung beim Fernsehen zum Beispiel verändert man die Schwingungsweite der Trägerwelle, ihre „Amplitude“, im Takt der zu übertragenden Signale und spricht daher von *Amplitudenmodulation* (AM) (Bild 13b).

Für den Ultrakurzwellenrundfunk, die Tonübertragung beim Fernsehen wird *Frequenzmodulation* (FM) (Bild 13c) angewendet: Im Takt der zu übertragenden Signale schwankt die Sendefrequenz um einen mittleren Wert.

Eine besonders aussichtsreiche Modulationsart ist die *Pulsmodulation*. Der Sender strahlt nur kurze Impulse mit

Schwingungsweite (Amplitude)



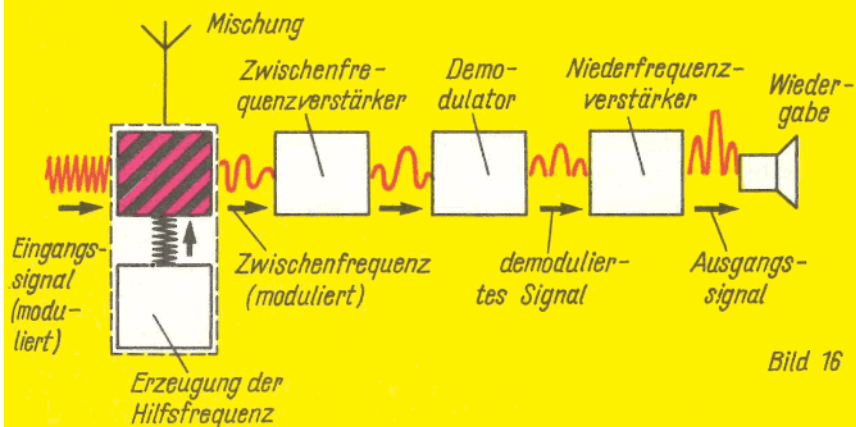
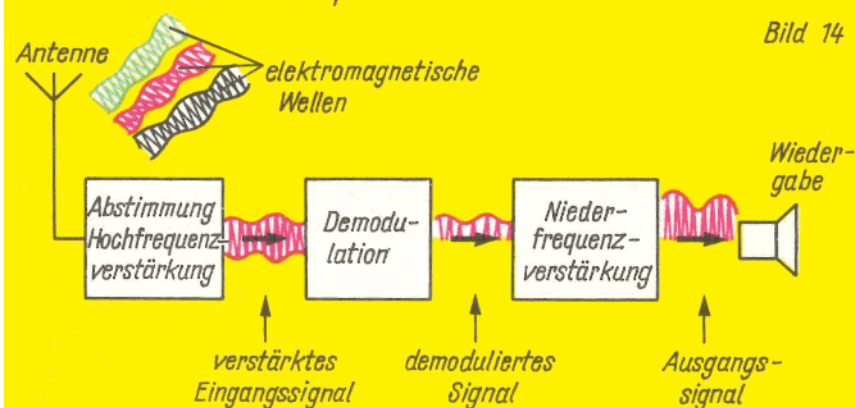
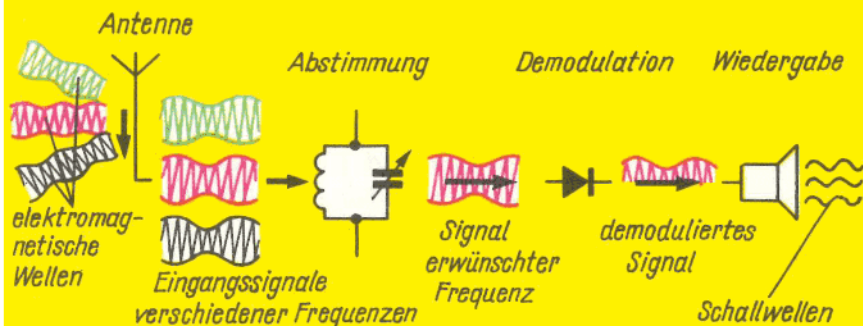
vielfach längeren Pausen dazwischen aus. Die Impulse werden den Signalen entsprechend verändert, zum Beispiel in ihrer Amplitude (Bild 13d), ihrer Länge oder ihrem gegenseitigen Abstand.

Die sogenannte *Pulscodemodulation*, (PCM) (Bild 13e), eine Abart der Pulsmodulation, geht noch einen Schritt weiter: Wie man Buchstaben zur telegrafischen Übermittlung nach einem Code, etwa dem Morse- oder dem für das Fernschreiben vereinbarten Telegrafenalphabet, verschlüsselt, werden bei (PCM) Sprache und Musik zu Impulsgruppen verschlüsselt und übertragen. Vom Empfänger werden aus diesen Impulsgruppen die ursprünglichen Signale „rekonstruiert“.

Selbstverständlich laufen bei Pulsmodulation alle Schritte automatisch ab. Kein Fernsprechteilnehmer merkt, daß die Stimme seines Partners in einer Sekunde mehrtausendfach „zerhackt“ und wieder zusammengefügt wird.

Damit sind wir bei den Vorzügen der technisch allerdings nicht einfachen Pulsmodulation: Man kann bei der Übertragung Störungen weitgehend unterdrücken, ja sogar verstümmelte Signale wieder „ausbessern“. In die Lücken zwischen den zu einem Signal gehörenden Impulsen lassen sich weitere Impulse einordnen und so über eine Nachrichtenverbindung gleichzeitig zahlreiche voneinander unabhängige Ferngespräche, Fernschreiben, Meßwerte usw. übermitteln.

Wenn es heißt, ein Sender benutze diese oder jene Frequenz, so stimmt das nur, solange er die unmodulierte Trägerwelle ausstrahlt. Sobald er Signale überträgt, beansprucht er ein bestimmtes Frequenzband, einen Kanal, dessen Breite von der Art der Modulation und der Signale abhängt. Rundfunksender im Mittelwellenbereich sind mit ihren 9 kHz breiten Kanälen noch relativ bescheiden. Ultrakurzwellen-Rundfunksendern sind 300 kHz breite, Fernsehsendern 7 oder 8 MHz breite Kanäle zugeteilt.



Der *Empfänger* soll aus den übertragenen Signalen die ursprüngliche Nachricht zurückgewinnen. Dazu sind mehrere Schritte nötig. Zunächst müssen aus Radiowellen wieder hochfrequente Spannungen und Ströme werden. Diese Umwandlung erfolgt in der Empfangsantenne. Radiowellen rufen in ihr Wechselfspannungen und -ströme hervor, die ein „Bild“ der Ströme und Spannungen in der Sendantenne sind und das Eingangssignal des Empfängers darstellen.

Elektromagnetische Wellen aller möglichen Frequenzen erreichen die Antenne. Im Empfänger (Bild 14) ist daher zunächst der gewünschte Sender „auszusortieren“, der Empfänger muß „abgestimmt“ werden. Das Hilfsmittel hierfür ist wieder der Schwingungskreis oder Abstimmkreis. Er wird, meistens mit Hilfe eines Drehkondensators, verstellt, bis seine Eigenfrequenz mit der Frequenz des gewünschten Senders übereinstimmt. Allerdings reicht *ein* Schwingungskreis selten aus, um einen Sender von anderen (auf benachbarten Kanälen) zu trennen – wir brauchen dazu mehrere (daher rühren die Bezeichnungen „Sechskreiser“ usf. für Rundfunkempfänger).

Die Hochfrequenzspannung am Schwingungskreis ist moduliert, in ihr verbergen sich die übertragenen Signale. Ihre Rückgewinnung heißt *Demodulation*. Sie erfolgt, indem mit einer oder mehreren Dioden durch Gleichrichtung eine im Signalarhythmus schwankende Spannung erzeugt wird. Sie wird durch ein Wiedergabeinstrument, zum Beispiel einen Lautsprecher, in die ursprüngliche Nachricht zurückverwandelt.

Abstimmung und Demodulation sind das mindeste, was ein Empfänger leisten muß. Doch das genügte nur in den Anfangsjahren der drahtlosen Nachrichtenübermittlung. Bei größerer Entfernung oder geringer Sendeleistung blieben die empfangenen Signale zu schwach (die Spannung, die eine Antenne an den Empfänger abgibt, zählt oft nur

nach Millionsteln eines Volt); gerade das war ein wichtiger Anlaß für die Entwicklung der Verstärkerröhre.

Heute gibt es kaum einen Empfänger ohne vieltausendfache Verstärkung der Signale. Je nachdem, ob vor oder nach der Demodulation verstärkt wird, unterscheidet man Hochfrequenzverstärkung (weil Hochfrequenzspannungen verarbeitet werden) und Niederfrequenzverstärkung (weil die Frequenzen der nach der Demodulation vorhandenen Signale weit niedriger als die der Hochfrequenzspannungen sind). Meistens werden beide Verstärkungsarten gleichzeitig angewendet.

Geradeausempfänger (Bild 15) nennt man Geräte, die nach dem einfachen Schema Abstimmung – Hochfrequenzverstärkung – Demodulation – Niederfrequenzverstärkung zusammengesetzt sind und in den Anfangsjahren der Funktechnik weit verbreitet waren. Heute werden sie nur noch von Amateuren gebaut, die in die „Geheimnisse“ der Funktechnik einzudringen beginnen. Sonst aber beherrscht der *Superhet* (kurz *Super* genannt) das Feld. Bereits sein Blockschema (Bild 16) weicht von dem des Geradeausempfängers ab: *Misch- und Oszillatorstufe* und *Zwischenfrequenzverstärker* sind hinzugekommen.

Die Misch- und Oszillatorstufe wandelt die Hochfrequenzspannung, die der eingestellte Sender hervorruft, in eine Hochfrequenzspannung meist niedrigerer Frequenz, die sogenannte Zwischenfrequenz, um. Sie bleibt stets unverändert, unabhängig davon, ob die Frequenz des eingestellten Senders im Lang-, Mittel- oder Kurzwellenbereich liegt. Das wird dadurch erreicht, daß man die Empfangsfrequenz mit einer im Empfänger von einem Oszillator erzeugten Hilfsfrequenz mischt. Im Zwischenfrequenzverstärker wird die Zwischenfrequenz hoch verstärkt und dann wie in einem Geradeausempfänger demoduliert. Warum das alles? Gewichtige Gründe sprechen für den Super und waren Ursache, daß er sich durchsetzte: Ein

Empfänger „trennt“ Sender auf benachbarten Kanälen um so besser, je mehr Schwingungskreise er aufweist. Sechs würden bei nicht allzu hohen Ansprüchen genügen, doch diese sechs müßten bei jedem Senderwechsel neu eingestellt und beim Übergang von einem Wellenbereich auf einen anderen umgeschaltet werden. Abgesehen von erheblichen technischen Schwierigkeiten, wäre die Bedienung der Empfänger längst nicht so einfach, wie es uns selbstverständlich ist.

Wird der „Sechskreiser“ dagegen als Superhet ausgeführt, müssen nur zwei Abstimmkreise (in der Misch- und Oszillatorstufe) bedient werden. Die restlichen vier gehören zum Zwischenfrequenzverstärker, werden einmal auf die Zwischenfrequenz eingestellt und bleiben dann unverändert.

Je niedriger die Frequenz einer Hochfrequenzspannung, desto höher ist (vereinfacht ausgedrückt) die mit einer Röhre oder einem Transistor zu erzielende Verstärkung. Mit den zwei oder drei Transistoren (bzw. den Röhren) des Zwischenfrequenzverstärkers ist daher eine größere Verstärkung zu erzielen als durch unmittelbare Verstärkung der Empfangsfrequenz. Außerdem verstärkt der Zwischenfrequenzverstärker bei allen Empfangsfrequenzen gleich.

Schließlich wird durch die Frequenzumwandlung im Super die Gefahr vermindert, daß es zu ungewollten Rückkopplungen kommt. Sie waren in Geradeausempfängern mitunter kaum zu vermeiden, machten nicht nur den eigenen Empfang unmöglich, sondern störten auch Empfänger in der Nachbarschaft.

Sender nach dem Rückkopplungsprinzip, Empfänger nach dem Superhetprinzip: Es gibt kaum eine Funkverbindung, bei der diese beiden Geräte nicht benutzt werden, unabhängig davon, welchem Zweck sie dient und in welchem Wellenbereich sie arbeitet.

Tausende Kanäle – hunderterlei Funkdienste

Der Rundfunk ist der bekannteste und verbreitetste Funkdienst; die Rundfunkempfänger der Welt, am Äquator aneinandergereiht, ergäben eine die Erde mehrmals umspannende Kette. Rundfunksender werden im Lang- und Mittelwellenbereich für große und mittlere Entfernungen (etwa zur Versorgung eines Landes), im Kurzwellenbereich für große und größte Entfernungen („Überseerundfunk“) und im Ultrakurzwellenbereich für Übertragungen auf geringe Entfernung, aber mit höchster Qualität, betrieben.

Die Bedienung der Rundfunkempfänger soll so einfach wie möglich, ihre Zuverlässigkeit groß, ihre Wiedergabequalität vorzüglich – und ihr Preis erschwinglich sein. In fünf Jahrzehnten – so alt ist der Rundfunk – erfüllten die Elektronikfachleute nahezu alle Wünsche der Rundfunkhörer. Mußte früher ein halbes, manchmal ein ganzes Dutzend Knöpfe und Einstellhebel betätigt werden, ehe ein Sender „drin“ war, genügt heute *ein* Knopf, und die Leucht balken der Abstimmmanzeigeröhre, einer speziellen Elektronenröhre – auch magisches Auge genannt – lassen uns erkennen, ob wir wirklich genau abgestimmt haben. Waren früher zum Übergang von einem auf einen anderen Wellenbereich drei oder mehr Spulen auszuwechseln, reicht heute ein Tastendruck. „Anodenbatterie“ und „Akku“, die den Strom für die ersten Empfänger lieferten und eine Quelle des Ärgers und erheblicher Betriebskosten waren, sind ebenso vergessen wie die Hochantenne, ohne die kaum ein einwandfreier Empfang möglich war: Wir schalten den Empfänger an das Lichtnetz oder speisen ihn aus Batterien; die eingebaute „Ferritantenne“ oder eine kurze Außenantenne „holt die Sender heran“. Daß Plattenspieler und Tonbandgerät, oft ein zweiter Lautsprecher angeschlossen werden können, ist sogar für viele Reiseempfänger selbstverständlich.

Manche Probleme allerdings waren nicht zu lösen, solange Rundfunksender vorwiegend den Mittel- und Langwellenbereich benutzten: Jedes Gewitter im Umkreis mehrerer hundert Kilometer, ja jeder elektrische Funke in der Nähe des Empfängers störte den Empfang. Im Sommer war, besonders abends, Radiohören wegen dieser Störungen häufig fast unmöglich.

Hätte man bei einer Musikübertragung wirklich alle Töne einbeziehen wollen, wäre dazu ein etwa 30 kHz breiter Sendekanal nötig gewesen. Da sich aber, wenn Empfangsstörungen ausbleiben sollen, die Kanäle weder überdecken noch überschneiden dürfen, hätte man in Europa keine 40 Sender im Mittelwellenbereich unterbringen können. Man beschnitt die Kanalbreite auf 9 kHz und mußte damit von vornherein auf viele Feinheiten der Wiedergabe verzichten. Auf die Dauer half selbst diese „Sparmaßnahme“ nicht viel: Auch die schmalen Kanäle sind heute sämtlich mehrfach belegt. Vom „Ergebnis“ können wir uns in den Abendstunden bei Mittelwellenempfang leicht überzeugen.

Erst der Ultrakurzwellenrundfunk ermöglichte wirklich hochwertige Übertragungen. Da die Reichweite der Ultrakurzwellen begrenzt ist, kann man Kanäle mehrfach belegen, sofern die Sender genügend weit voneinander entfernt sind. Mehr noch: Man kann die Kanäle so verbreitern, daß alle Töne übertragen werden, und die Frequenzmodulation anwenden. Ihre für den Hörer wichtigste Eigenschaft ist, daß sich die meisten Störungen weitgehend unterdrücken lassen. Außerdem treten im Ultrakurzwellenbereich atmosphärische Störungen ohnehin nur wenig in Erscheinung. Selbst an gewitterschwülen Sommerabenden ist von ihnen kaum etwas zu bemerken.

Allerdings verändern sich die Empfänger durch das Hinzukommen des Ultrakurzwellenbereichs gründlich. So ist für Ultrakurzwellen eine besondere Misch- und Oszilla-

torstufe, außerdem eine höhere Zwischenfrequenz als auf den übrigen Wellenbereichen nötig, und man braucht einen besonderen FM-Demodulator. Lediglich der Tonfrequenzverstärker kann unverändert weiterverwendet werden. „AM/FM-Empfänger“ sind daher komplizierter als ihre Vorgänger; doch entschädigt ihre Empfangsleistung reichlich für den erhöhten Aufwand.

Stereophonische Übertragungen (kurz Stereoübertragungen genannt) vermitteln einen „räumlichen“ Klangeindruck. Wir glauben, unmittelbar im Konzertsaal zu sitzen, können die Richtungen zu den Instrumenten ausmachen und meinen die Wiedergabe aus dem Raum, nicht aus den kleinen Lautsprecheröffnungen zu hören. Beim Tonfilm und für die Schallplattenwiedergabe wurden stereophonische Verfahren zuerst eingeführt; beim Rundfunk bereiteten zusätzliche Bedingungen erhebliche Schwierigkeiten:

Stereosendungen müssen auch mit einem nicht dafür eingerichteten Empfänger ohne Qualitätsverlust (wenn auch ohne Stereowirkung) zu empfangen sein, umgekehrt muß ein Stereoempfänger Nicht-Stereosendungen einwandfrei wiedergeben. Außerdem dürfen Sender für Stereoübertragungen keinen breiteren Sendekanal als bei „einfachen“ Sendungen beanspruchen.

Nach mehrjährigen Versuchen wurde in vielen Staaten – auch in der DDR – das *Pilotton-Verfahren* eingeführt. Der Ultrakurzwellensender strahlt dabei in seinem Kanal ein kompliziert zusammengesetztes Signal aus. Es besteht aus einem „normalen“, nicht-stereophonischen Signal, aus einem Hilfssignal, das zusammen mit dem ersten die für Stereowiedergabe nötige „Richtungsinformation“ liefert, und aus dem wegen seiner hohen Frequenz von 19 kHz unhörbaren *Pilotton*. Er gab dem Verfahren den Namen und ist nötig, damit der *Stereodecoder* des Empfängers das Signalgemisch auflösen und die Signale für die „rech-

ten“ und die „linken“ Lautsprecher bereitstellen kann. Auch beim *Fernsehen* kehren die Baustufen aller Sender und Empfänger mit ihren Funktionen wieder. Es liegt an den Besonderheiten der zu übertragenden Signale, daß, wie ein Blick in das Innere oder auf das Schaltbild eines Fernsehempfängers zeigt, „allerhand dazukommt“.

Man kann über einen Funk- oder Drahtweg ein Bild nicht auf einmal übertragen, sondern muß sich mit einem Kunstgriff helfen: Jedes Bild wird (zweckmäßigerweise „Zeile für Zeile“) in eine Folge sehr kleiner, mehr oder weniger heller Fleckchen (wir betrachten zunächst das Schwarz-weißfernsehen) zerlegt (Bild 17). Aus diesen *Bildpunkten* werden elektrische Signale gewonnen, *nacheinander* übertragen, vom Empfänger in helle und dunkle Bildpunkte zurückverwandelt und in der richtigen Reihenfolge wieder zusammengesetzt.

Wenn wir ein Foto oder ein Zeitungsbild durch die Lupe betrachten, erkennen wir, wie sich ein Bild aus Bildpunkten zusammensetzen läßt. Auch das Umwandeln des „Nebeneinander“ in ein „Nacheinander“ ist keineswegs neu: Jeder Brief wird zeilenweise geschrieben und gelesen, jede Zeile setzt sich aus Elementen – Buchstaben, Ziffern, Zeichen – zusammen.

Der Fernsehzuschauer aber möchte ein vollständiges und überdies „lebendes“ Bild sehen. Die Bildpunkte müssen nicht nur so schnell übertragen und zusammengesetzt werden, daß das Auge von diesem Vorgang nichts merkt, sondern in jeder Sekunde sind, wie beim Film, zahlreiche einzelne Bilder zu übermitteln. In Europa hat man sich auf 25 Bilder je Sekunde geeinigt.

Ein Bild gibt um so mehr Einzelheiten und Feinheiten wieder, je zahlreicher und damit kleiner die Bildpunkte sind. Doch jeder Bildpunkt mehr macht die technischen Einrichtungen beim Fernsehen komplizierter. Daher mußte man sich – unter anderem, um preiswerte Fernsehempfän-

Bildzerlegung



Bildaufbau



Bild 17.

Signalübertragung



Anode

strahlerzeugendes System

Bildschirm

Katode

Wehneltzylinder

Ablenkssystem

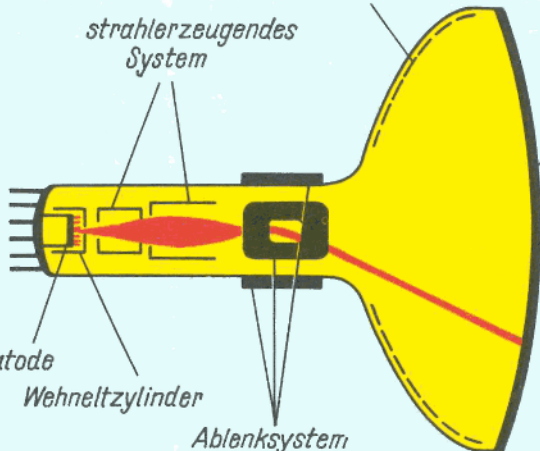


Bild 18

ger produzieren zu können – auf eine Bildpunktzahl einigen, die gute Bildqualität mit erträglichem Aufwand vereint.

In vielen Staaten, auch in der DDR, zerlegt man das Fernsehbild in 625 Zeilen. Unter der Annahme, daß jeder Bildpunkt eine Zeile breit ist, ergibt das je Bild über eine halbe Million Bildpunkte. In einer Sekunde sind daher etwa 13 Millionen Bildpunkte zu übertragen! Das erfordert eine Schnelligkeit und eine Präzision, wie sie nur mit den Mitteln der Elektronik zu erreichen sind.

Bekanntestes elektronisches Hilfsmittel des Fernsehens ist die *Bildröhre* (Bild 18), eine den Bedingungen des Fernsehens angepaßte *Elektronenstrahlröhre*, nach ihrem Erfinder K. F. Braun auch Braunsche Röhre genannt. Man versteht darunter eine Elektronenröhre, in der ein Elektronenstrahl erzeugt und benutzt wird, um auf einem mit sogenannten Leuchtstoffen präparierten Bildschirm sichtbare Spuren zu „schreiben“.

Die Elektronen treten aus einer Katode und durchlaufen das *strahlerzeugende System*. Es ist aus mehreren Elektroden zusammengesetzt und wirkt ähnlich wie Linsen auf Lichtstrahlen gegenüber Elektronen: Es bündelt sie zu einem spitz zulaufenden Strahl, der den Bildschirm trifft und an der Aufprallstelle in einer von den Leuchtstoffen abhängigen Farbe aufleuchten läßt. Eine Anode beschleunigt die Elektronen.

Das *Ablenkssystem* führt den Leuchtfleck zur Bildzusammensetzung zeilenweise über den Bildschirm. Seine Wirkung beruht darauf, daß die Flugbahn von Elektronen sich durch elektrische oder magnetische Kräfte beeinflussen läßt. Bildröhren verwenden ein aus zwei Spulenpaaren bestehendes Ablenkssystem, das auf den Röhrenkolben geschoben wird. Fließt Strom durch die Spulenwindungen, wird der Elektronenstrahl „verbogen“, der Leuchtfleck wandert zur Seite. Stromrichtung und -stärke bestimmen, nach welcher Seite und um wieviel er wandert. Der Elek-

tronenstrahl reagiert unverzüglich auf jede Änderung des Spulenstroms. Man kann daher den Leuchtfleck nahezu beliebig schnell auf dem Bildschirm hin- und herführen.

Durch die Horizontalablenkspulen schickt man einen Strom, der den Leuchtfleck waagrecht eine Bildschirmzeile bestreichen, vom Zeilenende an den Anfang zurückspringen, die Zeile erneut überstreichen läßt usf. Der Strom durch die Vertikalablenkspulen führt den Leuchtfleck während des Schreibens einer Zeile um eine Zeilenbreite nach unten. So wird Zeile unter Zeile gesetzt. Von der letzten Zeile springt der Strahl wieder zum Ausgangspunkt zurück, das Zeilenschreiben beginnt erneut.

Die Zeilen werden so schnell untereinander gesetzt, daß das Auge eine leuchtende Fläche sieht. Damit sie sich in ein Bild verwandelt, muß der Elektronenstrahl an den Stellen des Bildschirms, die dunklen Bildpunkten entsprechen, mehr abgeblendet werden, an hellen dagegen weniger. Die Bildsignale müssen, der Helligkeit der Bildpunkte entsprechend, die Helligkeit des Leuchtflecks steuern.

Das geschieht mit Hilfe des *Wehnelt-Zylinders* (nach dem deutschen Physiker Arthur Wehnelt benannt). Das ist ein kleiner Metallzylinder mit durchbohrtem Boden, der über die Bildröhrenkatode gestülpt wird. Nur durch die Bohrung können Elektronen zum Bildschirm fliegen. Durch die Spannung zwischen Wehnelt-Zylinder und Katode kann man wie mit dem Steuergitter einer Elektronenröhre den Elektronenstrom und damit die Helligkeit des Leuchtflecks verändern. Die Steuerspannung wird aus den vom Sender übertragenen Signalen gewonnen. Überträgt er das Bildsignal für „schwarz“, sperrt der Wehnelt-Zylinder den Elektronenstrom, strahlt er das Signal für „weiß“ aus, läßt der Wehnelt-Zylinder die Elektronen ungehindert passieren.

Von der Bildzerlegung beim Sender sei nur gesagt, daß in der sogenannten Bildaufnahmeröhre der Fernsehkamera ein zeilenweise geführter Elektronenstrahl wieder eine entscheidende Rolle spielt. Damit stoßen wir auf ein technisches Problem, das den Fernsehtechnikern viel Sorge bereitet hat: Der Elektronenstrahl in der Fernsehkamera und die Elektronenstrahlen sämtlicher Bildröhren, die eine von dieser Kamera eingefangene Szene wiedergeben sollen, müssen „synchron“, zeitgleich, laufen: Ist im Sender die erste Zeile „abgetastet“, muß der Elektronenstrahl aller Bildröhren seine erste Zeile beendet haben; erscheint beim Abtasten in der Mitte von „Zeile 400“ ein dunkler Punkt, muß genau an der entsprechenden Stelle der Elektronenstrahl der Bildröhre abgeblendet werden usw. Und das bei 625 Zeilen je Bild, bei 13 Millionen Bildelementen in der Sekunde!

Überlasse man den zeilenweisen Lauf der Elektronenstrahlen in der Fernsehkamera und in den auf diesen Sender eingestellten Empfängern sich selbst, könnte die nötige Genauigkeit nicht einmal für Sekunden aufrechterhalten werden: Das Bild „fiele durcheinander“.

Als Lösung blieb nur, die Elektronenstrahlen in allen Empfängerbildröhren vom Sender aus zum „Gleichschritt“ zu zwingen. Daher sendet jede Fernsehstation außer den Bildsignalen *Synchronisierimpulse*. Sie „befehlen“ den Elektronenstrahlen in den Bildröhren, genau zum richtigen Zeitpunkt vom Zeilenende an den Anfang, vom Bildende an den Anfang des folgenden Bildes zurückzukehren, und sorgen dafür, daß das Zurückspringen des Elektronenstrahls auf dem Bildschirm unsichtbar bleibt.

Ein Fernsehsender strahlt somit ein recht kompliziertes Signalgemisch aus: Es umfaßt die Bildsignale, Synchronisierimpulse (bei denen man zwischen Impulsen für Zeilen- und Bildwechsel unterscheiden muß) und den Begleitton, ohne den wir nur „Stummfilme“ sehen könnten.

Der Kanal, den ein Fernsehsender beansprucht, ist deshalb sehr breit. Man legte ihn auf 7 bzw. 8 MHz fest. Derart breite Kanäle wären weder im Mittelwellenbereich (der insgesamt nur wenig breiter als 1 MHz ist) noch im Kurzwellenbereich unterzubringen. Alle Fernsehstationen arbeiten im Ultrakurzwellen- oder Dezimeterwellenbereich. Für diese Bereiche haben sich die Bezeichnungen *VHF* (von „very high frequency“ = sehr hohe Frequenz) und *UHF* (von „ultra high frequency“ = ultrahohe Frequenz) auch bei uns eingebürgert.

Der Fernsehempfänger (Bild 19) ist ein Superhet. Die im VHF- oder UHF-Bereich liegenden Empfangsfrequenzen werden zunächst verstärkt und auf eine niedrigere Zwischenfrequenz umgesetzt. Die entsprechenden Baustufen heißen *Kanalwähler*. Allerdings machen die Eigenschaften der sehr hohen Frequenzen getrennte Kanalwähler für die VHF- und die UHF-Kanäle sowie getrennte VHF- und UHF-Antennen erforderlich.

Dem *Zwischenfrequenzverstärker* folgt ein Demodulator. Man nennt ihn *Bildgleichrichter*, weil an seinem Ausgang die für die Helligkeitssteuerung des Elektronenstrahls erforderlichen Spannungen abgenommen werden. Sie werden in einer *Bildverstärkerstufe* nochmals verstärkt.

Am Bildgleichrichter oder -verstärker werden auch die Signale für den Begleiton abgezweigt. Sie sind frequenzmoduliert in dem vom Sender übertragenen Signalgemisch enthalten und werden wie in einem UKW-Empfänger weiterbehandelt.

Das *Impulssieb* trennt die Synchronisierimpulse von den Bildsignalen und „sortiert“ sie nach den längeren Bild- und den kürzeren Zeilenimpulsen.

Allerdings steuern die Synchronisierimpulse den Lauf des Elektronenstrahls nicht unmittelbar. Sie kontrollieren vielmehr *Ablenkstufen* – für horizontale und vertikale Ablenkung getrennt –, in denen die Ablenkströme erzeugt wer-

den, und „stellen sie nach“, sobald sie außer Tritt mit dem Sender zu geraten beginnen.

Damit wir ein Fernsehbild sehen können, müssen demnach zahlreiche Prozesse zusammenwirken – und zwar mit sehr großer Genauigkeit; denn das Schreiben einer Bildzeile dauert nicht einmal den zehntausendsten Teil einer Sekunde, während bereits ein Nach- oder Vorlaufen des Elektronenstrahls um einem Zeilenbruchteil das Bild durcheinanderbringt.

Auf „unentbehrliche Kleinigkeiten“ sind wir nicht einmal eingegangen: Die saubere Trennung von Bildsignalen, Ton und Synchronisierimpulsen zum Beispiel erfordert besondere Maßnahmen, ebenso das Unschädlichmachen äußerer Störungen, die den Ausfall der Synchronisierung zur Folge hätten. Auch waren die Fernsehzuschauer in ihren Wünschen recht anspruchsvoll: Ihr Gerät sollte kinderleicht zu bedienen, nach Bildhelligkeit und -kontrast – nach Möglichkeit vom Sitzplatz aus – einstellbar sein usf. Wir wissen, daß alle diese Forderungen erfüllt wurden.

Kaum waren einwandfreie Schwarzweißübertragungen selbstverständlich, fragte man: Wo bleibt die Farbe? Inzwischen ist auch das Farbfernsehen Wirklichkeit geworden; die Zahl der Fernsehstationen, die einen Teil ihres Programms farbig ausstrahlen, wächst ständig.

Daß *Farbfernsehen* (wie auch die Farbfotografie und der Farbfilm) möglich ist, verdanken wir einer seit vielen Jahrzehnten bekannten Erscheinung: Jeder Farbeindruck läßt sich in die drei Grundfarben Rot, Grün, Blau zerlegen oder aus drei Grundfarben mischen. Genau das geschieht bei jeder Farbfernsehübertragung. Die Farbfernsehkamera zerlegt das aufzunehmende Bild in seine roten, grünen und blauen Anteile, aus denen Signale zur Übertragung gewonnen werden. Im Empfänger werden die Farbanteile zurückgewonnen und der übertragenen Bildstelle entsprechend gemischt.

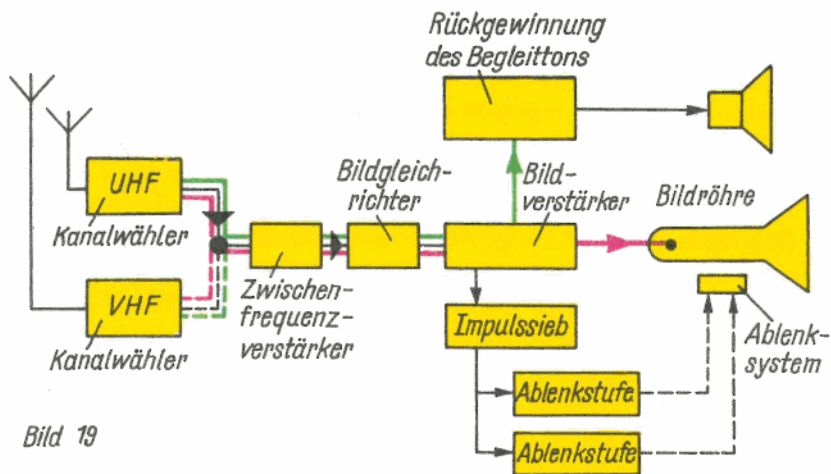


Bild 19

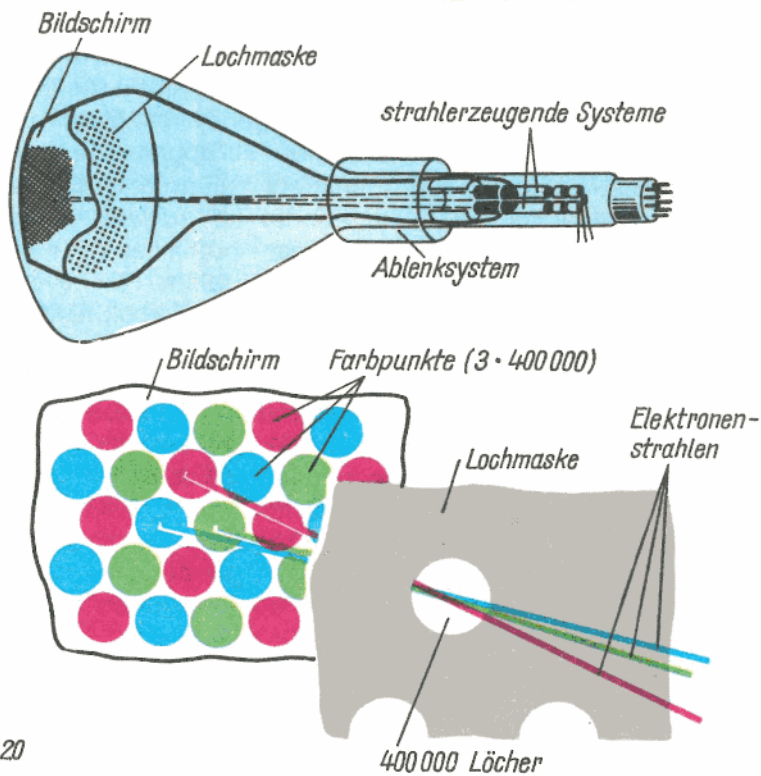


Bild 20

Das ist die Aufgabe der Farbbildröhre, in fast allen Farbfernsehempfängern gegenwärtig eine sogenannte *Maskenröhre* (Bild 20). Sie enthält drei strahlenerzeugende Systeme, je eines für eine Grundfarbe. Die drei Elektronenstrahlen werden gemeinsam abgelenkt und zeilenweise über den Bildschirm geführt. Dicht davor passieren sie eine Lochmaske, ein Stahlblech mit etwa 400 000 regelmäßig angeordneten winzigen Löchern. Die Elektronenstrahlen sind so gegeneinander geneigt, daß sie sich genau in Höhe der Maskenlöcher schneiden und anschließend wieder auseinanderlaufen.

Der Bildschirm ist ein Mosaik aus $3 \times 400\,000$ Leuchtstoffpunkten. Sie bilden jeweils die Ecken gleichseitiger Dreiecke und leuchten in den Farben Rot, Grün und Blau, wenn sie von Elektronen getroffen werden. Jedem Maskenloch ist ein Dreieck zugeordnet. Die Lochmaske ist so justiert, daß der zur Grundfarbe Rot gehörende Elektronenstrahl jeweils nur rot leuchtende Farbpunkte erreichen kann, der „grüne“ Elektronenstrahl nur grün leuchtende, der „blaue“ nur blau leuchtende. Ist nur der „blaue“ Strahl in Tätigkeit, sieht das Auge – sofern es dem Bildschirm nicht sehr nahe kommt – eine blaue Fläche. Werden alle drei Elektronenstrahlen von ihren Farbsignalen gesteuert, werden alle Leuchtstoffelemente entsprechend angeregt. Das Auge mischt aus den Grundfarbenanteilen die Farbe der betreffenden Stelle der Originalszene.

Die Technik der Sender, der Empfänger und der Übertragung lehnt sich so weit wie möglich an das Schwarzweißfernsehen an. Das ist schon deshalb nötig, weil der Besitzer eines Schwarzweißempfängers Farbsendungen ebenfalls (natürlich in Schwarzweiß) verfolgen will, während ein Farbfernsehempfänger auch Schwarzweißsendungen wiedergeben soll.

Das vom Fernsehsender ausgestrahlte Signalgemisch muß daher Signale für Schwarzweißempfänger und natürlich

die für die Farbübertragung benötigten Signale so enthalten, daß der Schwarzweißempfang durch sie nicht beeinträchtigt wird.

Dazu müssen aus den Farbsignalen neue Signale gewonnen werden: Das Helligkeitssignal entspricht dem Signal, das eine Schwarzweißfernsehkamera abgeben würde, und erzeugt das Bild im Schwarzweißfernsempfänger. Aus dem Helligkeitssignal und den Farbsignalen werden außerdem zwei sogenannte Farbdifferenzsignale gebildet und gesendet.

Im Empfänger werden aus Helligkeitssignal und Farbdifferenzsignalen wieder Signale abgeleitet, die die den Grundfarben zugeordneten Elektronenstrahlen der Farbbildröhre steuern. Die dazu nötigen Baustufen heißen *Farbdecoder* – in einem Schwarzweißfernsempfänger gibt es sie nicht.

Wie aber überträgt man die Farbdifferenzsignale, ohne den Sendekanal zu verbreitern? Hier kommt uns unser Auge entgegen: Sein Auflösungsvermögen für Farbunterschiede ist beträchtlich geringer als für Helligkeitsunterschiede. Man kann bei der Übertragung der Farbdifferenzsignale auf gewisse Feinheiten verzichten und benötigt für ihre Übertragung daher nur einen schmalen Kanal, der im breiten Sendekanal „verpackt“ wird.

Man moduliert zu diesem Zweck einen innerhalb dieses Kanals liegenden Farbhilfsträger mit den Farbdifferenzsignalen. Darin, wie das geschieht, unterscheiden sich die Fernsehsysteme.

Beim SECAM-Verfahren, für das sich Frankreich (wo das System entwickelt wurde), die Sowjetunion, die DDR und andere Länder entschieden haben, werden beide Farbdifferenzsignale nacheinander zeilenweise im Wechsel übertragen. Im Empfänger wandelt eine sogenannte Verzögerungsleitung das „Nacheinander“ wieder in das erforderliche „Nebeneinander“ um. Bei anderen Farbfern-

sehsystemen werden die Farbdifferenzsignale gleichzeitig übertragen.

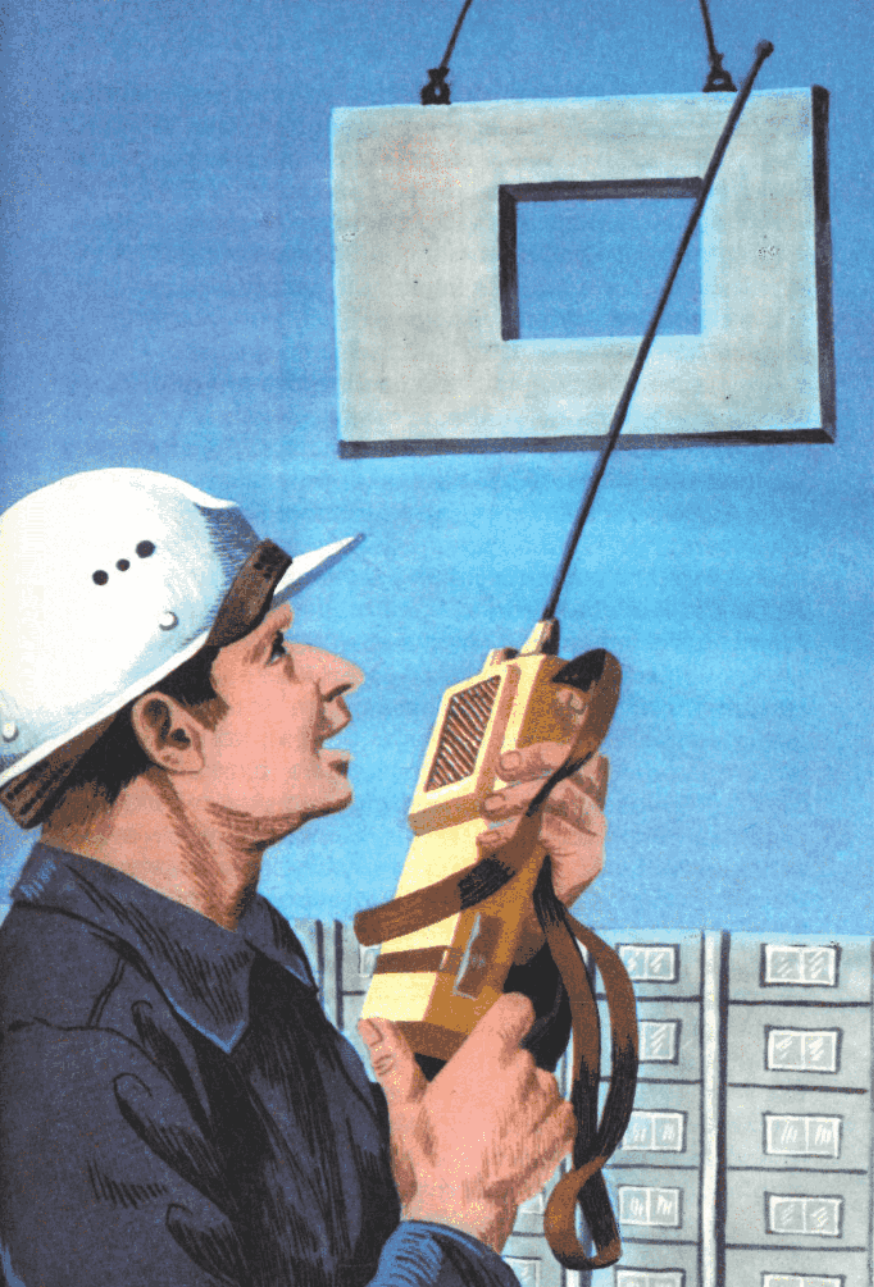
Bis zum Farbdecoder unterscheiden sich Farbfernsehempfänger für die verschiedenen Übertragungssysteme nicht; auch die Unterschiede gegenüber einem Schwarzweißempfänger sind nicht sehr groß. Der zusätzliche Aufwand – er ist allerdings erheblich – wird vor allem durch die Farbdecoder bedingt.

So enthält zum Beispiel der Farbfernsehempfänger „Color 20“ unserer volkseigenen Industrie neben Hunderten anderer Bauelemente nicht weniger als 66 Transistoren und 59 Dioden – und beweist damit zugleich, daß die Halbleitertechnik auch beim Fernsehen im Vormarsch ist.

Rundfunk und Fernsehen sind nur – wenn auch ungemein wichtige – Teilgebiete der drahtlosen Nachrichtenübertragung. Zahlreiche andere Funkdienste belegen dicht an dicht die Frequenzbereiche:

Transkontinentale und transozeanische Funklinien übermitteln Telegramme, Fernschreiben, Bildtelegramme, Ferngespräche auf Tausende Kilometer. Der Seefunk stellt die Verbindung zwischen Schiffen und Küstenfunkstationen, zwischen Schiffen untereinander und mit der Heimat her. Flugfunkdienste begleiten und beraten Flugzeuge auf jedem Streckenkilometer im Inland und auf internationalen Fluglinien. Von eigens dafür vorgesehenen Stationen werden Presse- und Wettermeldungen verbreitet. Zeitzeichen- und Normalfrequenzsender strahlen für wissenschaftliche Zwecke mit größter Präzision Zeitsignale und Meßfrequenzen aus.

Kaum noch überschaubar ist die Zahl der Funkdienste zur Überbrückung geringer Entfernungen: Kraftfahrzeuge der Volkspolizei, der Unfallhilfsdienste und des Krankentransports können über Funk schnell zum Einsatzort dirigiert werden; Umwege und Leerfahrten von Taxis und LKWs



lassen sich erheblich einschränken, wenn diese drahtlos mit einer Leitzentrale in Verbindung stehen. Binnenschiffe, Rangierlokomotiven, Hafenschlepper sind über Funk erreichbar. Zahllose Handfunksprechgeräte, klein, leicht, auf einfachste Weise zu bedienen, sichern die Verständigung auf Großbaustellen, in Tagebauen, bei Forstarbeiten, in der Landwirtschaft, im Vermessungswesen und an hundert anderen Stellen.

Es gäbe ein heilloses Durcheinander, wollte jeder dieser und vieler anderer Funkdienste nach Belieben Frequenzen belegen. Internationale Abmachungen regeln die Einteilung der Frequenzen für die Funkdienste. So sind dem Seefunk, dem Flugfunk, dem transkontinentalen und transozeanischen Funkverkehr usw. bestimmte Frequenzen zugewiesen. Für Notrufe, den Funkverkehr mit Satelliten und Raumfahrzeugen werden Frequenzen frei gehalten. Sämtliche Funkdienste sind bemüht, mit den verfügbaren, in ihrer Zahl begrenzten Sendekanälen hauszuhalten und sie so wirksam wie möglich auszunutzen. Dazu gehört zunächst, daß man Funkdiensten nach Möglichkeit die geeignetsten Frequenzen zuteilt. So benutzen Fernverbindungen den Lang- und insbesondere den Kurzwellenbereich, während für Nahverbindungen, zum Beispiel zwischen Fahrzeugen oder für Handfunksprechgeräte, Ultrakurzwellen oder Wellen an der Grenze zwischen Ultrakurz- und Kurzwellenbereich bevorzugt werden.

Störungen verursachen Unterbrechungen des Funkverkehrs oder zwingen zu Wiederholungen. Beides setzt die Leistungsfähigkeit einer Funkverbindung herab. Zahlreiche technische Maßnahmen dienen daher der Bekämpfung von Störungen:

Für den Fernverkehr zwischen ortsfesten Großstationen benutzt man umfangreiche Richtantennenanlagen, die nur innerhalb eines schmalen Winkelbereichs senden oder empfangen. Da an Stellen, die nur wenige hundert Meter

voneinander entfernt sind, oft unterschiedliche und von Sekunde zu Sekunde wechselnde Empfangsbedingungen herrschen, rüstet man die Empfangsanlagen mit örtlich getrennten Antennen aus, von denen selbsttätig die jeweils „beste“ an den Empfänger geschaltet wird. In den Empfängern unterdrücken sogenannte Begrenzer solche Störungen, deren Stärke die der gewünschten Signale wesentlich überschreitet. Für Nahverbindungen greift man häufig auf die störungsarme Frequenzmodulation zurück.

So wichtig Morsetaste und Kopfhörer zum Beispiel für den Seefunkverkehr und für andere „bewegliche“ Funkdienste gegenwärtig noch sind, für den Verkehr zwischen Großstationen, die täglich Tausende Telegramme, Fernschreiben und Bildtelegramme befördern, reichen sie längst nicht mehr aus. Hier braucht man „schnellere“ Einrichtungen, bei denen etwa die Nachrichten zunächst in Lochstreifen gestanzt und dann pausenlos mit hoher Geschwindigkeit gesendet und empfangen werden. Wie früher schon in der Drahttelegrafie lernte man, mehrere Fernschreiben gleichzeitig über eine Funklinie zu schicken; es gibt sogar Verfahren, mit deren Hilfe Übertragungsfehler selbsttätig erkannt werden.

Um die Funker zu entlasten, werden im Seefunkdienst gegenwärtig *Selektivrufverfahren* erprobt. Sie ähneln dem Selbstwählsprechverkehr: Jedem Schiff ist eine Rufnummer zugeteilt. Sobald eine Küstenfunkstelle die Rufnummer des betreffenden Schiffs wählt, werden an Bord Signale ausgelöst. Der Bordfunker braucht nicht, mitunter stundenlang, auf einen Anruf zu warten. Auch das Aufnehmen von Wettermeldungen wurde erleichtert: Auf den modernen Schiffen unserer Handelsflotte zum Beispiel drucken *Wetterkartenschreiber* selbsttätig und in einigen Minuten eine Wetterkarte, die sonst erst in stundenlanger Arbeit an Bord aus zahlreichen vom Funker aufgenommenen Wettermeldungen rekonstruiert werden müßte.

Die *Funktelefonie* brauchte breitere Sendekanäle als die Funktelegrafie. Dabei wird bei Amplitudenmodulation geradezu verschwenderisch mit dem Sendekanal umgegangen. In seiner Mitte liegt die Trägerfrequenz, rechts und links davon zwei *Seitenbänder*. In jedem Seitenband aber „steckt“ die vollständige zu übertragende Nachricht. Ein Seitenband ist daher überflüssig und kann weggelassen werden. Das geschieht beim heute weit verbreiteten *Einseitenbandbetrieb*. Man spart nicht nur die halbe Kanalbreite, sondern gewinnt auch durch geringere Störungen und Verzerrungen an Übertragungsqualität – abgesehen davon, daß der Wirkungsgrad des Senders durch Wegfall des nicht benötigten Seitenbandes steigt.

Die *Funknavigation*, mit deren Hilfe Fahrzeuge ihren Standort bestimmen und ein Ziel ansteuern können, ist nicht nur für die See- und Luftfahrt, sondern auch für das Vordringen in den Weltraum unentbehrlich.

Am ältesten, jedoch auch heute noch verbreitet, ist die *Funkpeilung* (Bild 21). Sie stellt die Richtung fest, aus der Funkwellen einen Empfänger erreichen. Außer diesem ist zunächst nur eine Spezialantenne erforderlich, meistens der sogenannte *Peilrahmen*, eine Spule großer Fläche mit nur einer oder wenigen Windungen. Sie wird gedreht, bis der zu peilende Sender am lautesten oder am leisesten zu hören ist (meist wählt man die leichter zu erkennende leiseste Stellung). An einer Skale kann die Richtung zum Sender abgelesen werden. Überträgt man sie in die Karte und wiederholt die Peilung für einen zweiten Sender, ergibt der Schnittpunkt der eingetragenen Linien den eigenen Standort.

Der Funkpeiler wurde verbessert: So verwendet man statt eines drehbaren zwei feststehende, gegeneinander um 90° versetzte Rahmen, die so zusammengeschaltet werden, daß eine Richtungsbestimmung ohne Drehung der Rahmen möglich ist. Es gibt Sichtfunkpeiler, bei denen die

Richtung des gepeilten Senders auf dem Bildschirm einer Elektronenstrahlröhre angezeigt wird, und für die Luftfahrt den *Radiokompaß*, der die Richtung zu einem wählbaren Sender selbsttätig und fortlaufend anzeigt, ohne daß an Bord die Peilanlage bedient werden muß.

An wichtigen Küstenpunkten, für den Flugverkehr auch im Binnenland, wurden *Funkfeuer* errichtet. Für die Funkpeilung zum Beispiel gibt es Funkfeuer im Langwellenbereich (einige können wir mit dem Rundfunkempfänger hören), die neben einer Buchstabenkennung in Morsezeichen Dauerstriche zum Einstellen der Peilgeräte senden.

Andere Funkfeuer, häufig im UKW-Bereich arbeitend, erzeugen mit ihren Sendern und Antennen *Leitstrahlen*, unsichtbare Linien im Raum, an denen sich ein Fahrzeug mit Hilfe seiner Bordgeräte „entlangtasten“ kann. Der Funker oder Navigationsoffizier hört zum Beispiel kurze Funkimpulse, wenn sich das Fahrzeug links vom Leitstrahl befindet, lange wenn es nach rechts abweicht. Korrigiert er seinen Kurs, und befindet er sich auf dem Leitstrahl, der zum Beispiel eine Hafeneinfahrt markiert, hört er einen Dauerton (auch Instrumentenanzeige ist üblich).

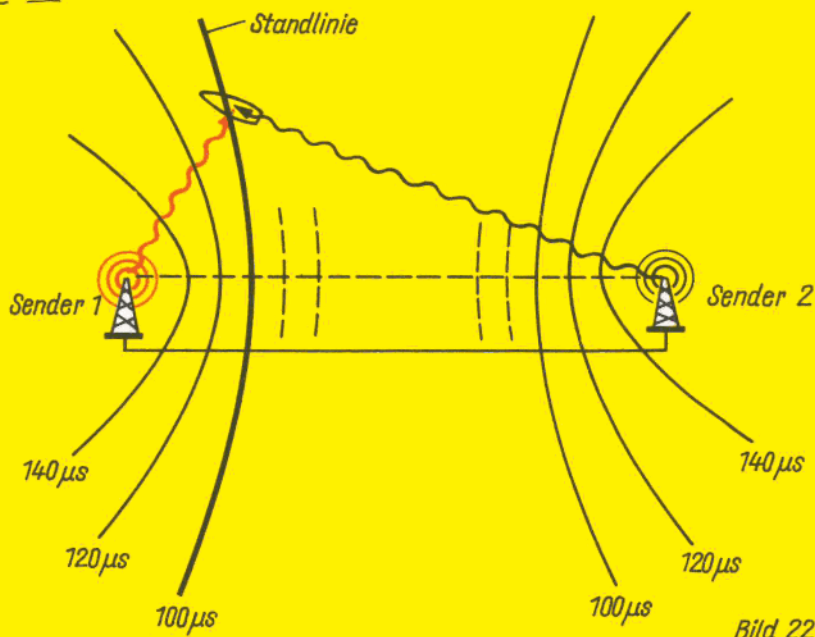
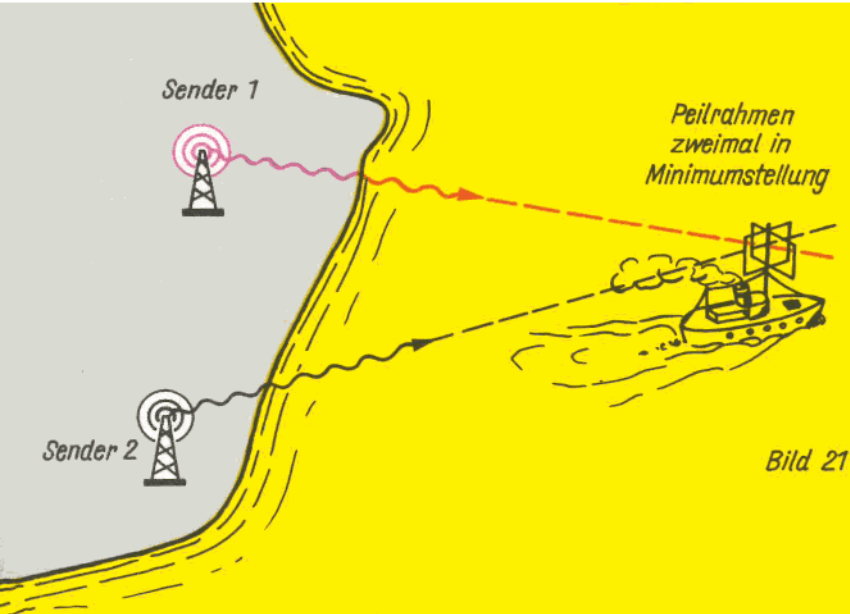
Für das *Instrumentenlandesystem*, von der Luftfahrt vieler Länder für Landungen unter schlechten Sichtbedingungen eingeführt, wurde diese Methode weiter ausgebaut: Ultrakurzwelligensender erzeugen über Richtantennen einen unsichtbaren „Gleitweg“, der ein Flugzeug sicher zur Landebahn, der Piste, führt. Bordinstrumente zeigen dem Piloten, was er tun muß, um den Gleitweg zu erreichen und einzuhalten. Farbige Lämpchen an Bord markieren bestimmte Entfernungen von der Landebahn. Sie werden von Empfängern gesteuert, die auf *Markierungsfunkfeuer* ansprechen. Das sind Ultrakurzwelligensender am Boden, die ihre hochfrequente Energie senkrecht nach oben strahlen; beim Überfliegen leuchtet dann eine Signallampe auf.

Drehfunkfeuer ähneln den Leuchttürmen der Schifffahrt und haben im Luftverkehr große Bedeutung. Wir können uns vorstellen, daß sie einen umlaufenden Funkstrahl erzeugen, mit dessen Hilfe Richtungsbestimmungen möglich sind. Das verbreitete *System VOR* (Abkürzung für „very high frequency omnirange“, Höchsthfrequenz-Drehfunkfeuer) zum Beispiel zeigt an Bord ständig die Richtung zu einem Drehfunkfeuer an und ermöglicht das Einhalten eines vorgegebenen Kurses. Sind Drehfunkfeuer und Bordanlage mit einem Entfernungsmeßzusatz ausgestattet, wird überdies die Entfernung zum Drehfunkfeuer angezeigt. Aus diesen Angaben folgt der eigene Standort.

Drehfunkfeuer arbeiten im Ultrakurzwellenbereich; ihre Reichweite ist also begrenzt. In der Seefahrt, für Transozeanflüge oder für Flüge über wenig besiedeltem Gebiet sind Navigationsverfahren weit größerer Reichweite (bis zu mehreren tausend Kilometern) nötig, die infolgedessen den Lang- oder auch den Grenzwellenbereich benutzen. Besondere Bedeutung erlangte hier die *Hyperbelnavigation* (Bild 22).

Nehmen wir an, zwei Sender, mehrere hundert Kilometer voneinander entfernt, strahlen gleichzeitig kurze Funkimpulse aus. Ein Schiffs- oder Flugzeugempfänger innerhalb der Reichweite der Sender wird die Impulse normalerweise nicht gleichzeitig, sondern nacheinander aufnehmen, weil die Funkwellen der beiden Sender verschiedenen lange Wege bis zum Empfänger zurücklegen müssen.

Trägt man alle Punkte, für die eine gleiche Zeitdifferenz (z. B. von $100\ \mu\text{s}$) gemessen wurde, in eine Karte ein und verbindet sie miteinander, ergibt sich eine aus der Mathematik bekannte Kurve, eine Hyperbel. Wiederholt man die Messungen für andere Zeitdifferenzen, zum Beispiel für $120, 140 \dots \mu\text{s}$, erhält man weitere Hyperbeln, bis die



Karte von einer Hyperbelschar überzogen ist, deren jede einer bestimmten Zeitdifferenz entspricht.

Wird umgekehrt auf dem Schiff oder im Flugzeug für das Eintreffen der Impulse ein Zeitunterschied von $100\ \mu\text{s}$ festgestellt, befindet sich das Fahrzeug irgendwo auf der „ $100\text{-}\mu\text{s}$ -Hyperbel“. Diese ist eine sogenannte Standlinie des Fahrzeugs. Zur Feststellung des Standorts braucht man den Schnittpunkt mit einer zweiten Standlinie. Man bekommt sie durch ein zweites Senderpaar, dessen Hyperbeln die des ersten schneiden.

Dreierlei ist demnach an Bord nötig, um den Standort zu bestimmen: ein Empfänger, der die Sender einer „Hyperbelkette“ empfängt, eine mit diesem verbundene Zeitmeßeinrichtung, die selbst kürzeste Zeitunterschiede (oft nur wenige Mikrosekunden) genau anzeigt, und Karten, in die für die zu empfangenden Sender die Hyperbelscharen eingedruckt sind.

Besonders zwei Verfahren der Hyperbelnavigation sind in mehreren Abarten weit verbreitet und werden von Flugzeugen ebenso wie von Schiffen benutzt:

Beim System *LORAN* (Abkürzung für „*long range navigation*“, Navigation über große Entfernungen) strahlen die Sender, wie eben beschrieben, Impulse aus. Sie erscheinen im Empfänger auf dem Bildschirm einer Elektronenstrahlröhre als gegeneinander verschobene Zacken (ihr Abstand entspricht der Zeitdifferenz). Mit Bedienungsknöpfen bringt man die Zacken genau zur Deckung, liest an mitlaufenden Zahlenskalen die Hyperbelkennzeichnungen ab und sucht den Schnittpunkt der festgestellten Hyperbeln in der Karte auf.

Beim *DECCA-System* strahlen die Sender ständig. Grundlage für die Zeitmessung bildet hier der „Gangunterschied“ der beim Empfänger ankommenden Wellen, der ebenfalls vom Wegunterschied abhängt (Wellenberge und Wellentäler verlassen die Sendeantennen stets im gleichen



Moment, erreichen aber den Empfänger nicht gleichzeitig). Das Bordgerät wird (etwa bei Reisebeginn) einmal eingestellt und arbeitet dann selbsttätig und ununterbrochen. Auf zifferblattähnlichen „Decometer“-Skalen werden fortlaufend die überfahrenen oder überflogenen Hyperbeln angezeigt. Der Navigationsoffizier liest die Werte ab, sucht den Hyperbelschnittpunkt in der Karte auf und kennt damit den Standort mit einer Genauigkeit, die im günstigsten Fall nur eine Abweichung von wenigen Metern aufweist. Lediglich beim Übergang in den Bereich einer anderen DECCA-Kette wird der Empfänger durch Knopfdruck umgeschaltet.

Sogar das Ablesen kann man sich ersparen: Es gibt Zusatzgeräte, in denen die elektrischen Kräfte, die sonst die Decometerzeiger antreiben, einen Schreibstift über eine Spezialkarte führen und den zurückgelegten Weg ständig einzeichnen. Besonders für den Weitstrecken-Flugverkehr sind derartige *Kurswegschreiber* eine wertvolle Hilfe.

Zwischen Dezimetern und Millimetern Wellenlänge

Mikrowellen, Koaxialkabel, Richtfunkstrecken, Parabolantennen: Es gibt wohl niemanden, der diese Ausdrücke noch nie hörte oder las. Es sind Fachausdrücke der *Höchstfrequenz-* oder *Mikrowellentechnik*, die sich mit elektromagnetischen Wellen der Wellenlänge zwischen 0,1 und 100 cm (Frequenzen zwischen 300 GHz und 300 MHz) beschäftigt und deren Bedeutung rasch wächst. Vor allem aus zwei Gründen wurde die Höchsthfrequenztechnik entwickelt: Sie erschließt der Nachrichtentechnik neue Übertragungskanäle und eröffnet der Elektronik Verfahren, die bei niedrigeren Frequenzen nicht durchführbar wären.

Das Bedürfnis, Informationen (Rundfunk- und Fernsehprogramme, Ferngespräche, Fernschreiben, Meßwerte usw.) auszutauschen, wächst immer schneller. Ein großer Teil dieser Nachrichten soll oder muß drahtlos übertragen werden. Weil aber jede Funkverbindung einen Kanal bestimmter Breite benötigt, war auf den niedrigeren Frequenzen bald „alles besetzt“. Im Höchsthfrequenzbereich lassen sich zahlreiche Übertragungskanäle von mehreren Megahertz Breite, wie wir sie vom Fernseher her kennen, unterbringen; außerdem ist eine sehr störungsarme Übertragung möglich. Atmosphärische Störungen und „Industriestörungen“, hervorgerufen durch elektrische Funken an Schaltern, Motoren usw., sind gering.

Vor allem lassen sich Radiowellen des Höchsthfrequenzbereichs verhältnismäßig einfach zu einem Funkstrahl – ähnlich dem Licht eines Scheinwerfers – bündeln. Man kann Funk*linien* aufbauen, die diesen Namen wirklich verdienen, weil Sender und Empfänger nur durch einen Funkstrahl miteinander verbunden sind und der Sender nicht nach allen Seiten Energie ausstrahlt, obgleich er nur *eine* Gegenstelle erreichen soll; man kann wie mit einem Scheinwerfer nach „Zielen“ suchen und nicht nur ihre Richtung, sondern auch ihre Entfernung feststellen.

Um 1930 begann man, sich intensiv mit dem Höchsthfrequenzbereich zu befassen. Bald erlebte man unangenehme Überraschungen: Geräte arbeiteten mit schlechtem Wirkungsgrad, unstabil oder überhaupt nicht; Verstärker- und Senderöhren versagten.

Nennen wir einige der Gründe: Die Verluste in Bauelementen und Isoliermaterialien nehmen mit sinkender Wellenlänge zu. Verbindungsleitungen zwischen Bauelementen, deren Länge im Höchsthfrequenzbereich häufig in die Nähe der Wellenlänge kommt, strahlen unerwünscht Energie aus oder „verschlucken“ sie. Bei niedrigeren Frequenzen kann man die winzige Zeitspanne, die Elektronen in

Röhren von einer Elektrode bis zur nächsten benötigen, vernachlässigen, im Höchsthfrequenzbereich nicht mehr: Während ein Elektron unterwegs ist, ändern sich die Höchsthfrequenzspannungen an den Elektroden so, daß der ganze Steuervorgang außer Tritt gerät.

Diese Schwierigkeiten mußten beseitigt werden, bevor die Höchsthfrequenztechnik Bedeutung erlangen konnte. Spezialantennen und -leitungen für die Verbindung Antenne – Sender bzw. – Empfänger waren nötig (das weiß heute jeder Fernseheteilnehmer und UKW-Hörer): *Koaxialkabel*, bestehend aus einem rohrförmigen Außenleiter und einem in seiner Achse verlaufenden Innenleiter, *Bandleitungen*, bestehend aus zwei durch Isoliermaterial in gleichem Abstand gehaltenen Leitern, für Zentimeterwellen *Hohlleiter*, leitende Rohre mit rundem oder rechteckigem Querschnitt, in denen sich extrem kurze Wellen nahezu verlustfrei fort-leiten lassen.

An die Stelle der Schwingungskreise aus Spule und Kondensator traten Spezialausführungen, zum Beispiel Stücke einer Doppelleitung oder eines Koaxialkabels von einer der Frequenz entsprechenden Länge, ferner *Topfkreise* und *Hohlraumresonatoren* für Zentimeterwellen, metallische Hohlkörper, in denen Höchsthfrequenzschwingungen nahezu verlustfrei „eingesperrt“ bleiben und nur über „Kopplungsschleifen“ abgenommen oder zugeführt werden können.

Zur Verkürzung der Elektronenlaufzeit näherte man die diesmal flach ausgeführten Elektroden der Röhren ein-ander soweit wie nur möglich. Das Ergebnis war die in Dezimeterwellengeräten verbreitete *Scheibentriode* (Bild 23). Für Wellenlängen von wenigen Zentimetern und zur Erzeugung großer Leistungen ist jedoch auch sie nicht geeignet.

Wenn, so überlegten Wissenschaftler und Techniker, die Elektronenlaufzeit nicht zu umgehen ist, muß man umge-

62

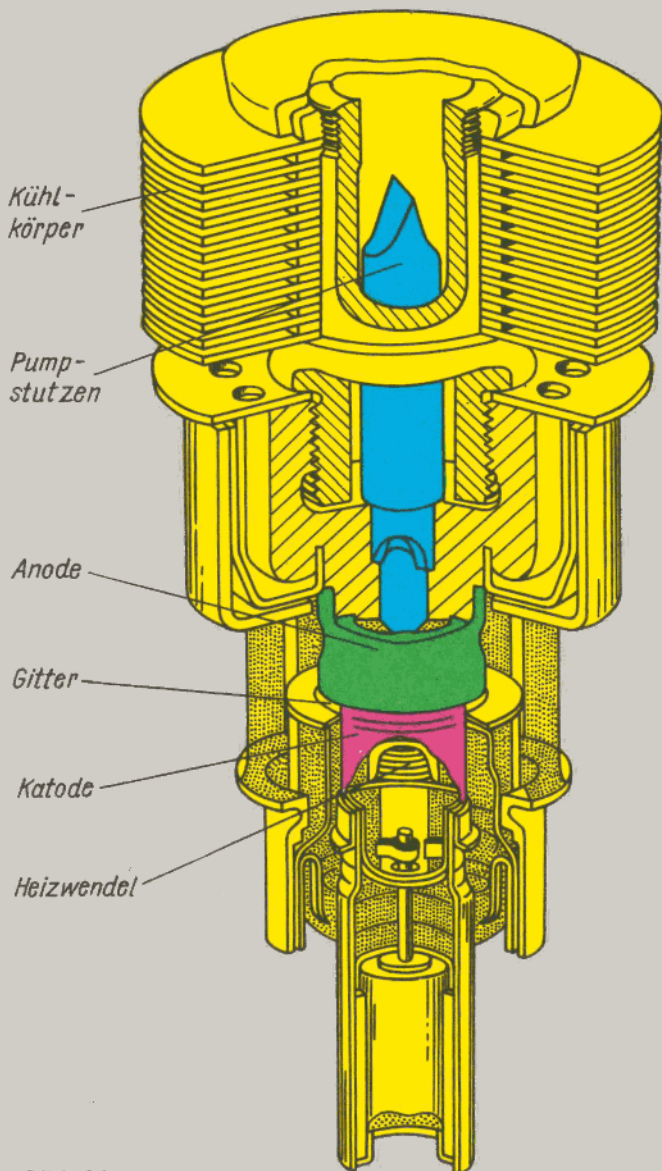


Bild 23

kehrt versuchen, sie auszunutzen. Dieser Gedanke führte zur Entwicklung der *Laufzeitröhren*. Sie sind bis in den Millimeterwellenbereich anwendbar; mit manchen Typen erreicht man Sendeleistungen von mehreren Tausenden Kilowatt.

Das *Magnetron* (Bild 24), besonders durch die Radartechnik bekannt geworden, ähnelt äußerlich eher einem Produkt des Maschinenbaus als der Elektronik. Sein gewichtigster Bestandteil ist der massive Anodenblock. Er enthält eine zentrale Bohrung, in deren Achse eine Katode Elektronen emittiert, außerdem, strahlenförmig verteilt, Hohlraumresonatoren, die durch Schlitze mit der zentralen Bohrung in Verbindung stehen. Der Anodenblock ist an den Stirnflächen hermetisch abgeschlossen, luftleer gepumpt und wird zwischen den Polen eines Magneten angeordnet.

Die zur Anode fliegenden Elektronen werden durch den Magneten abgelenkt und, schleifenförmige Bahnen durchlaufend, zu einer mit rasender Geschwindigkeit umlaufenden Wirbelbewegung gezwungen. Dadurch werden in den Hohlraumresonatoren Höchstfrequenzschwingungen erregt, die über die Kopplungsschleife abgenommen und einer Sendeantenne zugeführt werden können.

Weitere wichtige Laufzeitröhren sind das *Klystron*, in dem eine Elektronenströmung so gesteuert wird, daß sich in der Strömung „Elektronenpäckchen“, Stellen hoher Elektrendichte, bilden, die in Hohlraumresonatoren Schwingungen erzeugen oder verstärken können, und die *Wanderfeldröhre*, in der Verstärkung und Schwingungserzeugung durch eine Wechselwirkung zwischen einem Elektronenstrahl und dem längs einer Verzögerungsleitung wandernden Signal zustande kommen.

Auch die Halbleitertechnik dringt in den Höchstfrequenzbereich vor, und zwar nicht nur mit den von niedrigeren Frequenzen bekannten, sondern auch durch neuartige

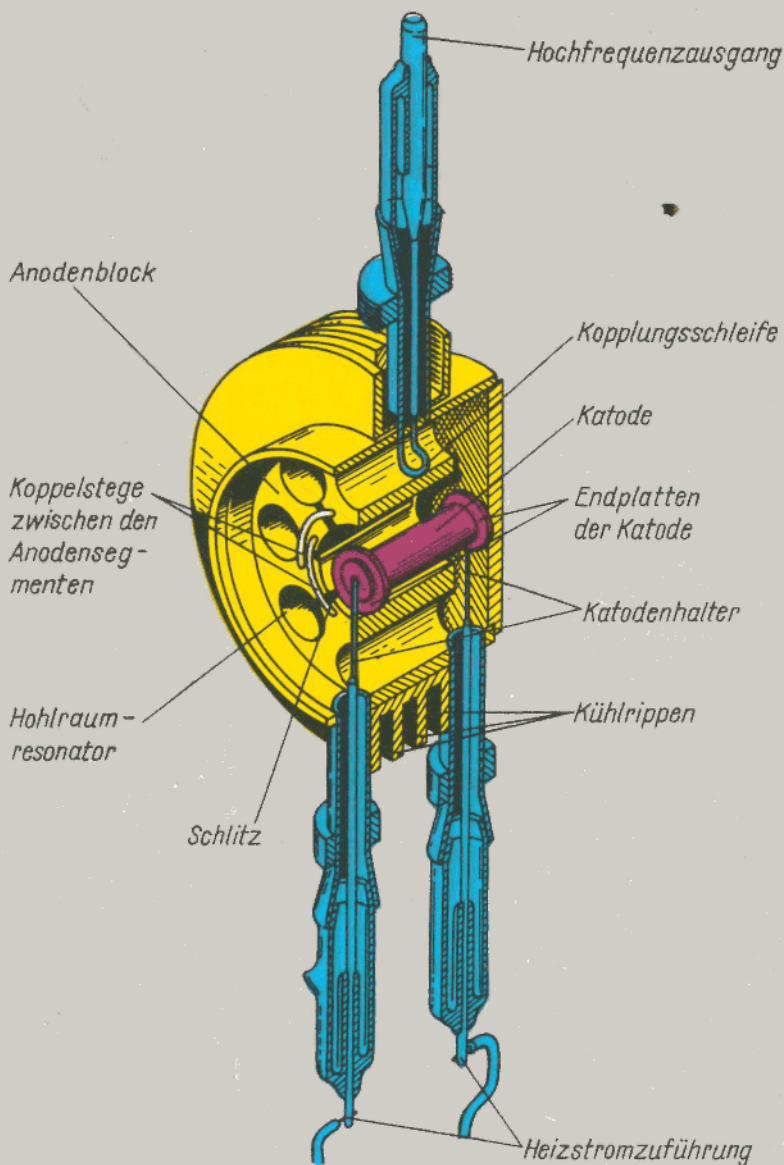


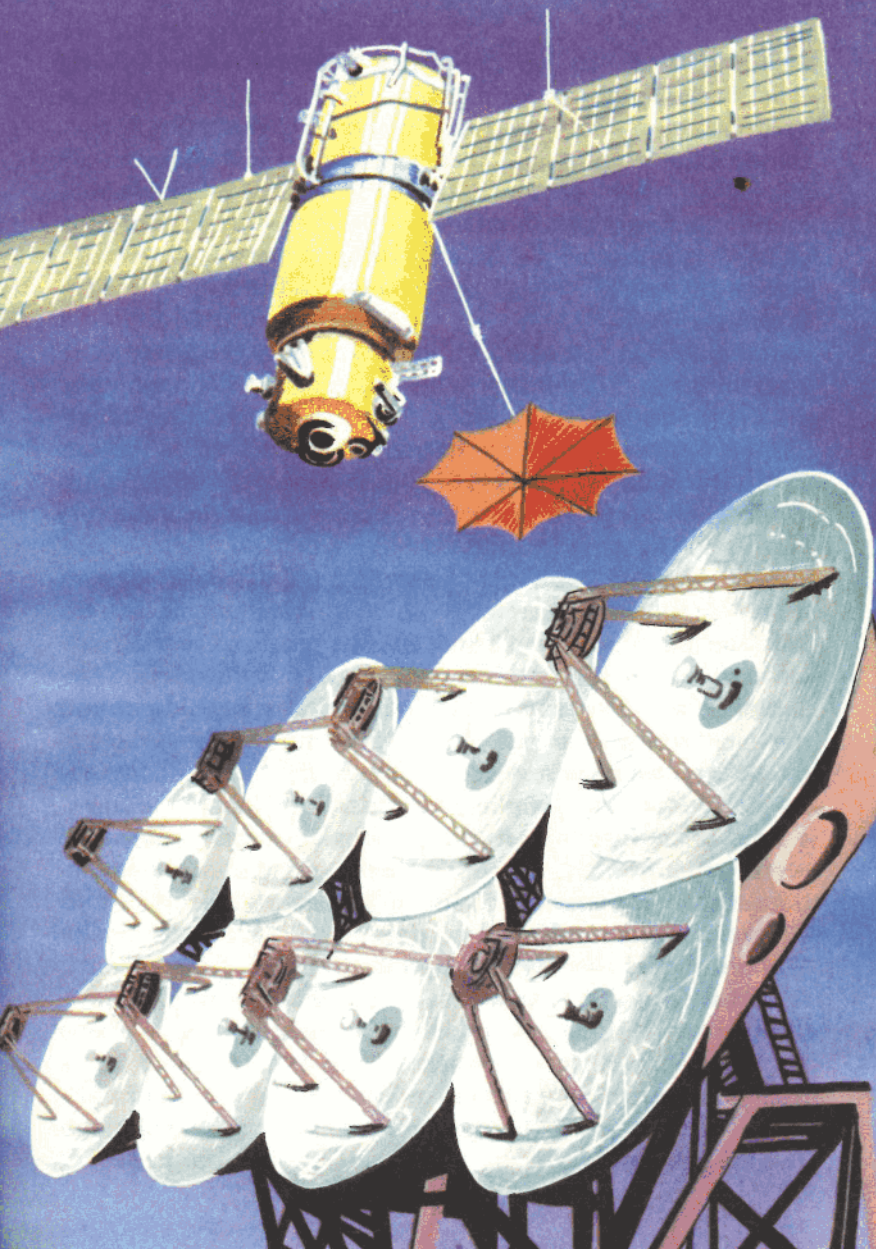
Bild 24

Bauelemente. Die *Tunnel diode* zum Beispiel erzeugt noch Millimeterwellen und wird ebenso zur Höchsthörfrequenzverstärkung genutzt wie der *parametrische Verstärker*, dessen wichtigstes Bauelement gleichfalls eine Halbleiterdiode ist.

Oft lesen wir vom *Maser*, häufiger noch vom *Laser*. Maser ist eine Abkürzung für „*microwave amplification by stimulated emission of radiation*“ – Mikrowellenverstärkung durch angeregte Strahlungsemission, Laser für „*light amplification by stimulated emission of radiation*“ – Lichtverstärkung durch angeregte Strahlungsemission.

Wir können die Arbeitsweise von Maser und Laser nur andeuten: Ein Atomkern wird normalerweise von Elektronen auf bestimmten Bahnen umkreist. Ein Elektron kann auf eine weiter vom Kern entfernte Bahn „gehoben“ werden, indem dem Atom Energie zugeführt wird. Dort bleibt das Elektron aber nur für kurze Zeit. Es fällt auf seine Ausgangsbahn (oder eine andere) zurück und strahlt dabei elektromagnetische Wellen aus. Ihre Frequenz ist durch die Gesetze der Atomphysik bestimmt und kann im Bereich des Lichts oder im Höchsthörfrequenzbereich liegen. Jedes strahlende Atom ist also unter bestimmten Bedingungen ein „Mikrosender“; doch sind diese Mikrosender zunächst nicht technisch nutzbar, da sie völlig unregelmäßig strahlen.

Der „Trick“ bei Maser und Laser besteht nun darin, alle Atome im gleichen Augenblick zur Strahlung zu zwingen. Durch Energiezufuhr werden Elektronen der Atome bestimmter Materialien auf kernfernere Bahnen „gepumpt“. Anschließend wird den Elektronen ein „Stoß“ versetzt, der sie gleichzeitig auf ihre alten Bahnen zurückspringen läßt. Sie strahlen dabei einen Energiebetrag aus, der die den Stoß auslösende Energie um ein Vielfaches übertrifft. Das aber ist eine Verstärkerwirkung. Benutzt man nämlich zum Anstoß ein Höchsthörfrequenzsignal sehr geringer



Leistung, tritt am Ausgang des Maser eine verstärkte Hochfrequenzleistung auf. Maser sind kompliziert gebaut und nur auf bestimmten Frequenzen zu gebrauchen, übertreffen aber zum Beispiel an Empfindlichkeit Röhrenverstärker weit. Sie werden dort eingesetzt, wo es auf größte Empfindlichkeit ankommt. Wir finden sie in Bodenfunkstellen kosmischer Funkverbindungen, in Anlagen der Radioastronomie und in besonders „hellhörigen“ Radarstationen.

Laserlicht findet vielseitige Verwendung in der Technologie, Medizin, Forschung, Vermessungstechnik usw. Für die Nachrichtentechnik ist wichtig, daß sich über *einen* Laserstrahl sehr viele Nachrichten – zum Beispiel Millionen Ferngespräche – gleichzeitig fortleiten ließen. Es gibt, wenn auch vorerst versuchsweise, Laser-Nachrichtenverbindungen; allerdings muß man sich im Bereich der Atmosphäre damit abfinden, daß Laserlicht „eben Licht“ ist und durch Staub, Dunst, Nebel usw. geschwächt wird. So wird der Laser wohl vor allem für kosmische Nachrichtenverbindungen Bedeutung erlangen. Der Reflektor für Laserlicht, den das sowjetische Mondfahrzeug Lunochod mit sich führte, die auf dem Mond aufgestellten Laserreflektoren beweisen, daß Wissenschaftler und Techniker bereits von dieser Möglichkeit Gebrauch machen.

Türme oder Gittermasten mit schüsselförmigen Antennen, meist an erhöhten Geländepunkten unseres Landes errichtet, haben wir wahrscheinlich alle schon gesehen, und sicherlich wissen wir auch, daß es sich um technische Einrichtungen von *Richtfunkstrecken* handelt.

Richtfunkstrecken zählen zu den wichtigsten Anwendungen der Höchstfrequenztechnik. Sie arbeiten meistens im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 GHz und übertragen auf einem von Station zu Station gerichteten Funkstrahl zum Beispiel Fernsehprogramme oder zahlreiche Telefongespräche.

Eine Richtfunkverbindung zwischen zwei Stationen ist nur möglich, wenn beide sich – wenigstens theoretisch – „sehen“ können; daher beträgt die Entfernung zwischen ihnen selten mehr als 50 km, und man bringt ihre Antennen, wie die von Fernseh- und UKW-Sendern, möglichst hoch an, etwa auf Bergen, Türmen usw.

Entfernungen von Hunderten oder gar Tausenden Kilometern sind nicht mit zwei Stationen zu überbrücken. Man schaltet dann *Relaisstationen* ein, die die Signale der vorhergehenden Station empfangen und zur nächsten weitergeben.

Richtfunkstrecken (Bild 25) bestehen demnach meistens aus zwei Endstellen und mehreren (mitunter über 100) Relaisstationen. Da sie im allgemeinen in beiden Richtungen betrieben werden, benötigt man an jeder Endstelle einen Sender und einen Empfänger, in jeder Relaisstation zwei Sender und zwei Empfänger.

In den Endstellen modulieren die „abgehenden“ Signale, zum Beispiel Ferngespräche aus dem Drahtnachrichtennetz, den Sender. Die „ankommenden“ Signale werden im Empfänger demoduliert und auf dem Drahtwege weitergeleitet.

In den Relaisstationen werden die Signale – selbstverständlich für jede Richtung getrennt – empfangen, verstärkt und sofort wieder ausgestrahlt. Da Relaisstationen meistens selbsttätig und unbemannt arbeiten, der Ausfall einer Relaisstation, ja einer einzigen Baustufe aber die gesamte Richtfunkstrecke lahmlegt, müssen zahlreiche Kontroll-, Überwachungs- und Reserveeinrichtungen vorhanden sein. Die technische Ausstattung einer Richtfunkstrecke ist daher sehr teuer, macht sich aber durch die hohe Leistungsfähigkeit rasch bezahlt.

Richtfunkstrecken, über die fast 2000 Ferngespräche gleichzeitig geführt werden können, sind weit verbreitet, Anlagen für 2700 Gespräche in Betrieb. Unentbehrlich

sind sie auch für die Weiterleitung von Fernseh- und Rundfunkprogrammen, deren Übertragung vom Studio zu den Sendern sonst nur über sehr teure Spezialkabel möglich wäre.

Der zunehmende Nachrichtenverkehr wird den Übergang zu noch höheren Frequenzen, etwa im Millimeterwellenbereich, erzwingen. Weil Millimeterwellen beim Durchgang durch die Atmosphäre erheblich geschwächt werden, untersucht man zur Zeit die Möglichkeit, Millimeterwellen-Nachrichtenverbindungen mit Hilfe von Hohlrohrleitungen aufzubauen. Fast 100 000 Ferngespräche könnten gleichzeitig über eine solche Verbindung laufen.

Für den Nachrichtenverkehr zwischen Kontinenten und Ländern, die durch lange Wasserstrecken getrennt sind, scheiden Richtfunkstrecken aus. Zwar wurden Pläne erörtert, sie auch im transozeanischen Nachrichtenverkehr zu nutzen – man zog zum Beispiel die Möglichkeit in Erwägung, Flugzeuge oder eine Kette von Schiffen als Relaisstationen einzusetzen –, aber keines dieser Projekte wurde ernsthaft in Angriff genommen.

Die Funkzeichen von Sputnik 1, mit dem die Sowjetunion das Zeitalter der Raumfahrt eröffnete, bewiesen, daß Funkverbindungen mit Gegenstellen im erdnahen Weltraum (und, wie wir inzwischen wissen, noch bis weit in das Planetensystem) stabil arbeiten. Damit konnte man einen Gedanken aufgreifen, den Wissenschaftler schon Jahre zuvor ausgesprochen hatten: Es sollte möglich sein, *Nachrichtensatelliten* als Relaisstationen für Höchsthäufigkeitsverbindungen im Weltraum zu stationieren und so die geringe Reichweite sehr kurzer Wellen an der Erdoberfläche zu umgehen.

Den Anfang machten *passive* Nachrichtensatelliten, keine Relaisstationen im eigentlichen Sinne, sondern Spiegel, die von der Erde kommende Funkwellen zur Erdoberfläche reflektierten. Es waren Ballone von 30 m und mehr

Durchmesser. Sie wurden auf eine Erdumlaufbahn in einer Höhe von mehreren hundert Kilometern gebracht und füllten sich dort selbsttätig. Ihre Außenseite, mit hauchdünner Metallfolie belegt, wirkte als Reflektor.

Eine sehr einfache Lösung, brauchte doch der Satellit keinerlei elektronische Bordausrüstung. Dafür blieb seine Wirkung sehr bescheiden; denn die Wellen wurden nach allen Seiten reflektiert, nur ein winziger Bruchteil gelangte in Richtung der Empfangsantenne zur Erdoberfläche zurück. Die uns heute selbstverständliche Qualität von Satellitenübertragungen war mit passiven Nachrichtensatelliten nicht zu erreichen. Dazu bedurfte es *aktiver* Nachrichtensatelliten, die mit Bordempfängern und -sendern die Signale auffingen, verstärkten und gerichtet wieder zur Erde schickten.

Die ersten aktiven Nachrichtensatelliten, Anfang der sechziger Jahre gestartet, bewegten sich auf Umlaufbahnen einige hundert Kilometer über der Erdoberfläche. Eine Verbindung zwischen zwei Punkten war nur möglich, solange der Nachrichtensatellit für beide über dem Horizont stand. Weil sich seine Stellung ständig veränderte, mußten ihm die Antennen der Bodenstationen nachgeführt werden. Das geschah mit Hilfe eines Funkpeilsystems, dessen Meßwerte die Antennen der Bodenstationen selbsttätig steuerten. „Ging ein Satellit unter“, tauchte er unter den Horizont, mußte (für eine ununterbrochene Nachrichtenverbindung) die Übertragung von einem folgenden Nachrichtensatelliten übernommen werden, dann von einem weiteren usf. – ein recht kompliziertes Verfahren.

Einfachere Lösungen waren theoretisch bekannt, noch ehe Sputnik 1 die Erde umkreiste: Ein Satellit, der sich in einer kreisförmigen Umlaufbahn über dem Äquator und 35800 km über der Erdoberfläche bewegt, scheint für einen Beobachter auf der Erde stillzustehen – er geht weder auf noch unter und „übersieht“ ein riesiges Gebiet.

Man nennt solche Satelliten *synchrone* Nachrichtensatelliten. Rechnungen ergaben, daß drei von ihnen mit einem Abstand von 120° die Erdoberfläche mit Ausnahme der Polargebiete versorgen und Nachrichten austauschen können (Bild 26).

1965 schaltete man erstmalig einen synchronen Nachrichtensatelliten in den Fernmeldeverkehr ein. Heute stehen seine Nachfolger über dem Atlantik, dem Pazifik und dem Indischen Ozean. Sie können gleichzeitig Hunderte Ferngespräche, ein Fernsehprogramm oder eine entsprechende Zahl anderer Signale zwischen Bodenstationen in mehreren Kontinenten übermitteln. Zur Bordausrüstung zählen unter anderem mehrere tausend Halbleiterbauelemente, Antennen, die selbsttätig zu den Bodenstationen gerichtet werden, sowie Steurdüsen zur Korrektur kleiner Bahnabweichungen. Die Energieversorgung erfolgt durch Sonnenbatterien. Synchrone Nachrichtensatelliten der kommenden Jahre werden Tausende Gespräche übertragen und gleichzeitig zur Wetterbeobachtung und für wissenschaftliche Meßzwecke eingesetzt werden.

Die Sowjetunion verwendet keine synchronen Nachrichtensatelliten, da ihr Territorium weit nördlich vom Äquator liegt. Das sowjetische Nachrichtensatellitensystem *Orbita* ist anders angelegt. Seine Nachrichtensatelliten vom Typ *Molnija 1*, deren erster 1965 den Betrieb aufnahm, beschreiben langgestreckte Ellipsen um die Erde, die so gewählt wurden, daß ein Molnija-Satellit während seiner etwa 12stündigen Umlaufzeit für 8 bis 9 Stunden zur Nachrichtenübermittlung genutzt werden kann.

Die Bodenstationen sind einheitlich ausgeführt und verteilen sich über das Gebiet der Sowjetunion. Telefongespräche, Fernschreiben und vor allem Fernsehprogramme werden übertragen. So wird es möglich, das zentrale Moskauer Fernsehprogramm – über das Orbitasystem weitergeleitet und von örtlichen Fernsehsendern verbreit-

Endstelle

Relaisstation

Endstelle

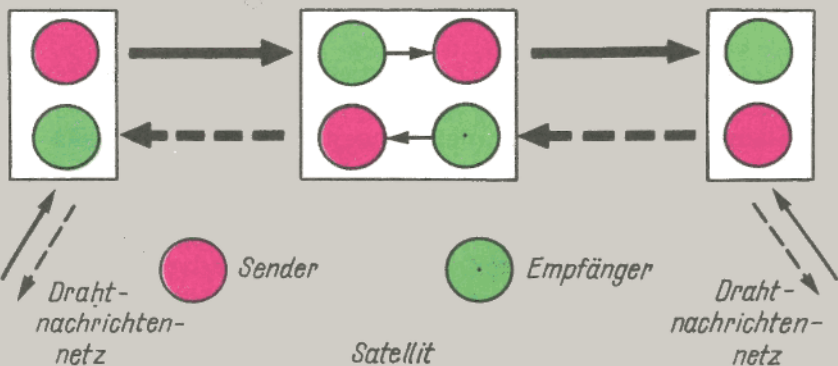


Bild 25

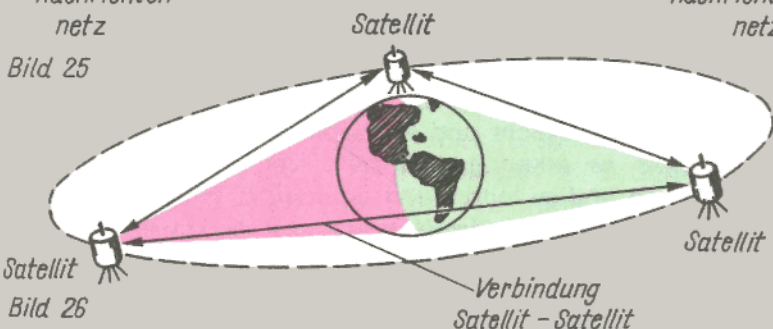


Bild 26

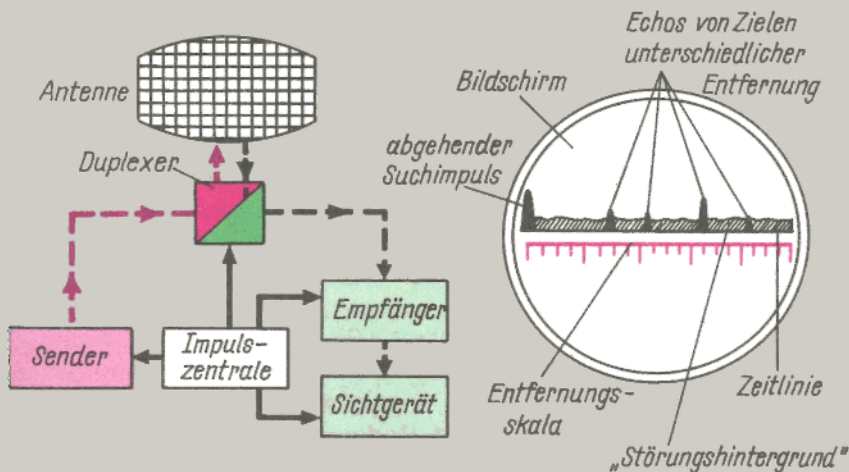


Bild 27

Bild 28

tet – auch in den entferntesten Gebieten der Sowjetunion zu empfangen.

Sicherlich wird es eines Tages auch Nachrichtensatelliten geben, deren Fernsehsendungen wir unmittelbar mit dem Heimempfänger aufnehmen können. Sowjetische Wissenschaftler und Techniker schätzen, daß dieses Ziel bereits in wenigen Jahren erreicht werden kann.

Radarantennen gehören zum Bild jedes Flughafens und jedes größeren Schiffs. Die Bezeichnung Radar, eine Abkürzung für „*radio detecting and ranging*“, läßt sich etwa als „Entdecken und Orten mit Radiowellen“ übersetzen (auch die Bezeichnung „Funkmeßtechnik“ ist bei uns üblich).

Die Aufgaben des Radar kennt jeder: In der Seefahrt ermöglicht es, bei Nacht und im Nebel andere Schiffe und Hindernisse zu erkennen; es hilft, den Flugverkehr zu kontrollieren und zu leiten, und unterstützt Piloten bei der Landung. Radargeräte der Nationalen Volksarmee schützen unseren Luftraum und unsere Küsten; sie machen es einem fremden Flugkörper unmöglich, sich unbemerkt zu nähern, und liefern Angaben für rasche und wirkungsvolle Abwehrmaßnahmen. Radaranlagen orten Raketen, Satelliten und Raumsonden. Damit helfen sie, Flugbahn und Zeitpunkte für Kurskorrekturen zu bestimmen, und erleichtern Kopplungs- und Landemanöver.

Wir können die Lage eines Körpers, eines Ortes usw. eindeutig angeben, wenn seine Richtung und Entfernung, bezogen auf unseren Standort, bekannt sind (wir sagen z. B.: Der Ort A liegt 12 km südlich von uns). Diese Größen mißt ein Radargerät für „Ziele“, die Radiowellen reflektieren.

Der Raum um das Radargerät (Bild 27) wird mit einem Funkstrahl abgesucht. Trifft er auf ein reflektierendes Hindernis, so gelangt ein winziger Bruchteil der reflektierten Wellen als Echo zum Radargerät zurück. Die Lauf-

zeit der Wellen für Hin- und Rückweg wird gemessen und ergibt die Entfernung des Ziels. Die Wellen werden dazu nicht ununterbrochen, sondern als kurze *Suchimpulse* mit dazwischenliegenden Pausen ausgestrahlt. Während der Pausen werden die schwachen, vom Ziel reflektierten *Echoimpulse* empfangen.

Die Richtung zum Ziel stimmt mit der Stellung der Antenne überein. Weit schwieriger ist die Messung der Laufzeit – eine Folge der großen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen. Bei einem 15 km entfernten Ziel zum Beispiel sind Such- und Echoimpulse insgesamt nur 0,0001 s unterwegs. Die Messung derart kurzer Zeitspannen ist nur mit den Hilfsmitteln der Elektronik möglich.

Die Suchimpulse werden im *Radarsender* meistens mit einem Magnetron erzeugt. Neben Radarsendern mit einer Leistung von wenigen zehn Kilowatt – z. B. Schiffsradargeräte – gibt es solche, deren Leistung viele Tausende Kilowatt beträgt (Radar zur Ortung kosmischer Flugkörper) und die damit alle Rundfunk- und Fernsehsender weit in den Schatten stellen.

Der *Radarempfänger* nimmt die Echoimpulse auf. Er muß hochempfindlich sein; denn selbst bei großer Sendeleistung ist der von einem fernen Ziel zurückkehrende Echoimpuls sehr schwach. Sender und Empfänger sind auf die gleiche Frequenz abgestimmt.

Sende- und Empfangsrichtung stimmen überein. Deshalb werden Sende- und Empfangsantenne gemeinsam montiert und bewegt, oder es wird *eine* Antenne zum Senden und Empfangen benutzt. Eine elektronische Umschaltvorrichtung, der *Duplexer*, verbindet die Antenne für die Dauer der Suchimpulse mit dem Sender, während der dazwischenliegenden Pausen mit dem Empfänger.

Die Antennen haben, je nach der Aufgabe des Radargerätes, verschiedene Formen und Abmessungen. Neben Antennen mit einer Fläche von Hunderten Quadratmetern

gibt es solche, deren Fläche 1 m^2 nicht oder nur wenig überschreitet. Die Antennenform lehnt sich häufig an den Hohlspiegel an, wie wir ihn von Scheinwerfern kennen. Im Brennpunkt eines solchen „Paraboloids“ endet ein Hohlleiter. Beim Senden strahlt er Höchstfrequenzenergie auf die Antennenfläche, von wo aus sie gebündelt in den Raum geht; beim Empfang nimmt er die an der Antennenfläche empfangene und im Brennpunkt konzentrierte Energie auf. Wählt man Ausschnitte eines Paraboloids, kann der Strahl in bestimmten Richtungen besonders straff, in anderen weniger gebündelt werden (bei Schiffsradargeräten z. B. interessiert nur der Seitenwinkel, nicht aber der Höhenwinkel eines Ziels).

Die Meßergebnisse werden im *Sichtgerät* angezeigt. Auf dem Schirm einer Elektronenstrahlröhre wird ein waagerechter leuchtender Strich, die sogenannte Zeitlinie, geschrieben (Bild 28). Der Schreibvorgang beginnt, sobald ein Suchimpuls die Antenne verläßt. Der Elektronenstrahl springt vom Zeilenende an den Zeilenanfang zurück, wiederholt den Schreibvorgang beim nächsten Suchimpuls usw. Jeder Echoimpuls wird im Empfänger verstärkt und dem Sichtgerät so zugeführt, daß er den Elektronenstrahl senkrecht zur Schreibrichtung ablenkt. In der Zeitlinie entsteht eine zackenförmige Ausbuchtung. Ihr Abstand vom Zeilenanfang ist ein Maß für die Entfernung des Ziels. Ist dieses nahe, trifft das Echo bereits nach so kurzer Zeit wieder beim Radargerät ein, daß der schreibende Elektronenstrahl noch nicht weit vom Zeilenbeginn entfernt ist. Echos entfernter Ziele kommen später an, der Zacken entsteht in größerem Abstand vom Zeilenanfang. Bringt man eine Entfernungsskale am Bildschirm an, kann die Zielentfernung abgelesen werden.

Alle Vorgänge im Radargerät, Auslösen der Sendeimpulse, Umschalten der Antenne, Schreiben der Zeitlinie, Rückführen des Elektronenstrahls an den Zeilenanfang und



andere, müssen mit größter Genauigkeit synchron erfolgen. Daher werden die Baugruppen eines Radargerätes von einer gemeinsamen *Impulszentrale* gesteuert. So, wie ein Fernsehsender durch Synchronisierimpulse sämtliche Empfänger in den richtigen Arbeitsrhythmus zwingt, kontrolliert die Impulszentrale den Arbeitstakt von Sender, Duplexer, Empfänger und Sichtgerät durch entsprechende Impulse. Die Zielrichtung ergibt sich aus der Antennenstellung und kann an einer Gradskale abgelesen werden. Der Bildschirm kann auch durch eine Ziffernanzeige ersetzt werden. Allerdings werden derartige Anlagen nur für militärische Zwecke und zur Verfolgung kosmischer Flugkörper verwendet. In der Schifffahrt und im Luftverkehr finden wir sie noch nicht.

Der Wachoffizier auf der Kommandobrücke eines Schiffes und der Radarbeobachter auf einem Flughafen dürfen sich nicht auf die Beobachtung *eines* Ziels beschränken. Sie müssen gleichzeitig Ziele in allen Richtungen verfolgen können, um Gefahren auszuweichen oder den Flugverkehr leiten zu können.

Dies leistet das *Rundsicht-* oder *Panoramagerät*, das an der unablässig kreisenden Antenne zu erkennen ist. Jedes innerhalb der Reichweite des Gerätes befindliche Ziel wird beim Umlaufen der Antenne einmal von Suchimpulsen getroffen und reflektiert Echoimpulse.

Die Sende- und Empfangsrichtung müssen auf den Bildschirm einer Elektronenstrahlröhre übertragen werden. Das wird erreicht, indem man die Zeitlinie nicht mehr vom Schirmrand, sondern vom Schirmmittelpunkt ausgehen und wie einen Uhrzeiger synchron mit der Antennendrehung umlaufen läßt. Strahlt die Antenne nach Norden, trifft der elektronische Zeiger eine Nordmarkierung, strahlt sie nach Osten, steht der Zeiger vor der Ostmarke usw. Eine Gradskala am Rande des Bildschirms ermöglicht abzulesen, in welcher Richtung die Antenne strahlt.

Das Prinzip der Entfernungsmessung bleibt, nur einen Unterschied gibt es: Man verzichtet auf einen „Zacken“ und hellt statt dessen an der entsprechenden Stelle ein kurzes Stückchen des elektronischen Zeigers auf. Das Ziel zeichnet sich durch einen Leuchtfleck ab, dessen Richtung durch die Stellung der umlaufenden Zeitlinie und dessen Entfernung durch den Abstand des Flecks vom Schirmmittelpunkt gegeben ist.

Da sich die Antenne ständig weiterdreht, setzen die Echoimpulse sehr schnell wieder aus. Deshalb wählt man für den Leuchtstoff des Bildschirms Material, das längere Zeit nachleuchtet. Dann bleibt der Leuchtfleck sichtbar, bis er nach einer vollständigen Antennenumdrehung durch neue Echoimpulse wieder aufgehellt wird. Der Beobachter am Rundsichtradargerät sieht also alle Radarziele „rundherum“ nach Richtung und Entfernung, er selbst „steht“ im Schirmmittelpunkt.

Die Auswertung eines Schirmbildes, das nur leuchtende Fleckchen und den umlaufenden Zeiger wiedergäbe, wäre nicht einfach. Deshalb wurden zahlreiche Hilfsmittel erdacht, die die Arbeit am Radargerät und ein rasches Auswerten des Schirmbildes erleichtern (Bild 29).

Bei Schiffsradargeräten gibt ein elektronisch in das Schirmbild eingeblendeter Strich, die „Vorausanzeige“, die augenblickliche Fahrtrichtung an, während ein Peilstrich gedreht werden kann, bis er den Leuchtfleck eines besonders interessierenden Ziels schneidet. Am Schirmrand kann die zugehörige Gradzahl abgelesen werden.

Die Entfernungsbestimmung wird durch umschaltbare Entfernungsmeßbereiche und dadurch vereinfacht, daß im Schirmbild Kreise erscheinen, die bestimmten Entfernungen entsprechen. Außerdem gibt es einen „beweglichen Meßkreis“: Wird sein Einstellknopf betätigt, erscheint ein leuchtender Kreis, dessen Radius sich stetig ändern läßt. Man weitet ihn aus, bis er den Leuchtfleck

des interessierenden Ziels schneidet, und liest an einem mitlaufenden Zählwerk die Entfernung ab.

Bei Radargeräten für die Beobachtung des Luftraums, die meistens auf dem Festland stehen, stören „Festzeichen-echos“, d. h. Echos, die von hohen Gebäuden, Schornsteinen, Bergen usw. hervorgerufen werden. Es wurden elektronische Verfahren zur „Festzeichenunterdrückung“ entwickelt, die nur bewegliche Ziele auf dem Bildschirm erscheinen lassen. Die vorgeschriebenen Luftstraßen werden auf dem Radarschirm markiert, ebenso Gefahrenstellen.

Das sogenannte *Präzisionsanflug-Radar* beobachtet bei schlechten Sichtbedingungen landende Flugzeuge gewissermaßen „von der Seite“ und „aus der Vogelschau“. Die Radarlotsen vor den Bildschirmen geben dem Piloten über Sprechfunk alle nötigen Anweisungen für die Landung.

Um deutliche Echoimpulse zu erhalten, bringt man in der See- und Luftfahrt an wichtigen Objekten *Radar-Reflektoren* an, Metallgebilde – oft aus Drahtgeflecht –, die so angeordnet werden, daß sie Suchimpulse besonders gut in die Herkunftsrichtung, also zum Radargerät, reflektieren. Wir begegnen ihnen an Hafeneinfahrten, Schleusen, Fahrwassertonnen, markanten Küstenpunkten usw. Auch Rettungsboote und -flöße führen aufklappbare Radarreflektoren mit sich.

In jüngster Zeit gewinnt das *Sekundär-Radar* an Bedeutung. Es registriert nur Ziele, die mit einem besonderen Gerät, *Transponder* genannt, jeden Suchimpuls beantworten. Die Antwort besteht aus einer Impulsgruppe, die – nach einem vereinbarten Code aufgebaut – bestimmte Informationen zum Sekundär-Radargerät übermittelt. Ein solches „Impulstelegramm“ läßt zum Beispiel bei militärischen Radaranlagen erkennen, ob ein eigener oder ein gegnerischer Flugkörper beobachtet wird. Im Luftverkehr

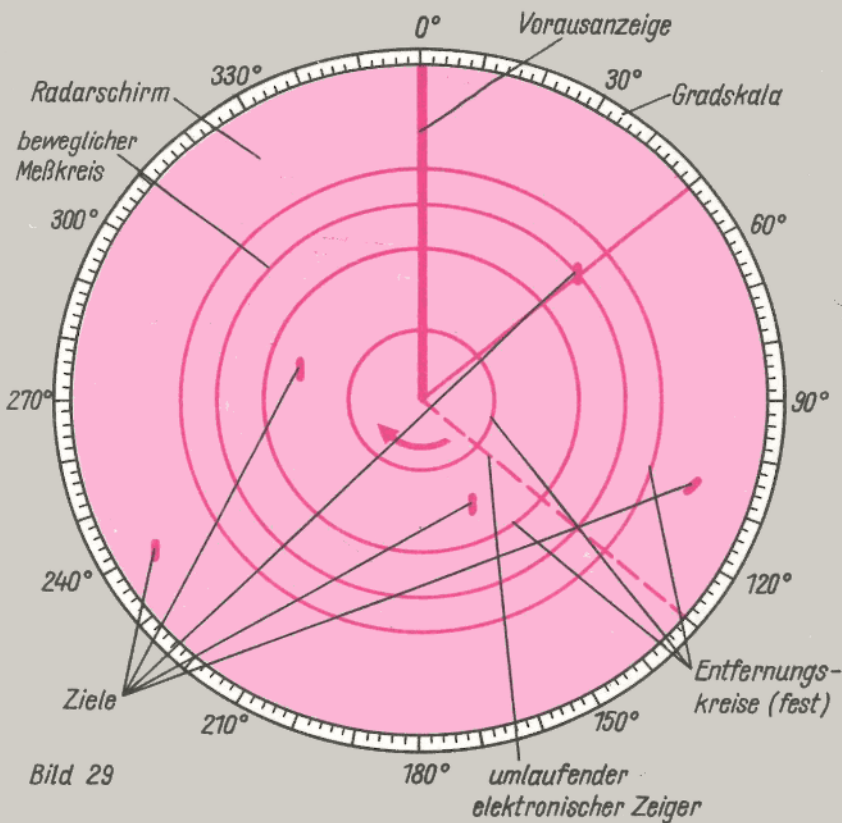


Bild 29

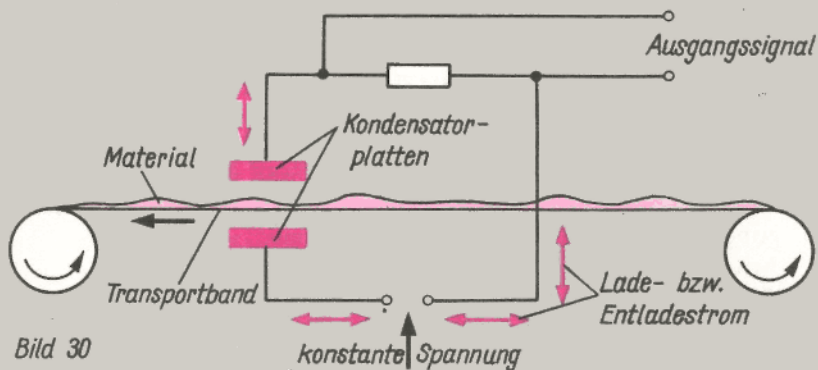


Bild 30

kann es Angaben über Flughöhe, Geschwindigkeit, Brennstoffvorrat usw. enthalten. Senden und Auswerten der Impulstelegramme erfolgen automatisch.

Das *Doppler-Navigationsradar* arbeitet mit ununterbrochen strahlendem Sender. Es beruht darauf, daß sich die Frequenz der reflektierten Wellen etwas verändert, wenn sich das Ziel gegenüber dem Radargerät bewegt. Aus der Frequenzänderung läßt sich die Geschwindigkeit des Ziels bestimmen.

Beim *Geschwindigkeits-Verkehrsradar* sind Kraftfahrzeuge die Ziele eines Doppler-Radars. Ihre Geschwindigkeit wird genau gemessen, wie schon mancher „Rennfahrer“ erleben mußte. Ein anderes Doppler-Radar hilft Flugzeugen, ihren Weg auch dort zu finden, wo es weder Funkfeuer noch DECCA, LORAN oder andere Navigationshilfen gibt, zum Beispiel bei den Flugrouten über die Polarregionen.

Noch werden die Angaben der Radargeräte meistens von Hand ausgewertet. Besonders auf dem Gebiet der Luftfahrt wird sich das bereits in naher Zukunft ändern. Der zunehmende Luftverkehr, die wachsenden Fluggeschwindigkeiten zwingen auch hier zur Automatisierung. Die ermüdende Beobachtung des Bildschirmes, der Funksprechverkehr zwischen Bord und Boden, bei dem das kleinste Mißverständnis zu einer Katastrophe führen kann, werden eingeschränkt und schrittweise abgeschafft werden. Das Radargerät wird seine Beobachtungsergebnisse einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage eingeben, die sie, ebenso wie die Impulstelegramme des Sekundär-Radars, auswertet. In Sekundenbruchteilen werden daraus Angaben, wie einzuhaltende Flughöhe, Kurs, Geschwindigkeit usw., abgeleitet und der Flugzeugbesatzung übermittelt. An Bord werden sie zum Beispiel als Anweisungen auf einer Kommandotafel erscheinen oder die nötigen Steuervorgänge selbsttätig auslösen.

Messen – groß geschrieben

Leitstand der Maschinenanlage eines modernen Schiffs, eines Kernkraftwerks, einer Produktionsanlage der chemischen Industrie: An den Wänden und auf Pulten leuchten die Skalen zahlreicher Meßinstrumente für Drücke, Temperaturen, Drehzahlen, Bunker- und Tankfüllungen, radioaktive Strahlung, Spannungen, Ströme, Leistungen und vieles andere. Drucker und Kurvenschreiber registrieren die gemessenen Werte, zusammen mit der Uhrzeit, in Zahlenkolonnen oder als mehrfarbige Linien. Die Meßstellen, an denen die Werte gewonnen wurden, sind über die ganze Anlage verteilt; sie liegen oft Hunderte Meter oder mehr von der Leitstelle entfernt; sie befinden sich aber auch an Stellen, wo der Mensch sich nicht aufhalten könnte – in Kesseln, im Inneren von Kernreaktoren, in Vulkankratern, unter Wasser.

Leuchtschirme von Elektronenstrahlröhren, Instrumentenskalen, Registriergeräte sind heute aus Krankenhäusern und Polikliniken nicht mehr wegzudenken. Sie kontrollieren während einer Operation Herzschlag, Atem, Blutdruck, Körpertemperatur und andere wichtige Größen und lassen auch den Frischoperierten nicht „aus den Augen“. Dem Arzt im Sprechzimmer helfen sie ebenso wie der Laborantin.

Zentrum für kosmische Funkverbindungen in der UdSSR: Hier werden Meßwerte abgelesen, registriert, ausgewertet, die oft in Tausenden, nicht selten in Millionen Kilometern Entfernung an Bord von Satelliten, Raumschiffen, Raumsonden gewonnen und über Funk zur Erde übertragen wurden.

An zahllosen anderen Stellen in der Produktionstechnik, im Verkehrs-, Transport- und Nachrichtenwesen sowie in der Forschung tauchen elektronische Meßverfahren und Einrichtungen gleichfalls immer öfter auf.

Die Produktionsprozesse werden komplizierter. Wo man vor einem guten Jahrhundert zwei oder drei Chemikalien nach Augenmaß und Erfahrung zusammenkippte und durcheinanderrührte, werden heute zahlreiche Ausgangsstoffe bei genauester Einhaltung der Mischungsverhältnisse, Drücke, Temperaturen und anderer Größen ohne direkten menschlichen Eingriff verarbeitet, kontrolliert und verpackt. Wo einst im Verkehrswesen Zeiten nach Tagen und allenfalls nach Stunden angegeben wurden, entscheiden heute – wie in der Luftfahrt – Sekunden oder – wie in der Raumfahrt – Sekundenbruchteile darüber, ob Menschen ihr Ziel sicher erreichen, ob ein Satellit seine Aufgaben erfüllen kann oder jahrelange Vorarbeiten vergeblich waren. Schnelle und genaue Messungen sind Voraussetzungen dafür, daß solche und viele andere Prozesse störungsfrei und mit dem erwünschten Resultat ablaufen.

Wo um die Jahrhundertwende einzelne Maschinen, jede für sich, produzierten, arbeiten heute hallenlange Taktstraßen oder komplizierte automatische Produktionsinstrumente. Der Mensch übt die Kontroll- und Wartungsfunktionen aus; dazu muß er jederzeit wissen, was an entscheidenden Punkten der Anlage vorgeht. Das aber heißt: Vornahme zahlreicher Messungen an *verschiedenen* Stellen, zusammenfassende Auswertung und Registrierung an *einem* Ort.

Die elektronische Meßtechnik kann diese Forderungen besonders gut erfüllen. Es gibt zum Beispiel kein mechanisches Zählwerk, das in der Sekunde bis 100 000 zählen könnte – für elektronische Meßeinrichtungen ist das eine Kleinigkeit. Elektronische Meßgeräte unterscheiden Zehntausende Farbtöne oder Helligkeitsabstufungen, messen Temperaturunterschiede von weniger als 0,001 °C und können die Dicke von Drähten, Folien, Fäden, Papierbahnen und anderen „endlosen“ Erzeugnissen auf Milli-

meterbruchteile bestimmen, ohne deren Laufgeschwindigkeit herabzusetzen oder sie zu berühren.

Vor allem eignen sich elektronische Verfahren gut für die Fernübertragung von Meßwerten, da wegen der hohen Übertragungsgeschwindigkeit (300 000 km/s) der Abstand zwischen Meßstelle und Anzeigeinstrument praktisch beliebig groß sein kann. Sind die beim Messen entstehenden Signale zu schwach oder erleiden sie unterwegs Verluste, kann man sie verstärken. Auch lassen sie sich leicht so umformen, daß sie als Eingangssignale für Steuerungs- und Regelungseinrichtungen dienen können.

Sosehr sich elektronische Meßverfahren im einzelnen auch unterscheiden, stets weisen sie drei Abschnitte auf:

Zunächst müssen elektrische Signale gewonnen werden, die den Änderungen der zu messenden Größe entsprechen. Da diese sehr oft nicht-elektrisch ist, sondern zum Beispiel ein Druck, eine Temperatur, eine Drehzahl usw. sein kann, braucht man an der Meßstelle einen *Meßwandler*, der aus den nicht-elektrischen Größen elektrische Signale ableitet. Sie sind zu übertragen und häufig zu verstärken, wobei die Übertragungsentfernung, je nach der Meßaufgabe, zwischen Zentimetern und Millionen Kilometern liegt. Am Ende der Übertragungsstrecke steuern die Signale – oft wiederum verstärkt oder umgeformt – Meßinstrumente, eine Registriereinrichtung usw.

Greifen wir aus Tausenden Möglichkeiten der elektronischen Meßtechnik einige Beispiele heraus.

Temperaturmessungen sind sehr häufig – vom Kühlschrank bis zum Kernkraftwerk, von der chemischen Industrie bis zur Temperatur eines Fixsterns, vom Lager einer Welle bis zu biologischen Vorgängen. Die zugehörigen Meßwandler nutzen meistens die Erscheinung, daß der elektrische Widerstand eines Leiters oder Halbleiters temperaturabhängig ist; ein hindurchfließender Strom ändert

sich mit der Temperatur. Die Stromänderungen steuern ein in Temperaturgraden geeichtes elektrisches Meßinstrument.

Neben dem in der Elektrotechnik verbreiteten Widerstandsthermometer kann als Meßwandler ein stäbchen-, scheibchen- oder perlenförmiges Halbleiterbauelement, ein *Heißleiter*, benutzt werden. Sein Name rührt daher, daß – im Gegensatz zu Metallen – der Widerstand von Halbleitern mit steigender Temperatur abnimmt, sie also in heißem Zustand besser leiten. Mit Heißleitern bestückte „Temperaturfühler“ lassen sich besonders klein (z. B. stecknadelkopfgroß) ausführen und daher, etwa für biologische und medizinische Untersuchungen, an Stellen anbringen, wo andere Temperaturfühler wegen ihrer Abmessungen ausscheiden.

Widerstandsthermometer und Heißleiter sind „passive“ Meßwandler; sie brauchen eine zusätzliche Spannungsquelle. „Aktive“ Meßwandler kommen ohne diese aus.

Für Temperaturmessungen sind sie als *Thermoelemente* vertreten, Kombinationen aus zwei Leiter- oder Halbleiterstückchen, die bei Erwärmung eine elektrische Spannung erzeugen.

Häufig müssen zahlreiche Temperaturen gleichzeitig überwacht und registriert werden. Da sich Temperaturen im allgemeinen verhältnismäßig langsam ändern, genügt es, sie in bestimmten Zeitabständen zu messen (auch ein Fieberthermometer bleibt nicht ständig eingelegt). Dadurch erübrigt es sich, jeder Meßstelle ein besonderes Instrument zuzuteilen.

Ein elektronischer *Meßstellenumschalter* verbindet taktweise die Meßstellen nacheinander mit der Anzeige- und Registriereinrichtung. Auf diese Weise lassen sich zum Beispiel auf *einem* Papierstreifen zahlreiche Temperaturwerte festhalten, ihr Zusammenhang ist jederzeit zu über-



sehen. Sobald ein Meßwert eine „gefährliche“ Grenze überschreitet, werden Alarmzeichen gegeben. Außerdem kann man die Meßwerte beliebiger Meßstellen nach Wunsch einzeln „abfragen“.

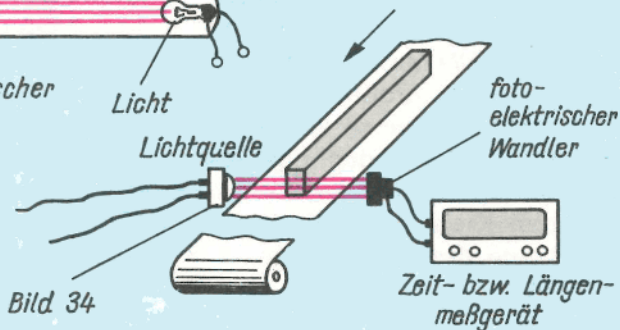
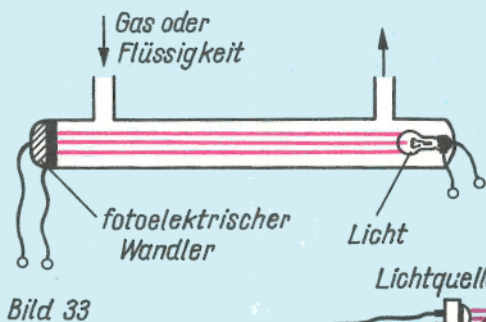
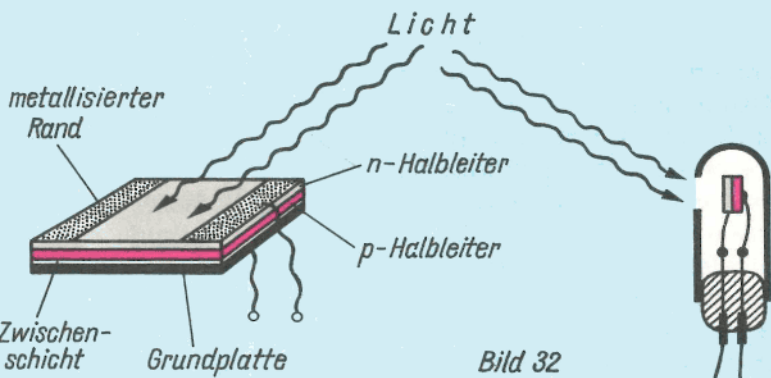
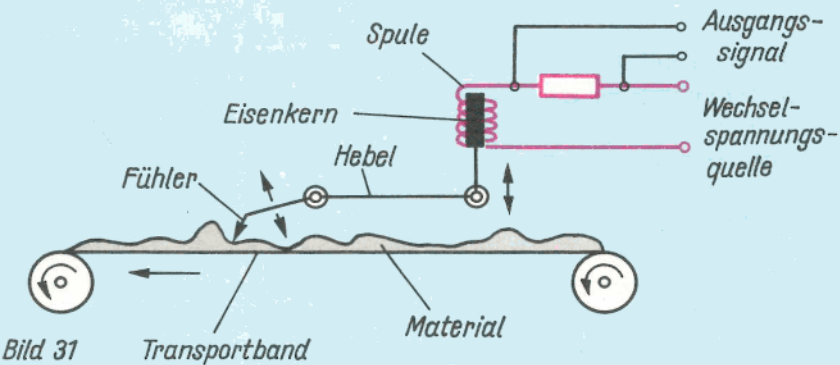
Papier, Textilien, Drähte und viele andere Erzeugnisse werden kontinuierlich produziert; ihre Dicke, Feuchte, Breite müssen ständig kontrolliert werden. Vor allem zwei Arten von Meßwandlern stehen hierfür zur Verfügung:

Kapazitive Meßwandler beruhen darauf, daß die elektrische Ladung, die ein Kondensator speichern kann, auch davon abhängt, ob und wie weit ein isolierender Stoff den Plattenzwischenraum ausfüllt. Bringen wir zwischen die Platten eines mit einer Spannungsquelle verbundenen Kondensators ein isolierendes Material, steigt das Speichervermögen, es fließt ein Ladestrom. Wird das isolierende Material wieder entfernt, fließt Entladestrom in umgekehrter Richtung.

Um die Dicke bandförmiger nichtleitender Materialien zu messen, läßt man sie zwischen entsprechend geformten Kondensatorplatten hindurchlaufen. Dickeänderungen ergeben entsprechende Lade- und Entladeströme, die eine Meßeinrichtung steuern können (Bild 30).

Induktive Meßwandler enthalten eine von einem Wechselstrom durchflossene Spule, in die ein Eisenkern in Abhängigkeit von der zu messenden Größe mehr oder weniger tief taucht. Der Wechselstromwiderstand der Spule hängt von der Eintauchtiefe ab. Man kann so zum Beispiel elektronische Waagen bauen oder die Dicke von Drähten, Blechen und Folien ständig bestimmen (Bild 31). Aber auch Wasserrohre, Kabel, sogar Leitungsunterbrechungen lassen sich auf diese Weise aufspüren – mit handlichen, transportablen Geräten, die wir bei Straßenbauarbeiten sicherlich schon beobachtet haben.

Ein elektrischer Belichtungsmesser gehört zur Ausrüstung jedes ernsthaften Fotoamateurs. Er ist oft in die



Kamera mit eingebaut und stellt die wohl bekannteste Anwendung einer *fotoelektrischen* Meßeinrichtung dar. Meßwandler, die Lichtänderungen in elektrische Signale umwandeln, sind in der Technik überaus weit verbreitet. Im Belichtungsmesser haben wir es mit einem aktiven Meßwandler auf Halbleiterbasis zu tun, einem *Fotoelement* (Bild 32). Es verwandelt Lichtenergie in elektrische Energie. Fotoelemente beruhen, gleich, ob Selen, Germanium, Silizium oder ein anderer Stoff als Grundmaterial dient, auf Vorgängen an einem pn-Übergang. Wird er von Licht getroffen, werden zahlreiche weitere Elektronen von ihren Atomen getrennt. Eine entsprechende Zahl von Löchern bleibt zurück. Durch die Ventilwirkung des pn-Übergangs sammeln sich Löcher auf der einen, Elektronen auf der anderen Seite. Zwischen p- und n-Gebiet entsteht eine elektrische Spannung. Sie ist $< 1\text{V}$, reicht aber völlig aus, einen Verstärker oder ein Meßinstrument zu steuern.

Fotoelemente, in diesem Falle auch Solarzellen genannt und zu *Sonnenbatterien* für die Stromversorgung von Raumflugkörpern zusammengeschaltet, haben Weltberühmtheit erlangt. Aber nicht nur Forschungs- und Nachrichtensatelliten werden auf diese Weise gespeist: Sonnenbatterien laden tagsüber die Akkumulatoren von Leuchtböjen, speisen Fernsehhilfsstationen und Fernsprechverstärker in einsamen Gegenden, Kofferempfänger und mitunter sogar Kühlschränke.

Ältester passiver fotoelektrischer Meßwandler ist die *Fotozelle*, eine Abart der Elektronenröhre-Diode. Sie enthält eine großflächige Katode, die beim Auftreffen von Licht Elektronen aussendet. Unter dem Einfluß der an der Anode liegenden positiven Spannung fliegen die Elektronen von der Katode zur Anode. Der im Anoden-Katoden-Kreis fließende schwache Strom ist von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes abhängig.

Drei weitere fotoelektrische Meßwandler hat die Halbleitertechnik beigesteuert: Der *Fotowiderstand*, ein Plättchen oder eine auf einen Träger aufgedampfte dünne Schicht aus Halbleitermaterial, ändert seinen Widerstand bei Lichteinfall. Die *Fotodiode* ähnelt in ihrer Wirkungsweise dem Fotoelement, ist aber viel kleiner (Größe etwa einer Linse oder eines Reiskorns) und reagiert auch auf schnellste Lichtschwankungen. Den *Fototransistor* können wir uns als Vereinigung von Fotodiode und Transistor vorstellen; er ist nicht nur Meßwandler, sondern gleichzeitig verstärkendes Bauelement und übertrifft die Fotodiode weit an Empfindlichkeit.

Mit fotoelektrischen Wandlern lassen sich verschiedenartigste Aufgaben aus dem Bereich der Meßtechnik lösen. Wir wollen uns mit drei Beispielen begnügen.

Um die Trübung einer Flüssigkeit, den Staub- oder Rauchgehalt eines Gases festzustellen, schickt man einen Lichtstrahl hindurch, dessen Schwächung von einem fotoelektrischen Wandler in Signale umgesetzt wird (Bild 33). Ebenso kann man die Trübung oder die Dicke durchsichtiger Festkörper ermitteln.

Zwei fotoelektrische Wandler arbeiten zusammen, um Farb- oder Helligkeitsunterschiede unabhängig vom rasch ermüdenden Auge festzustellen. Der eine spricht auf Licht an, das (bei durchsichtigen Stoffen) von einem Muster hindurchgelassen oder (bei undurchsichtigen Stoffen) reflektiert wird; der zweite kontrolliert den Prüfling. Die Ergebnisse werden in einer sogenannten Brückenschaltung verglichen und daraus Steuersignale für die Meßeinrichtung gebildet.

Bewegen sich Produkte auf einem Transportband, kann man ihre Länge bestimmen, indem man feststellt, wie lange sie einen Lichtstrahl unterbrechen (daß auch die Zeitmessung elektronisch erfolgt, versteht sich von selbst, wir kommen bald darauf zurück) (Bild 34). Werden zwei

Lichtstrahlen nacheinander unterbrochen und die Zeitdifferenz gemessen, erhält man bei bekanntem Abstand der Lichtstrahlen die Geschwindigkeit des bewegten Körpers. Das ist eine Methode, die auch bei Sportwettkämpfen angewandt wird.

Immer wieder muß in Wissenschaft und Technik gezählt werden: Teilchen radioaktiver Strahlung, Besucher von Ausstellungen und Messen, Blutkörperchen, Produkte aller Art von der Zeitung bis zur Tablette, von Konservenbüchsen bis zu Kraftfahrzeugen. Menschen machten, würde man ihnen das eintönige Zählen übertragen, bald Fehler und könnten überdies bei den meisten Vorgängen das Tempo gar nicht mithalten.

Es stehen uns zahlreiche elektronische Zählverfahren zur Verfügung. Meßwandler geben die nötigen elektrischen Signale ab: Die zu zählenden Objekte bewegen sich nacheinander zum Beispiel an einem fotoelektrischen, induktiven oder kapazitiven Meßwandler vorbei. Es entstehen „Zählimpulse“, Spannungs- oder Stromstöße, die verstärkt werden und die Zähleinrichtung betätigen.

Elektromagnetische Zählwerke, in denen ein Elektromagnet bei jedem Zählimpuls eine Zahlentrommel um eine Ziffer weiterdreht, zählen nur bis etwa 10 in der Sekunde. Für höhere Geschwindigkeiten kann man ihnen eine „elektronische Umersetzung“ vorschalten, etwa eine sogenannte „Flip-Flop“-Stufe. Sie enthält unter anderem zwei Transistoren und hat die Eigenschaft, nur bei jedem zweiten Eingangsimpuls einen Ausgangsimpuls abzugeben. Ein angeschlossenes Zählwerk hat nur jeden zweiten Vorgang zu zählen.

Zählgeschwindigkeiten bis zu Millionen Zählimpulsen je Sekunde sind nur elektronisch zu bewältigen. Zur Anzeige bewähren sich *Vielkatodenröhren* und *Ziffern- oder Zeichenanzeigeröhren*. Beide sind Gasentladungsröhren (vgl. S. 108). An den Vorgängen in der Röhre sind

neben Elektronen auch elektrisch geladene Gasteilchen, Ionen, beteiligt. Das hat unter anderem zur Folge, daß man die Röhre arbeiten „sieht“: Im Kolben, vor allem an der Katode, treten Leuchterscheinungen auf (Glimmlampen für Signalzwecke, mit denen man z. B. Lichtschalter ausstattet, sind ebenfalls Gasentladungsröhren).

Vielkatodenröhren enthalten eine Anode und im Kreis um diese 10 Katoden, zwischen denen „Hilfskatoden“ angeordnet sind. Durch kleine Fenster mit den Ziffern 0 . . . 9 an der Stirnseite der Röhre kann man die Katoden beobachten. Sie werden nicht geheizt; die Emission von Elektronen erfolgt, sobald zwischen ihnen und der Anode eine bestimmte Spannung liegt. Dieses „Zünden“ ist an der dann mit einer glimmenden Haut bedeckt erscheinenden Katode zu erkennen.

Ist die mit „0“ bezeichnete Katode gezündet und trifft über die Hilfsanoden ein Zählimpuls ein, wird die Katoden-Anoden-Strecke „0“ gelöscht und statt ihrer die Strecke „1“ gezündet. Beim nächsten Zählimpuls springt das Glimmlicht zur Katode „2“ usf. Beim Zünden der 10. Katode („0“) wird ein Spannungsimpuls entnommen, der in einer zweiten Vielkatodenröhre die Katoden-Anoden-Strecke „1“ zündet. Diese Röhre zählt dann die Zehner, eine dritte die Hunderter usf. Man kann außerdem Impulse gewinnen, die bei einem bestimmten Zählerstand ein Signal auslösen oder eine Steuervorrichtung, etwa eine Verpackungseinrichtung, betätigen.

Bei Ziffern- bzw. Zeichenanzeigeröhren (Bild 35) leuchten Ziffern oder bestimmte Zeichen (z. B. + und –, %) auf – bei manchen Typen sind sie bis 50 mm groß und daher auch bei größerer Entfernung gut lesbar.

Vor der Anode sind, in Blickrichtung hintereinander liegend, in Ziffer- bzw. Zeichenform gebogene Drahtkatoden angeordnet. Die zu einer gezündeten Katoden-Anoden-Strecke gehörende Katode bedeckt sich mit einer

Glimmhaut (die gelöschten Katoden beeinträchtigen die Sichtbarkeit kaum). Zünden und Weiterschalten beim folgenden Zählimpuls übernehmen Schaltungen außerhalb der Röhre.

Zeit messen heißt gleiche Zeitabschnitte, zum Beispiel Sekunden, zählen. Das tut jede Uhr (durch Zählen der Unruhschwingungen), nicht anders zählen auch elektronische Zeitmeßeinrichtungen: Ein Oszillator erzeugt Schwingungen stabiler Frequenz (zum Beispiel von 10 kHz). Sie werden in einer Impulsformerstufe, die unter anderem Dioden enthält, zu Impulsen verformt und von einer Zählschaltung gezählt. Der Zählerstand rückt also in jeder zehntausendstel Sekunde um „1“ weiter. Zur Zeitmessung muß der Zähler, ähnlich wie eine Stoppuhr, nur am Anfang und Ende des Vorgangs ein- und ausgeschaltet und das Ergebnis abgelesen werden.

„Knopf“ der Stoppuhr ist eine „Torschaltung“ (ebenfalls auf der Wirkungsweise von Dioden beruhend). Sie läßt nur Impulse zum Zähler durch, solange an ihrem Eingang ein entsprechendes Steuersignal liegt. Es wird mit einem Meßwandler aus dem zu messenden Vorgang abgeleitet. Um zum Beispiel festzustellen, wie lange eine von einer rotierenden Blende abgedeckte Lampe blitzt, läßt man sie eine Fotozelle beleuchten (Bild 36). Diese löst das Signal aus, das die Torschaltung bei Beginn des Aufblitzens „öffnet“ und am Ende „schließt“.

Erhöht man die Frequenz des Oszillators, so lassen sich entsprechend kleinere Zeitabschnitte messen. Auf diese Weise kann man winzige Zeitspannen und damit auch höchste Geschwindigkeiten (z. B. von Geschossen) mit hoher Genauigkeit bestimmen.

Umgekehrt kann der Oszillator die Torschaltung für eine bestimmte Zeitspanne, etwa eine Sekunde, öffnen und schließen und eine entsprechende Anzahl zu zählender Impulse durchlassen. Mit diesem Verfahren kann man zum

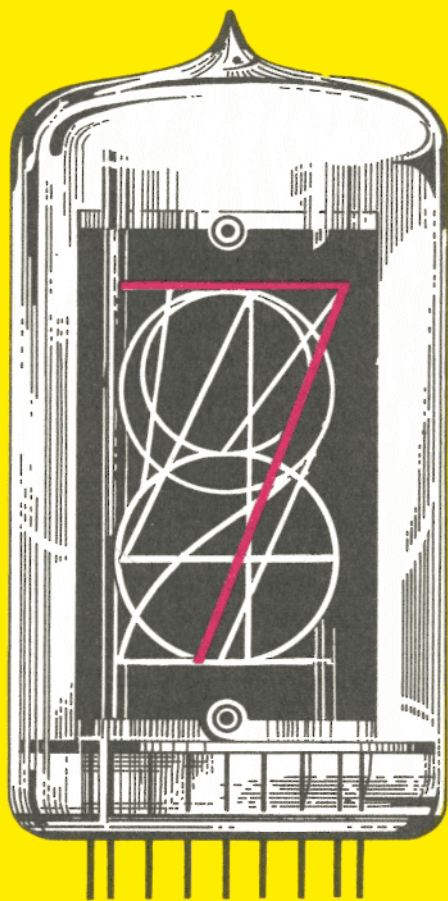


Bild 35

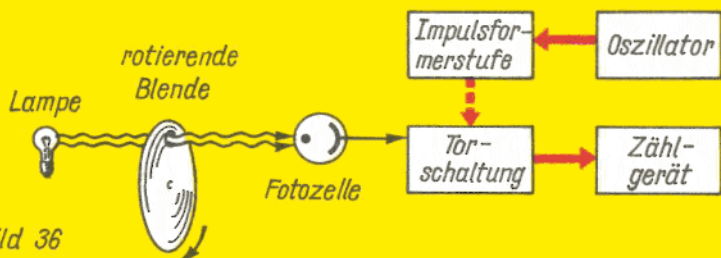


Bild 36

Beispiel feststellen, wie viele radioaktive Teilchen ein Meßgerät in einer bestimmten Zeit treffen, wie groß die Drehzahl einer Welle ist usf.

Die Signale beim Zählen und bei der Zeitmessung sind keine stetigen Änderungen eines Stroms oder einer Spannung, hervorgerufen etwa durch Temperaturänderungen, sondern sprungartig verlaufende Signale. Das Resultat wird nicht durch einen stetig ausschlagenden Instrumenanzeiger oder ein kontinuierlich geschriebenes Diagramm, sondern schrittweise durch Ziffern angezeigt. Man nennt Signale der ersten Gruppe *analog* (d. h. soviel wie stetig veränderlich), die der zweiten *digital* (d. h. soviel wie ziffernmäßig).

Als besonders vorteilhaft für die elektronische Meßtechnik erweisen sich digitale Signale, bei denen nur zwei verschiedene Signale auftreten (Spannung vorhanden – Spannung nicht vorhanden; Impuls – kein Impuls), bei denen zum Beispiel eine Temperatur durch eine vereinbarte Anzahl gleicher Impulse ausgedrückt wird. Man verwendet solche *binären* (etwa „zweiwertigen“) Signale sehr häufig sogar dort, wo zunächst analoge Signale entstehen.

Die Gefahr, daß Meßwerte bei der Übertragung verfälscht werden, ist weit geringer als bei stetig verlaufenden Signalen. Änderungen des Leitungswiderstandes, der Betriebsspannungen, Schwankungen in den Eigenschaften der Verstärker oder anderer Baustufen verursachen kein falsches Resultat, solange die Signale nur ausreichen, Verstärker, Zähler usw. sicher ansprechen zu lassen. Zwischen übertragene Impulse kann man (vgl. S. 32) weitere Impulsfolgen einordnen und so zahlreiche Meßwerte gleichzeitig übermitteln, eine Möglichkeit, die nicht zuletzt für die Raumfahrt von allergrößter Bedeutung ist. Vor allem aber sind binäre Signale die „Sprache“, die von Steuerungs- und Regelungseinrichtungen ebenso ver-

96

standen wird wie von Datenverarbeitungsanlagen, von Druckern und Lochbandstanzern zum Speichern der Meßdaten. Eine digitale Ziffernanzeige kann stets eindeutig abgelesen werden, während sich beim Ablesen von Instrumentenskalen leicht Fehler (Zeiger zwischen zwei Skalenstrichen) einschleichen können.

Wie lassen sich nun die digitalen oder binären Signale gewinnen? Bei Zählprozessen entstehen sie von selbst. Einfach ist auch, sie aus Bewegungsvorgängen herzuleiten: Ein Farbpunkt auf einer Welle, der Licht zu einem fotoelektrischen Wandler reflektiert, erzeugt Impulse für die Drehzahlmessung (mit einem induktiven Wandler und einem magnetischen Plättchen auf der Welle läßt sich diese Zählung ebenfalls durchführen). Geradlinige Bewegungen, etwa eines Werkzeugmaschinenschlittens, liefern Impulse, indem man an mitbewegten, durchleuchteten Skalen undurchsichtige Marken anbringt, die einen fotoelektrischen Wandler steuern.

Bei anderen sich stetig ändernden Größen erzeugt man zunächst in gewohnter Weise ein analoges Signal und wandelt es mit einem *Analog-Digital-Meßumformer* um (auch in ihm spielen Impulserzeuger und Torschaltungen eine wichtige Rolle).

Somit stehen für elektronische Messungen zwei Verfahren zur Verfügung, um Signale zu gewinnen, zu übertragen und anzuzeigen. Beide haben ihre Vorzüge, wenn sie richtig angewandt werden. So ist zum Beispiel die „analoge“ Kurve, die ein Temperaturmeßgerät oder ein Luftdruckmesser auf einer Wetterstation schreibt, übersichtlicher als eine lange „digitale“ Zahlenkolonne, während man sich bei Zählvorgängen eine analoge Anzeige nur schwer vorstellen kann.

Schneller – genauer – zuverlässiger

Hotel- und Garagentüren öffnen sich wie von Geisterhand, wenn Gäste oder Fahrzeuge sich nähern; eine Schaufensterbeleuchtung erstrahlt, solange wir vor der Auslage stehen. U-Bahn-Züge rollen unter den Straßen Leningrads, beschleunigen, bremsen, halten zentimetergenau am Bahnsteig, ohne daß jemand im Führerstand sitzt.

Maschinen zählen Produkte ab, sortieren sie nach Größe, Masse, Farbe und anderen Eigenschaften, sondern fehlerhafte Stücke aus, verpacken sie in Kästchen, Tüten oder Schachteln, die von anderen Maschinen selbsttätig zu-rechtgeschnitten, gefaltet, geklebt und bedruckt werden. Werkzeugmaschinen, mit Lochbändern „gefüttert“, fertigen komplizierte Teile – und niemand verstellt Vorschub oder Drehzahl, wechselt Werkzeuge oder rückt sie ein und aus. Teleskope folgen selbsttätig dem beobachteten Stern, Raumfahrzeuge richten ihre Antennen von allein stets zur Bodenstation, die ihrerseits das Raumfahrzeug niemals „verliert“.

Die Liste der elektronischen Steuerungs- und Regelungseinrichtungen, zu denen die genannten Beispiele zählen, ließe sich beliebig verlängern; fast täglich werden neue Anwendungsmöglichkeiten gefunden. Diese Liste beantwortet eine Frage, die man sich seit der Entwicklung elektronischer Meßverfahren stellte: Werden die vielfältigen Möglichkeiten der Meßwandler und der Signalübertragung wirklich ausgeschöpft, wenn Meßwerte nur angezeigt werden, das „Handeln“ – etwa das Betätigen eines Ventils oder eines Schalters – aber dem Menschen überlassen bleibt?

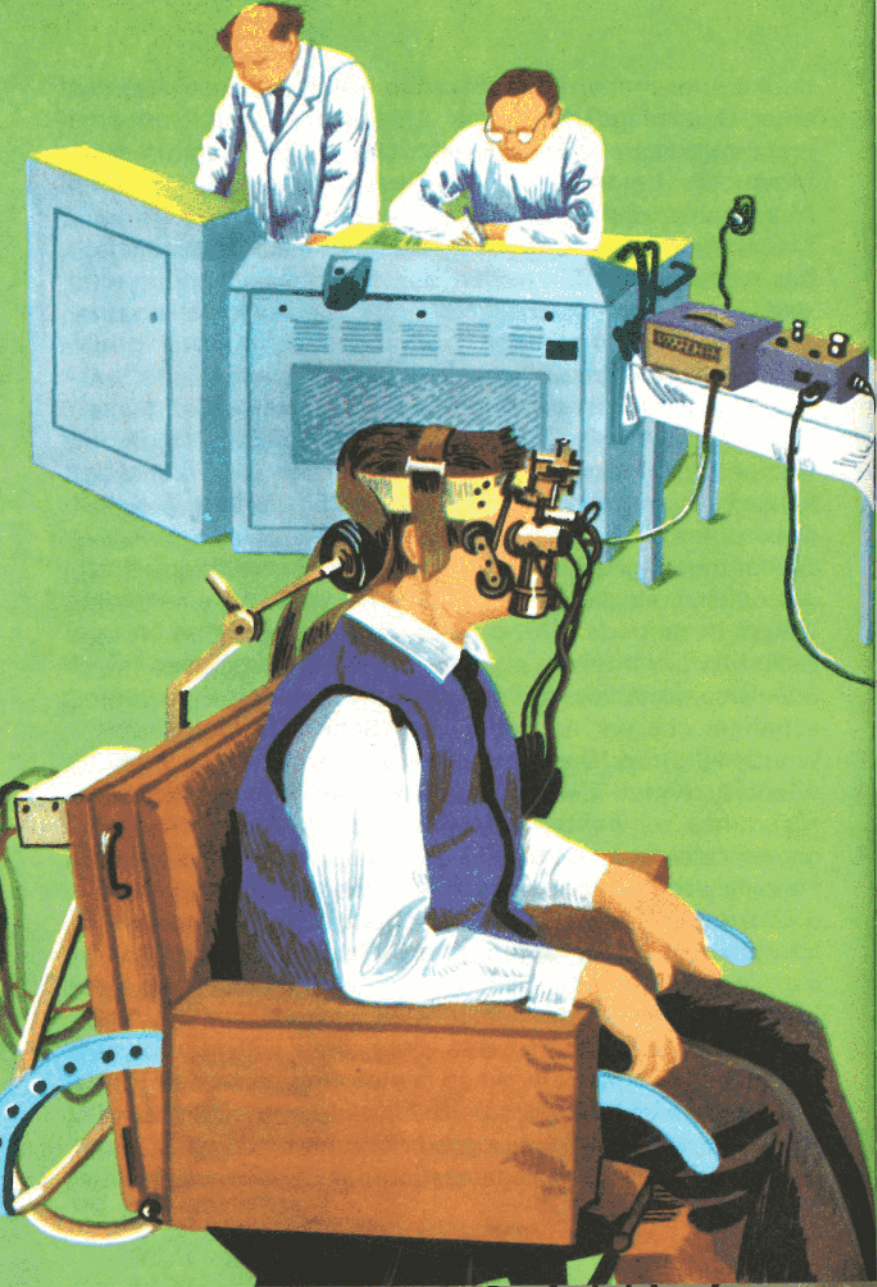
Warum zum Beispiel kann die Vorrichtung, die den Füllstand eines Bunkers mißt, nicht auch im richtigen Zeitpunkt das Nachfüllen veranlassen oder auf einen Reserve-

bunker umschalten? Warum sollten sich die Temperaturen einer Heizanlage oder einer Anlage der Chemieindustrie nicht selbsttätig auf vorgegebenen Werten halten lassen, indem die gemessenen Temperaturwerte das Ein- und Ausschalten der Heizung auslösen?

Selbsttätige Steuerungs- und Regelungsanlagen machen das unmittelbare Eingreifen des Menschen unnötig und sind damit eine Voraussetzung für die Automatisierung. Man kann sie, von ihren Aufgaben her, in zwei große Gruppen einteilen:

Die einen nehmen uns eintönige, ermüdende Tätigkeiten ab, die zudem oft wiederholt werden müßten (z. B. die Bedienung eines Fahrstuhls), und geben uns die Möglichkeit, eine interessantere und qualifiziertere Tätigkeit auszuüben.

Die anderen greifen ein, wo Reaktionsvermögen, Kraft, Ausdauer oder die Genauigkeit unserer Sinne überfordert wären. In modernen Produktionsanlagen hängt es oft von Sekundenbruchteilen ab, ob Ausschuß produziert wird oder eine ernsthafte Störung auftritt. Ein Unheil wäre geschehen, ehe wir auch nur die „Schrecksekunde“ überwunden hätten. Die genau einzuhaltenden, sich ständig wiederholenden Zeitspannen, die zum Beispiel den Betrieb eines Schweißautomaten steuern, könnten wir weder abschätzen noch genügend genau an einer Uhr ablesen (bereits der Fotograf benutzt eine Zeitschaltuhr, um Vergrößerungen gleichbleibender Qualität zu erhalten). Der komplizierte Landevorgang eines Raumfahrzeuges würde mit einer Katastrophe enden, wenn nicht selbsttätige Einrichtungen die Raumfahrer unterstützten. Der Pilot eines Überschallflugzeuges könnte ohne diese Hilfsmittel keine Katastrophe verhindern, wenn er eine Gefahr mit dem Auge erst auf einen halben Kilometer Abstand entdecken würde. Steuerungs- und Regelungseinrichtungen arbeiten nicht immer elektronisch, sondern auch auf der Grundlage von



strömenden Flüssigkeiten oder Gasen bzw. Luft (hydraulische und pneumatische Einrichtungen); auch mechanische Hilfsmittel, wie Hebel usw., haben durchaus noch ihre Existenzberechtigung.

Elektronischen Einrichtungen gehört jedoch wegen ihrer Schnelligkeit und Vielseitigkeit, der Möglichkeit zur Fernübertragung von Signalen, ihrer Zuverlässigkeit und ihrer sich immer mehr verringernden Abmessungen die Zukunft. Die meisten Bauelemente und Baustufen der elektronischen Steuerungs- und Regelungstechnik sind uns bereits bekannt: Meßwandler, Elektronenröhren, Dioden, Transistoren und Oszillatoren; weitere werden wir kennenlernen, wobei wir uns auch hier, wie bei den vorzustellenden Anlagen, auf wenige Beispiele beschränken müssen.

Beginnen wir mit der erwähnten Schaufensterbeleuchtung. An den Schwingungskreis eines Oszillators wird ein Fühler geschaltet, zum Beispiel ein Draht oder ein Gitter, der unauffällig im Fensterrahmen angebracht wird. Nähert sich jemand (ohne den Fühler zu berühren), wird dem Schwingungskreis zusätzlich Energie entzogen, oder seine Frequenz wird verschoben. Beides löst im Oszillator eine Stromschwankung aus, die verstärkt wird und ein Relais zum Ein- und Ausschalten der Beleuchtung steuert.

Ähnliche Vorrichtungen werden als Alarmeinrichtungen benutzt, etwa an Hochspannungsanlagen, einem Tresor, besonders wertvollen Ausstellungsstücken usw. Die Metallsucher, mit denen Reparaturbrigaden unsichtbar verlegten Rohren oder Kabeln nachspüren, funktionieren ähnlich.

Den Laternenanzünder unserer Großeltern gibt es schon lange nicht mehr. Die Straßenbeleuchtung, die Flutlichtstrahler von Werkhöfen, Sport- und Lagerplätzen, von Bahn- und Hafenanlagen werden häufig selbsttätig ein- und ausgeschaltet. Eine Schaltuhr, ähnlich derjenigen, wie

wir sie im Haushalt als „Wecker“ benutzen, wäre ungünstig. Alle paar Tage müßte man die Schaltzeiten, der sich ändernden Tageslänge entsprechend, neu einstellen; die tatsächliche Helligkeit, die auch vom Bewölkungsgrad abhängt, bliebe unberücksichtigt.

Dämmerungsschalter (Bild 37) messen die Helligkeit und betätigen in Abhängigkeit davon die Beleuchtung. Ein fotoelektrischer Wandler erzeugt das Steuersignal. Es wird verstärkt und schaltet die Lichtquellen ein, wenn eine mittlere Mindestbeleuchtungsstärke vorliegt, und wieder aus, wenn die Beleuchtungsstärke bei Tagesanbruch wieder ansteigt. Bei diesen Schaltern könnte es sich als ungünstig erweisen, daß elektronische Geräte schneller als der Mensch reagieren: Wenn man dem Dämmerungsschalter nicht eine Art „künstlicher Schrecksekunde“ einbauen würde, die ein Ansprechen bei kurzen Lichtimpulsen verhindert, würde jeder Blitz, jeder Autoscheinwerfer, dessen Licht den fotoelektrischen Wandler trifft, die Straßenbeleuchtung für eine kurze Zeitspanne abschalten.

Dem Dämmerungsschalter ähnlich ist die *Lichtschranke* (Bild 38), die ebenfalls in vielen elektronischen Steuereinrichtungen anzutreffen ist. Ihr fotoelektrischer Wandler spricht nicht auf „natürliches“ Licht an, sondern auf eine künstliche Quelle, deren Licht, zu einem Strahl gebündelt, den Wandler erreicht oder nicht. Die auf diese Weise erhaltenen Signale steuern – wie beim Dämmerungsschalter – einen Verstärker und die ihm folgenden Einrichtungen.

Sämtliche Anwendungsmöglichkeiten der Lichtschranke auch nur zu nennen, würde einen dicken Band füllen. Nicht grundlos meinen Fachleute, es sei einfacher festzustellen, was Lichtschranken *nicht* können, als ihre Möglichkeiten aufzuzählen.

Lichtschranken liefern Signale zum Zählen beliebiger Ob-

102

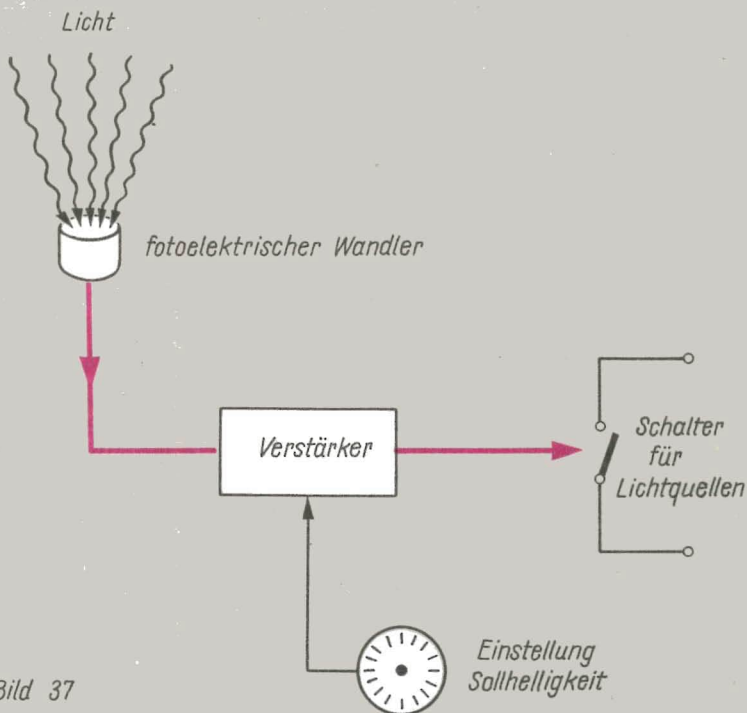


Bild 37

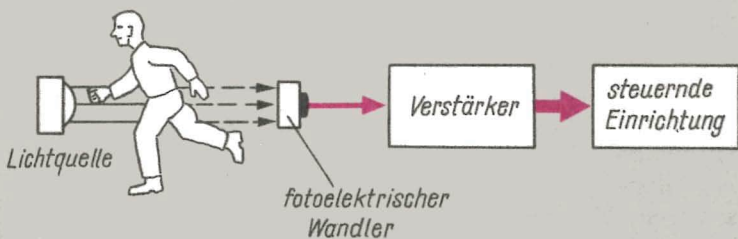


Bild 38

jekte, von Menschen bis zu Hustenbonbons, von Kopfschmerztabletten bis zu vorüberrollenden Güterwagen oder Kraftfahrzeugen. Sie stellen fest, ob eine Flasche, eine Konservendose, eine Salbenschachtel richtig, zuwenig oder zu sehr gefüllt wurde, betätigen Türöffner und Rolltreppen, schützen Räume und Wertgegenstände vor Dieben, Neugierige und Leichtsinnige vor Verletzungen durch Maschinen und wachen darüber, daß niemand unentdeckt unsere Grenzen verletzt.

Sollen, beispielsweise bei Anlagen zum Schutz vor Diebstahl, die Lichtschranke und ihr Strahl unsichtbar bleiben, benutzt man infrarotes Licht. Bei erhitzten Objekten, etwa glühenden Stahlblöcken, die eine Lichtschranke passieren, ist eine Lichtquelle unnötig. Die von den Objekten ausgehende infrarote Strahlung löst die Signale des fotoelektrischen Wandlers aus.

Lochstreifen, auch Lochbänder genannt, dienen zur Speicherung von Informationen – zum Beispiel Telegramme, Fernschreiben, Meßwerte, Zahlen und Daten für Rechenautomaten und Buchungsmaschinen, Steuerbefehle für Werkzeugmaschinen – in Gestalt von Löchern, die nach einem vereinbarten Code angeordnet sind. Sollen die gespeicherten Informationen in elektrische Signale verwandelt werden, muß das Lochband „gelesen“ werden. Das kann durch Fühlstifte oder -bürsten geschehen, die beim Überfahren eines Lochs einen Kontakt schließen. Fotoelektrische Leseeinrichtungen, die nach dem Prinzip der Lichtschranke arbeiten, erreichen weit höhere Lesegeschwindigkeiten und schonen zugleich das Lochband. Jede Spur läuft zwischen einer Lichtquelle und einer Fotodiode durch. Immer, wenn ein Loch Licht auf die Fotodiode fallen läßt, erzeugt diese ein Signal.

Zahlreiche Steuereinrichtungen beruhen auf dem Zusammenwirken von Signalen zweier fotoelektrischer Wandler. Betrachten wir, um den Grundgedanken kennenzuler-

nen, ein Automodell, das eine Lichtquelle selbsttätig ansteuert und verfolgt (Bild 39).

An der Stirnseite, etwa an Stelle der Scheinwerfer, sind zwei fotoelektrische Wandler etwas „einwärts schielend“ angebracht. Jeder Wandler steuert die Drehzahl eines kleinen Motors am Hinterrad derselben Fahrzeugseite. Er läuft um so schneller, je mehr Licht der fotoelektrische Wandler aufnimmt.

Fährt das Modell genau auf die Lichtquelle zu, so erhalten beide Fotodioden gleich viel Licht; die Motoren haben die gleiche Drehzahl, das Modell fährt geradeaus. Bewegt sich die Lichtquelle nach rechts, so fällt auf den linken Wandler mehr Licht als auf den rechten; das linke Hinterrad dreht sich schneller, das Modell biegt nach rechts ab, bis beide Wandler wieder gleich stark beleuchtet werden und die Motoren das Modell geradeaus führen. Bei Richtungsabweichungen nach der anderen Seite läuft der Vorgang entsprechend ab.

Ähnlich arbeiten Steuerungseinrichtungen, mit denen astronomische Instrumente selbsttätig einem beobachteten Objekt nachgeführt werden, oder Apparaturen, mit deren Hilfe sich ein Raumflugkörper selbsttätig nach einem Stern orientiert.

Die Breite bandförmiger Materialien, zum Beispiel von Papier, wird nach dem gleichen Prinzip während der Produktion fortlaufend kontrolliert und, wenn nötig, selbsttätig korrigiert. Mit fotoelektrischen Wandlern ausgerüstete Abtastknöpfe folgen von allein den Linien einer Zeichnung; ihre Signale können eine Werkzeugmaschine steuern, die eine Kopie der Zeichnung ausschneidet. Sie können, nach einem vereinbarten Code selbsttätig verschlüsselt, auf einem Lochband gespeichert werden, das seinerseits dann eine Zeichenvorrichtung oder die Werkzeugmaschine steuert. Fahrzeuge folgen Leitlinien, die mit heller Farbe auf den Boden aufgetragen wurden, sich

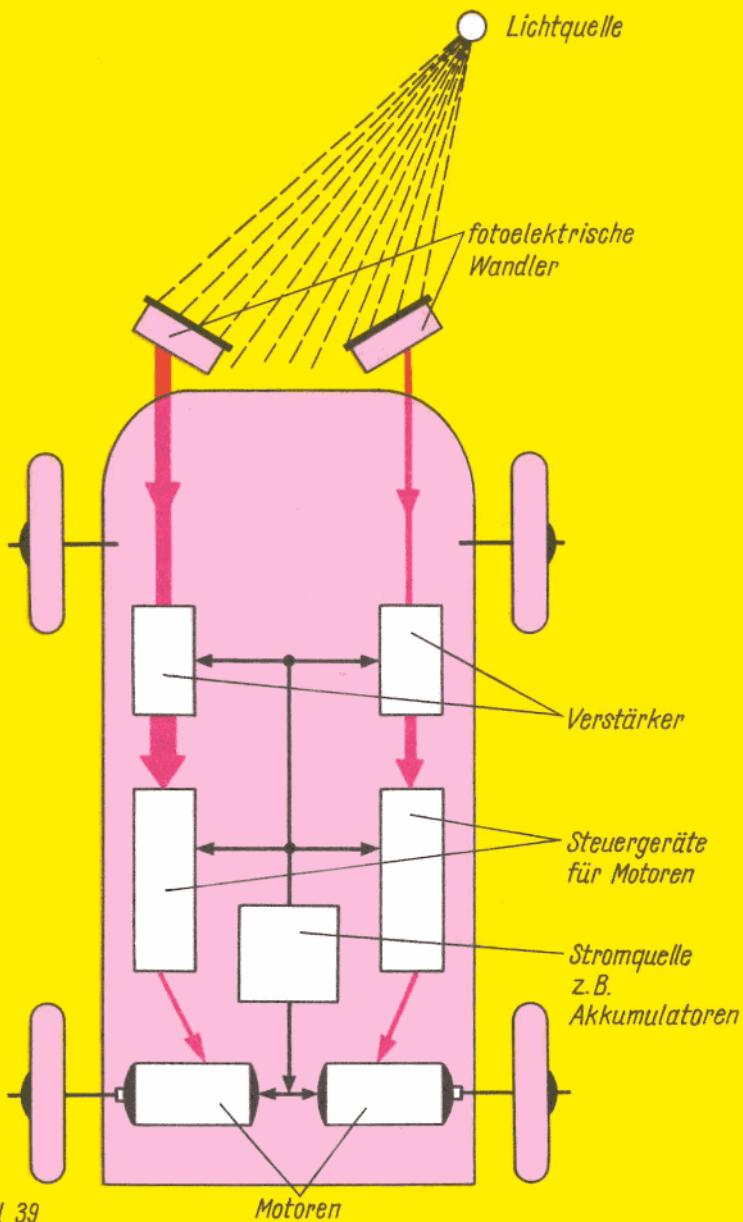


Bild 39

Motoren

leicht löschen und in der Linienführung verändern lassen. Diese Methode eignet sich unter anderem dazu, in Werkhallen einen „unbemannten“ Materialtransport durchzuführen, Frachtgut in Lagerhallen selbsttätig zu verteilen usw.

Selbstverständlich können nicht nur fotoelektrische, sondern alle Arten Meßwandler verwendet werden, um Steuerungs- und Regelungseinrichtungen zu betätigen. Fast immer taucht dabei das gleiche Problem auf:

Meßwandler liefern Signale, durch die – im Gegensatz zur Nachrichtentechnik – in der Industrie, im Verkehrswesen usw. meistens erhebliche Energieflüsse, zum Beispiel der Strom für Tausende Glühlampen, für leistungsstarke Elektromotoren usw., gesteuert werden sollen. Zwar durchlaufen die Signale meistens Verstärker, aber kein Röhren- oder Transistorverstärker gibt – mindestens bei „vernünftigen“ technischen Aufwand – Leistungen ab, mit denen sich etwa der Motor eines Aufzugs oder die Antriebe von Walzwerken, Pressen usw. speisen lassen.

Relais – wie auch andere Schaltelemente der Elektrotechnik – sind als Zwischenglieder bei großen Leistungen wenig geeignet. Sie haben Kontakte, die nicht nur verhältnismäßig rasch verschleifen, sondern auch zur Funkenbildung neigen. Diese Funkenbildung ist die Ursache von Störungen beim Rundfunk- und Fernsehempfang und verbietet den Einsatz von Relais in explosionsgefährdeten Betrieben. Ihre Schaltgeschwindigkeit ist begrenzt, stetige Änderungen – z. B. der Stromstärke – sind nicht möglich.

Wollte man die Vorzüge elektronischer Schaltungen und Verfahren ohne solche Umwege und Notlösungen auch zur Steuerung und Regelung großer Leistungen ausnutzen – man nennt dieses Teilgebiet der Elektronik *Leistungselektronik* –, brauchte man Bauelemente, die „kontaktlos“ schalten und nach Möglichkeit auch steuern können.

Zu diesen Bauelementen zählen die *Gasentladungsröhren*. Sie enthalten eine Katode, eine Anode, oft ein oder mehrere Gitter oder sogenannte Zündelektroden, sind aber nicht luftleer gepumpt wie Elektronenröhren, sondern mit einem Gas unter niederem Druck oder auch mit Quecksilberdampf gefüllt.

Die Gasfüllung ist die Ursache, daß in einer Gasentladungsröhre weit stärkere Ströme als in einer Elektronenröhre fließen. Auf dem Wege zur Anode stoßen die Elektronen mit Gasteilchen zusammen, oft so heftig, daß aus diesen weitere Elektronen herausgeschlagen werden. Auch sie fliegen in Richtung Anode; es kommt zu neuen Zusammenstößen usw. Die getroffenen Gasteilchen hingegen sind (wegen der fehlenden negativen Elektronen) positiv elektrisch geladen und wandern als positive *Ionen* in Richtung Katode. Innerhalb kürzester Zeit wächst der Strom durch die Röhre lawinenartig an. Sie würde zerstört werden, wenn man nicht durch die Schaltung seinen Höchstwert begrenzte. Deutlich sichtbare Leuchterscheinungen zeigen, daß die Gasentladungsröhre zündet und das Wechselspiel zwischen Elektronen und Gasteilchen einsetzt.

Eine Gasentladungsröhre für große Leistungen (teilweise bis zu Tausenden Kilowatt) ist das *Thyratron*, auch *Stromtor* genannt. Seiner Elektrodenanordnung nach ist es eine Triode. Während sich jedoch der Anodenstrom von Elektronenröhren durch die Spannung zwischen Steuergitter und Katode stetig verändern läßt, setzt der gegenüber Elektronenröhren sehr starke Anodenstrom des Thyratrons plötzlich und in voller Höhe ein. Das ist bei einer bestimmten Zündspannung zwischen Anode und Katode der Fall, deren Größe von der Spannung zwischen Gitter und Anode abhängt. Liegt am Gitter eine niedrige negative Spannung gegenüber der Katode, so ist auch die Zündspannung niedrig, während zu einer hohen negativen

Spannung am Gitter eine hohe Zündspannung gehört. Im gezündeten Thyatron ist das Gitter wirkungslos. Man kann mit seiner Hilfe den Anodenstrom weder verändern noch unterbrechen. Erst wenn die Anodenspannung für einen Augenblick unterbrochen wird oder unter einen bestimmten Wert, die Löschspannung, sinkt, „löscht“ das Thyatron und kann mit Hilfe des Gitters erneut gezündet werden.

Wie kann man mit einem Thyatron den von einem Verbraucher benötigten Strom nicht nur ein- oder ausschalten, sondern stetig ändern? Betrachten wir das Bild 40:

Katoden-Anoden-Strecken des Thyatrons und der zu steuernde Verbraucher, zum Beispiel ein elektrischer Heizkörper, sind hintereinander geschaltet und über einen Transformator mit dem Wechselstromnetz verbunden. Strom kann nur während der Halbwellen durch den Verbraucher fließen, bei denen die Anode gegenüber der Katode positiv ist; denn auch in Gasentladungsröhren bewegen sich die Elektronen von der Katode zur Anode. Das bedeutet zunächst: Das Thyatron ist ein Gleichrichter.

Die positiven Halbwellen werden ebenfalls nicht vollständig durchgelassen. Noch ehe an ihrem Ende die Spannung den Wert Null erreicht, löscht das Thyatron und unterbricht den Stromfluß. Bei der nächsten positiven Halbwelle zündet es nicht sofort, sondern erst, wenn im Verlauf der Halbwelle die Zündspannung erreicht wird. Diese aber kann man durch die Spannung zwischen Gitter und Katode steuern und damit einen mehr oder weniger großen Teil der positiven Halbwellen „abschneiden“ (Bild 41).

Nehmen wir an, am Gitter liegt eine so hohe negative Spannung gegenüber der Katode, daß die Zündspannung höher als die größte Spannung zwischen Anode und Katode ist. Dann fließt auch während der positiven Halb-

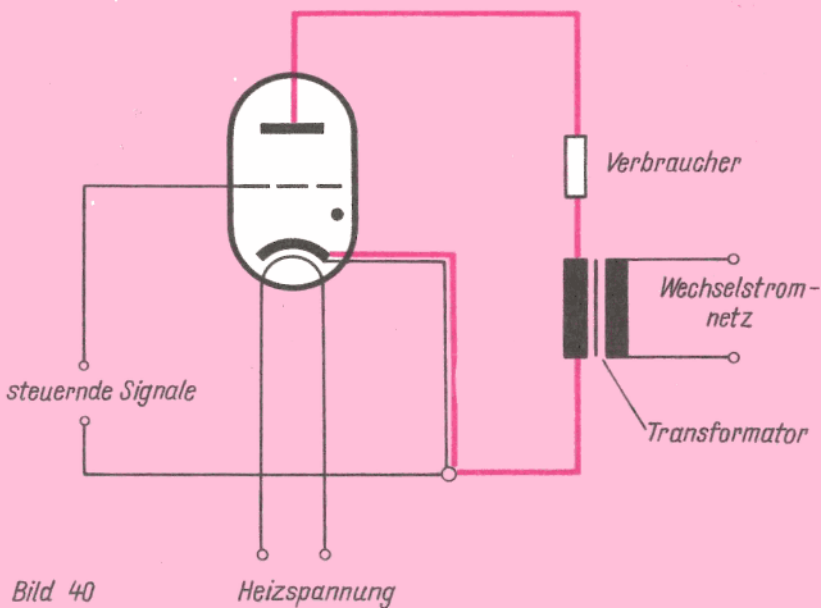
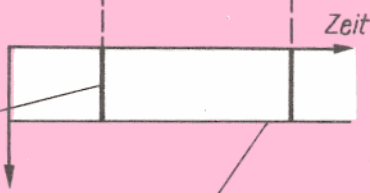
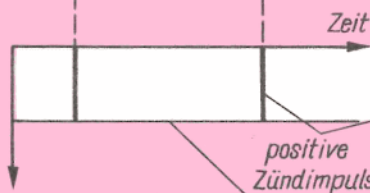
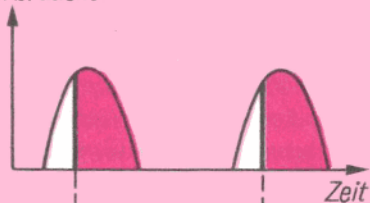


Bild 40

Heizspannung

Strom durch den Verbraucher

Strom durch den Verbraucher



positive Zündimpulse

negative Spannung am Gitter

Spannung zwischen Gitter und Katode

Bild 41

wellen kein Strom; der Verbraucher bleibt „abgeschaltet“. In dem Augenblick jedoch, da die negative Spannung am Gitter durch einen positiven Impuls aufgehoben wird, zündet das Thyatron und bleibt bis gegen Ende der Halbwelle gezündet. Ein zweiter „Zündimpuls“ bei der nächsten positiven Halbwelle zündet es erneut usf. Je nachdem, an welcher Stelle der Halbwellen die Zündimpulse wirksam werden, fließt während längerer oder kürzerer Halbwellenanteile Strom durch den Verbraucher. Die mittlere Stromstärke ist dementsprechend größer oder kleiner. Sie kann durch Verschieben der Zündimpulse längs der Halbwellen stetig zwischen Null und einem Höchstwert verändert werden. Das Thyatron ist – im Gegensatz zur Diode – also ein *steuerbarer Gleichrichter*.

Erzeugen und Verschieben der Impulse, deren Leistung gegenüber der gesteuerten Leistung sehr gering ist, bereiten keine Schwierigkeiten. Daß mit dem Thyatron ursprünglich nur Gleichstromverbraucher gesteuert werden können, stört wenig: Heizanlagen und Glühlampen zum Beispiel sind mit Gleichstrom ebenso gut wie mit Wechselstrom zu speisen; elektrochemische Verfahren setzen Gleichstrom voraus, Gleichstrommotoren sind für viele Zwecke gut geeignet. Aber auch Wechselstromverbraucher lassen sich steuern, indem man zwei Thyatrone so gegeneinander schaltet, daß jedes jeweils immer eine Halbwelle durchläßt.

Andere Gasentladungsröhren für große Stromstärken (einige 100 Ampere), die auf ähnliche Weise gesteuert werden, sind das *Ignitron* und das *Senditron*. Statt einer geheizten Katode besitzen sie einen in den Kolben eingeschlossenen „Quecksilberteich“, aus dessen Oberfläche nach dem Zünden Elektronen treten, und statt des Gitters eine besondere Zündelektrode.

Gasentladungsröhren erreichen, je nach Leistung, erheb-

liche Abmessungen (Höhe bis 0,5 m) und werden im Betrieb so heiß, daß häufig besondere Kühlvorrichtungen zur Abführung der Wärme benötigt werden. Als man gelernt hatte, Steuerimpulse und Steuerspannungen mit Hilfe von Halbleiterbauelementen zu erzeugen, fehlte es nicht an Versuchen, auch Gasentladungsröhren durch Halbleiterbauelemente zu ersetzen.

Halbleitergleichrichter für große Leistungen wurden als spezielle Dioden bereits in den Anfangsjahren der Halbleitertechnik entwickelt. Dank ihrer geringen Abmessungen schrumpften Gleichrichteraggregate, die früher einen ganzen Raum beansprucht hatten, auf die Größe eines Schrankes. Durch den hohen Wirkungsgrad, d. h. durch die geringen Stromverluste im Halbleitergleichrichter, konnten viele Tausende Kilowattstunden eingespart werden. Seit einigen Jahren gibt es als steuerbaren Halbleitergleichrichter den *Thyristor* (Bild 42) – der Name ist aus den Wörtern Thyatron und Transistor gebildet –, der dem Thyatron in vielerlei Hinsicht überlegen ist. Er besteht aus einem Siliziumkristall, in dem zwei p- und zwei n-leitende Schichten durch drei pn-Übergänge getrennt sind. Die äußeren Halbleitergebiete sind mit je einem Anschluß versehen, ein dritter, die Steuerelektrode, führt an das innenliegende p-Gebiet.

Schaltet man den Thyristor – wie ein Thyatron – mit einem Verbraucher und einem Transformator in einen Stromkreis, so fließt zunächst kein nennenswerter Strom. Sobald jedoch ein geeigneter Spannungsimpuls an die Steuerelektrode gelegt wird, setzt zwischen den äußeren Elektroden Stromfluß ein (in Anlehnung an das Thyatron sagt man, der Thyristor „zündet“), der auch anhält, wenn der Impuls vorüber ist. Man kann den Strom nur unterbrechen, indem die Spannung zwischen den äußeren Halbleitergebieten unter einen Mindestwert gesenkt wird. Der nächste Impuls führt erneut zur Zündung. Der Thyri-

112

stor kann nach demselben Verfahren gesteuert werden wie das Thyrastron.

Einige Vorzüge des Thyristors sind: Ein etwa fingerhutgroßer Thyristor steuert Ströme, für die ein mehr als 20 cm hohes Thyrastron nötig wäre. Der Thyristor braucht nicht geheizt zu werden, ist jederzeit betriebsbereit, entwickelt weniger Wärme als das Thyrastron und ist für harte Betriebsbedingungen mit Stößen, Erschütterungen usw. weit besser geeignet. Thyristoren können heute zur Gleichrichtung bei hohen Spannungen (mehrere tausend Volt) und hohen Stromstärken (bis 2000 A) eingesetzt werden. Es gibt kaum einen steuerbaren Hochleistungsgleichrichter, der sich nicht mit Thyristoren aufbauen ließe.

Der Thyristor erfüllt außerdem Wünsche, die mit Gasentladungsröhren oder auf andere Weise bisher nicht zu verwirklichen waren. So kann man mit seiner Hilfe Gleichstrommotoren ohne die durch Funken rasch verschleißenden „Kommutatoren“, auch Stromwender oder Kollektor genannt, bauen, und er ermöglicht es, sehr wirtschaftlich und zuverlässig arbeitende Wechselrichter für die Umwandlung von Gleichstrom in Wechselstrom zu konstruieren. Wechselströme veränderlicher Frequenz lassen sich mit Thyristoren aus einem Wechselstrom fester Frequenz gewinnen. Man kann auf diese Weise zum Beispiel die Drehzahl von Wechselstrommotoren (sie hängt unmittelbar mit der Frequenz des speisenden Stroms zusammen) verändern. Die entsprechenden Einrichtungen sind so klein, leicht und zuverlässig, daß bereits zahlreiche Elektrogeräte im Haushalt, wie Küchenmaschinen, Antriebsmotoren für Bastlerwerkzeuge und Modellbahnlokomotiven mit Thyristoren gesteuert werden können. Andererseits erhalten auch die riesigen Motoren von Elektrolokomotiven, Baggern, Walzwerksantrieben usw. ihren Strom über Thyristoren.

Sehen wir uns an, wie man mittels eines Thyristors (oder

auch einer Gasentladungsröhre) die Drehzahl eines Elektromotors, unabhängig von seiner Belastung, auf einem vorgegebenen Wert hält – eine Forderung, die unter anderem oft an die Antriebsmotoren von Werkzeugmaschinen oder Transport- und Förderbändern gestellt wird (Bild 43).

Man benutzt einen Gleichstrom-Nebenschlußmotor. Seine Drehzahl wächst, wenn die Spannung am Anker (das ist der rotierende Teil des Motors) zunimmt, sie sinkt mit abnehmender Ankerspannung.

Die Drehzahl des Motors erfaßt als Meßwandler ein „Tachogenerator“, eine kleine Dynamomaschine auf der Motorwelle, deren Spannung der jeweiligen Drehzahl proportional ist. Im Drehzahlwähler wird diese Spannung so mit einer einstellbaren Spannung zusammengeschaltet, daß die Differenz beider Spannungen am Ausgang des Drehzahlwählers erscheint. Solange Motordrehzahl und eingestellte Solldrehzahl übereinstimmen, heben sich die Spannungen auf. Bei jeder Abweichung hingegen erscheint eine Spannung als Steuersignal. Sie verschiebt die im Impulssteuergerät erzeugten Impulse für den Thyristor so, daß bei zu hoher Drehzahl der mittlere Strom durch den Anker herabgesetzt, bei zu niedrigerer heraufgesetzt wird. Ist die Solldrehzahl wieder erreicht, bleiben die korrigierenden Signale aus.

Der Anwendungsbereich der Thyristoren erweitert sich noch durch Sonderausführungen, für die es bei Gasentladungsröhren keine Parallelen gibt. So steht im sogenannten Vollweg-Thyristor ein Bauelement zur Verfügung, mit dem man Wechselströme steuern kann, ohne sie gleichzurichten, während der Fotothyristor durch Lichtblitze gezündet wird und damit den Aufbau besonders einfacher fotoelektrischer Steuereinrichtungen ermöglicht.

Die Steuerungsmöglichkeiten und -einrichtungen, von denen wir hier nur einige kennenlernen konnten, sind

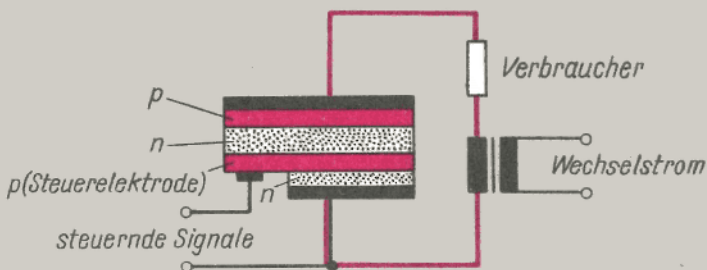
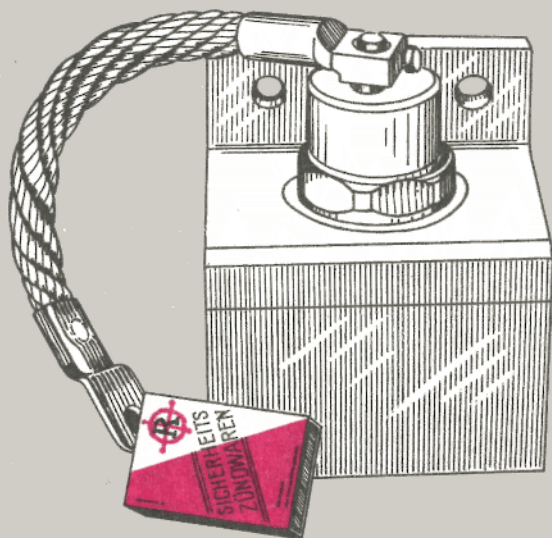


Bild 42



Thyristor

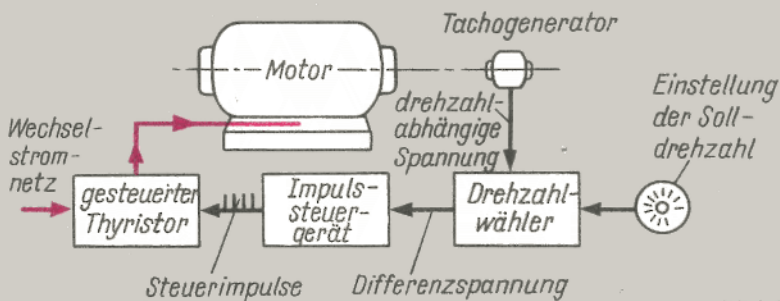


Bild 43

unschätzbare Helfer, gewiß – aber bisher lernten wir sie nur bei der Steuerung und Regelung von einzelnen Vorgängen kennen: Eine Beleuchtungsanlage oder Heizung wird ein- und ausgeschaltet, eine Verpackungsmaschine gesteuert, ein Motor auf vorgeschriebener Drehzahl gehalten. Doch ihre bedeutendsten Erfolge erzielt die Elektronik dort, wo sie vielfach miteinander verknüpfte Vorgänge selbsttätig ablaufen läßt.

Nennen wir nur zwei Beispiele, stellvertretend für viele: Die Bedienung eines Fahrstuhls ist kinderleicht. Durch Knopfdruck bestellen wir die Kabine, ein weiterer Knopfdruck bringt uns zum gewählten Stockwerk. Haben wir uns einmal überlegt, welche komplizierten Steuerungsvorgänge, nicht zuletzt zu unserer Sicherheit, „hinter den Kulissen“ zusammenwirken? Sämtliche Türen vor dem Fahrstuhlschacht müssen verriegelt sein, wenn keine Kabine genau in Türhöhe hält. Sind wir eingestiegen, darf die Kabine sich erst in Bewegung setzen können, wenn auch diese Tür und die Kabinentür verschlossen sind. Der Fahrstuhl muß selbsttätig, je nach Fahrziel, auf „abwärts“ oder „aufwärts“ umgesteuert werden und seine Kabine stets fußbodengleich vor dem gewünschten Stockwerk halten. Eine Fehlbedienung (z. B. versehentliches Drücken mehrerer Knöpfe) darf kein Unheil anrichten; bei einem Defekt müssen sich Alarmsignale und Notbeleuchtung einschalten. Nicht zuletzt der Elektronik verdanken wir, daß der Beruf des Fahrstuhlführers, für dessen stumpfsinnige, sich ständig wiederholende Tätigkeit man in kapitalistischen Staaten noch heute Jugendliche „bevorzugt“, auszusterben beginnt.

Dampferzeuger, Dampfkessel sind an vielen Stellen unentbehrlich – vom Großkraftwerk bis zur Wäscherei, vom Chemiebetrieb bis zum Fernheizwerk moderner Wohngebiete. Der Steuerungs- und Regelungstechnik, insbesondere der Elektronik, verdanken wir es, daß die Zahl

der Heizer in der kräfteverzehrenden Hitze vor den Kesseln immer geringer wird.

In modernen Kesselanlagen laufen die meisten Vorgänge selbsttätig ab, während der „Heizer“ von einst als Ingenieur oder Techniker von der Kesselwarte aus die gesamte Anlage überwacht und nur selten unmittelbar eingreifen muß.

Zum Zünden einer Öl- oder Gasfeuerung ist nur ein Knopfdruck nötig. Doch ehe Zündfunken vor den Brennerdüsen überspringen, wird selbsttätig geprüft, ob sich nicht Gas- oder Brennstoffreste im Feuerraum befinden, die eine Explosion auslösen könnten – dann erst wird die Zündung freigegeben, und nur, wenn Funken überspringen, öffnen sich die Brennerdüsen. Setzen Brenner aus, gibt es Alarm, die Brennstoffzufuhr wird unterbrochen. Oft können auch mit Hilfe einer hitzesicher eingebauten Fernsehkamera, die durch ein Kabel mit einem Empfänger in der Kesselwarte verbunden ist, die Flammen im Feuerraum direkt beobachtet werden.

Der Wasserstand im Kessel wird selbsttätig auf dem vorgeschriebenen Wert gehalten. Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr werden vom jeweiligen Dampfverbrauch gesteuert, Dampfdruck und -temperatur automatisch konstant gehalten. Ständig wird kontrolliert, ob die Verbrennungsgase eine normale Zusammensetzung zeigen oder nicht. Alarmsignale melden jedes unzulässige Abweichen eines Betriebswertes, bei einer sich anbahnenden Havarie verhindern Sicherheitsschaltungen eine Katastrophe.

In diesen und in vielen anderen Anlagen müssen zahlreiche Meßwandler Werte feststellen und in Signale umsetzen, müssen Hunderte, manchmal Tausende Transistoren, Dioden und andere Bauelemente die Signale verknüpfen, umformen und verstärken.

Entwurf und Ausführung solcher Schaltungen wären sehr

teuer und zeitraubend, wenn sie für jede Anlage neu entwickelt werden müßten. Doch das ist nicht nötig: Die sogenannte Schaltalgebra lehrt uns, auch die kompliziertesten Schaltaufgaben in eine Folge einfacher Schaltvorgänge aufzulösen. Es ist ähnlich wie auf einem Güterbahnhof: Seine Weichen kennen nur zwei Stellungen, trotzdem kann durch eine Folge von Weichenstellungen jeder Waggon auf jedes Gleis gebracht werden. Die „Weichen“ der Schaltalgebra unterscheiden (wie jeder einfache Schalter) nur zwischen „Strom – kein Strom“, „Spannung – keine Spannung“ oder allgemein „Signal vorhanden – Signal nicht vorhanden“.

Dabei treten, wenn Signale verarbeitet und verknüpft werden sollen, vor allem drei einfache Grundsaltungen (und aus ihnen abgeleitete Schaltungen) immer wieder auf:

Die *Und-Verknüpfung* gibt nur dann ein Ausgangssignal ab, wenn ihren Eingängen (zwei oder mehr) gleichzeitig Eingangssignale zugeführt werden (Beispiel: Der Fahrstuhlmotor erhält nur dann das Startsignal, wenn der geschlossene Zustand aller Türen signalisiert wird).

Die *Oder-Verknüpfung* gibt ein Ausgangssignal ab, wenn an einem oder an sämtlichen ihrer Eingänge ein Signal liegt (Beispiel: Das Treppenlicht kann von jedem Stockwerk aus eingeschaltet werden).

Der *Negator* (Nicht-Verknüpfung) zeigt durch sein Ausgangssignal das Fehlen eines Eingangssignals an und umgekehrt (Beispiel: Bei einer elektrischen Diebstahlsicherung wird eine Alarmglocke eingeschaltet, wenn ein Stromkreis unterbrochen wird).

Diese Grundsaltungen kann man sehr einfach, klein und zuverlässig aus jeweils wenigen Dioden, Transistoren und Widerständen aufbauen. Ergänzt man sie durch einige weitere Schaltanordnungen, mit denen zum Beispiel Signale verstärkt oder Impulse erzeugt werden können, so

lassen sich aus wenigen verschiedenen Bauelementen auch umfangreichste Schaltungen zusammenstellen.

Die Elektronikfachleute wären schlechte Techniker, wenn sie nicht sehr bald auf den Gedanken gekommen wären, Baukastensysteme auszuarbeiten, deren Bausteine sich für die verschiedensten Aufgaben der Steuerungs- und Regelungstechnik, aber auch für die Gewinnung und Übertragung von Meßwerten und anderen Informationen kombinieren ließen. Die Bausteine solcher Systeme mußten nicht nur elektrisch „zusammenpassen“, beispielsweise für gleiche Betriebsspannung ausgelegt sein, sondern auch in ihren Abmessungen und Anschluß- und Verbindungsmöglichkeiten so beschaffen sein, daß sich mit wenigen Handgriffen eine Baugruppe – etwa durch Einführen der Bausteine in Steckleisten – herstellen oder ein schadhafter Baustein auswechseln ließ.

Die Vorteile solcher Systeme liegen auf der Hand: Standardisierte Bauelemente bieten die Möglichkeit, sie in großer Stückzahl und billiger herzustellen. Da sie austauschbar sind, können elektronische Steuerungs- und Regelungseinrichtungen mit ihrer Hilfe in kürzester Zeit entwickelt, erprobt und abgeändert werden. Allerdings „vertragen“ sich die verschiedenen Baukastensysteme kapitalistischer Firmen in ihren elektrischen Daten und Eigenschaften nur selten. Man möchte „seine“ Kunden behalten und verhindern, daß sie zur Konkurrenz übergehen. In sozialistischen Ländern kennt man diese „Gesichtspunkte“ nicht. Das einheitliche Bausteinsystem, das vom Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe empfohlen wurde und bereits weitgehend entwickelt ist, kommt den Verbrauchern aller sozialistischen Länder zugute.

Schaltungen unter dem Mikroskop

Die ersten Rundfunkempfänger enthielten ein halbes Dutzend Bauelemente: eine oder zwei handtellergroße Spulen, den Drehkondensator, einen Kristalldetektor und Buchsen für Antenne, Erdleitung und Kopfhörer. Starre, blanke Drähte, parallel oder sich rechtwinklig kreuzend, verbanden die Bauelemente. Das alles beanspruchte mindestens den Raum einer Zigarrenkiste.

Als die Elektronenröhre die Funktechnik erobert hatte, waren aus dem halben schon mehrere Dutzend Bauelemente geworden. Die parallel und senkrecht zueinander verlaufenden Leitungen ersetzte man durch möglichst kurze Schaltdrähte, Kondensatoren und Widerstände wurden nur noch mit ihren Anschlußdrähten eingelötet und nicht mehr angeschraubt oder von Klemmfedern gehalten. Die Elektronenröhren aber waren noch über zehn Zentimeter hoch, die Spulen in großen, metallenen Abschirmbechern untergebracht, und es gab viel leeren Raum in jedem Gerät, damit kühlende Luft um die sich erhitzenden Röhren und die übrigen Bauelemente streichen konnte.

Heute wartet die Elektronik mit ganz anderen Zahlen auf. Mehrere hundert Bauelemente können wir in einem Farbfernsehempfänger zählen, Hunderttausende in den elektronischen Geräten an Bord eines Großflugzeugs, mehr als eine Million in manchen elektronischen Datenverarbeitungsanlagen.

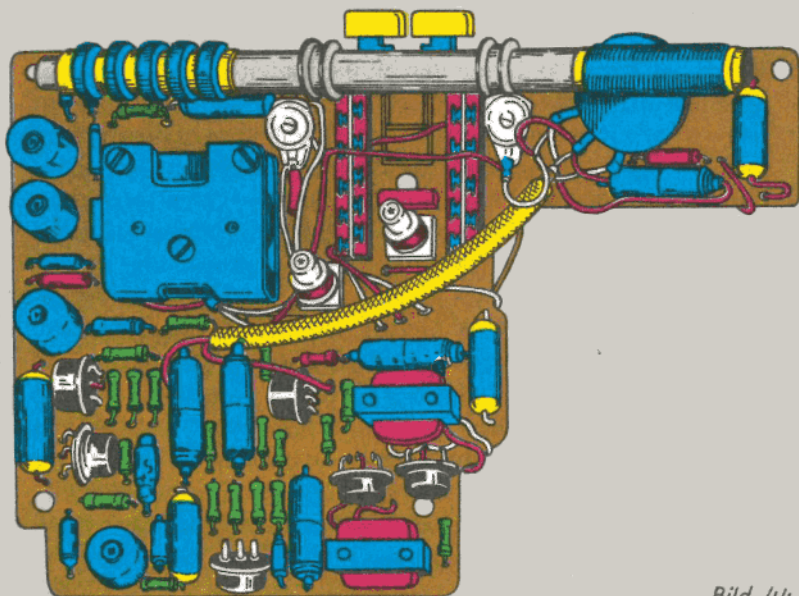
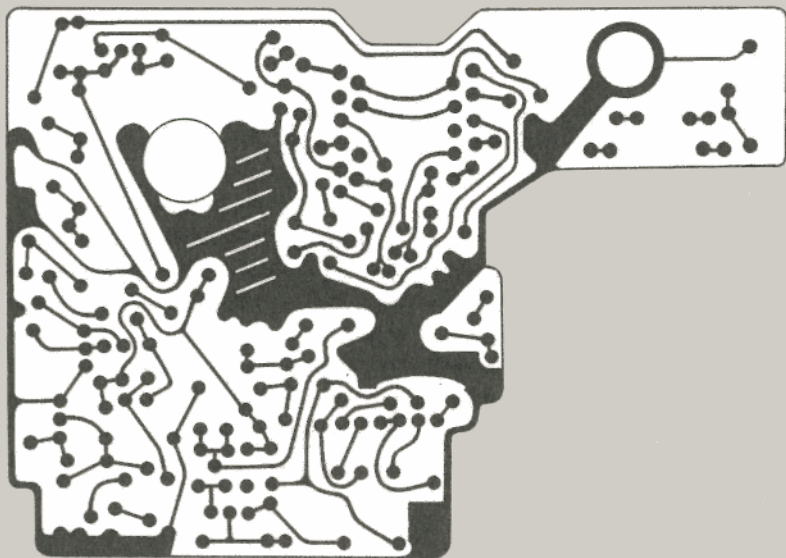
Mit Bauelementen und der Bauweise von 1925 oder 1935 gäbe es keine moderne Elektronik. Der „Taschenempfänger“ hätte Maße und Masse eines Fernsehgerätes, elektronische Rechenautomaten würden ganze Gebäudekomplexe füllen und dabei längst nicht leisten, was für unsere Rechenzentren selbstverständlich ist. Die Raumfahrttechnik gar, bei der jedes eingesparte Gramm Masse und jeder

120

Kubikzentimeter voll ausgenutzter Raum eine große Rolle spielten, wäre mit diesen Rechenautomaten undenkbar. Je vielfältigere und umfangreichere Aufgaben elektronische Geräte zu erfüllen hatten, desto enger mußten ihre Bauelemente und Baugruppen zusammenrücken, desto kleiner und leichter mußten sie werden. Doch es gab noch andere, mindestens ebenso wichtige Gründe für die Entwicklung der *Mikroelektronik*, die inzwischen Verstärker und andere Schaltungen auf die Größe einer Erbse oder eines Reiskorns schrumpfen ließ.

Je vielseitiger elektronische Geräte einsetzbar waren, desto mehr von ihnen wurden verlangt – in der Funktechnik, in der Industrie, in der Steuerungs-, Regelungs-, Meß- und Datenverarbeitungstechnik. Der Bedarf konnte nicht gedeckt werden, solange jedes Bauelement von Hand eingelötet, jede Drahtverbindung für sich gebogen und angebracht werden mußte; wobei man überdies riskierte, daß sich in das scheinbare Durcheinander roter, grüner und gelber Verbindungen Schaltfehler oder „kalte“, früher oder später versagende Lötstellen einschlichen.

Man mußte lernen, mit gleichem Arbeitsaufwand mehr Geräte herzustellen, nach Möglichkeit automatisch, und die Zuverlässigkeit elektronischer Schaltungen entscheidend zu erhöhen. Denn je mehr Bauelemente in einem Gerät zusammenwirken, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß das Gerät durch den Ausfall eines dieser Bauelemente funktionsuntüchtig wird. Auch der Energieverbrauch elektronischer Geräte wurde mit zunehmender Anzahl der Bauelemente schließlich untragbar. Bereits eine Elektronenröhre verbrauchte mehrere Watt, von denen der größte Teil nur das Gerät unnötig erwärmte. Anlagen mit Tausenden Elektronenröhren waren daher nicht nur eine Belastung für die Energieversorgung, sondern erforderten aufwendige Kühlanlagen, um die Wärme abzuführen.



Die Forderung nach kleineren, leichteren, zuverlässigen und wenig Energie verbrauchenden Baugruppen, Bauelementen und Geräten versuchen die Elektronikfachleute seit mehr als zwei Jahrzehnten zu erfüllen.

Das erste Resultat ihrer Bemühungen kennen wir alle: In einem modernen Fernseh- oder Rundfunkempfänger finden wir 1 oder 2 dm² große Platten aus Hartpapier, auf deren einer Seite kupfern schimmernde Linien und Flächen zu erkennen sind. Sie schließen Tupfen aus Lötzinn ein oder enden an ihnen. Betrachten wir die Plattenrückseite, sehen wir, daß jeder Tupfen mit einem Bauelement verbunden ist, dessen Anschlußdrähte oder -fahnen durch Bohrungen zur Vorderseite führen. Wir haben eine *gedruckte Schaltung* (Bild 44) vor uns, deren Linien an Stelle des früher üblichen Drahtgewirrs die Bauelemente verbinden.

Der Entwurf einer gedruckten Schaltung entsteht, gegenüber der endgültigen Ausführung vielfach vergrößert, auf dem Zeichenbrett und wird anschließend fotografisch verkleinert, und zwar gleich vielfach neben- und untereinander. Oft enthält ein Negativ die Bilder von hundert und mehr einzelnen Schaltungen. Mit Hilfe der verkleinerten Schaltungsbilder wird eine Hartpapierplatte bedruckt, die mit einer dünnen Kupferfolie überzogen ist. Danach wird die Platte einem Ätzbad ausgesetzt. Es löst das Kupfer ab, wo es nicht von der ätzfesten Druckfarbe geschützt wird. Die mit Druckfarbe bedeckten *Leitungszüge* bleiben stehen, und nachdem auch die Druckfarbe beseitigt wurde, enthält die *Leiterplatte* alle Verbindungen der elektronischen Schaltung als leitende Kupferstreifen. Über 1 000 solcher Platten, jede mit zahlreichen Einzelschaltungen, stellt eine moderne Druckmaschine in der Stunde her. Schaltfehler sind ausgeschlossen, da jede Platte eine genaue Kopie aller anderen ist.

Die Bestückung mit Bauelementen beginnt damit, daß man

an den künftigen Verbindungsstellen zwischen Bauelementen und Leitungszügen Löcher bohrt – nicht einzeln nacheinander, sondern mit Hilfe programmgesteuerter Maschinen gleichzeitig.

Aus Gurten oder aus einem Magazin werden die Bauelemente der Rückseite der Leiterplatte zugeführt. Ihre Anschlüsse werden automatisch durch die für sie bestimmten Löcher gesteckt, auf der Seite der Leitungszüge gekürzt und rechtwinklig abgebogen.

Zum Verlöten der Bauelementenanschlüsse werden die Leitungszüge mit einer Maske abgedeckt, die nur die künftigen Lötstellen freiläßt. Die so vorbereitete Leiterplatte wird in ein Bad aus flüssigem Zinn gesenkt, bis die Verbindungsstellen vom Zinn benetzt werden. Hunderte Lötstellen, eine so exakt wie die andere, entstehen in einem Arbeitsgang. Die fertige Schaltung wird automatisch auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft.

Um den Platz über und unter einer gedruckten Schaltung zu nutzen, schuf man die *Modul-* und die *Mikromodultechnik* (Bild 45). Wir teilen eine Leiterplatte in mehrere gleich große Teile, die übereinandergestapelt werden – so etwa überlegten die Techniker. Ihr Vorhaben wurde dadurch erleichtert, daß viele Schaltungskombinationen (z. B. ein, zwei Widerstände und ein Kondensator) sich häufig wiederholen. Warum sollten sich diese immer wieder benötigten Schaltungskombinationen nicht auf automatisch und in großer Stückzahl billig herzustellenden Leiterplättchen aufbringen und diese Plättchen zu Baugruppen zusammenstellen lassen?

Etwa 2,5 cm × 2,5 cm maßen die aus Keramik hergestellten Plättchen der Modultechnik. Jedes trug ein oder mehrere Bauelemente, deren Anschlüsse, aufgedruckt oder eingebraunt, zu metallüberzogenen Kerben am Plättchenrand führten. Mehrere Plättchen, das oberste meistens mit der Fassung für eine der damals, um 1950, benutzten

Röhren, wurden übereinandergesetzt. In die Kerben legte man steife Drähte ein, verlötete sie mit den Kerben – fertig war die Modulbaugruppe.

Wo 1950 nur Röhren verfügbar waren, setzte man keine fünf Jahre später Halbleiterbauelemente ein. Aus der Modultechnik wurde die Mikromodultechnik entwickelt, mit nur noch etwa $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ großen Keramikplättchen, auf die Widerstände in Form von Schlangenlinien und Spulen in Form von Spiralen aufgedruckt oder in die Plättchen eingebrannt wurden. Die luft- und feuchtigkeitsdichte Mikromodulbaugruppe war kaum größer als ein Stück Würfelzucker. „Alt“ aber wurde auch die Mikromodultechnik nicht. Sie wurde von *integrierten Schaltungen* abgelöst.

Integrierte Schaltungen erfüllen, wovon Elektronikfachleute seit langem „träumten“; Die Bauelementedichte, die Zahl der in einem bestimmten Raum unterzubringenden Bauelemente, konnte auf etwa $1000\text{ Bauelemente/cm}^3$ erhöht werden – noch vor zwanzig Jahren benötigte ein Bauelement im Durchschnitt 10 cm^3 . Die Masse „gleichwertiger“ Schaltungen verminderte sich auf etwa 1%, ebenso der Energiebedarf. Die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer vervielfachten sich, weil zahlreiche Löt- und Verbindungsstellen wegfielen und sich die integrierte Schaltung gegen äußere Einflüsse völlig abschließen läßt. Vor allem aber kann man integrierte Schaltungen mit Hilfe automatisierter Fertigungsverfahren in großer Stückzahl und in gleichbleibender Qualität herstellen.

Von außen sieht eine integrierte Schaltung recht „harmlos“ aus: ein flaches Plastkästchen oder ein Transistorgehäuse mit Anschlüssen – das ist alles. Nehmen wir eine integrierte Schaltung auseinander und betrachten sie durch die Lupe – was schon deshalb nötig ist, weil die ganze Schaltung oft nur wenige Quadratmillimeter groß ist –, so können wir von der uns „gewohnten“ Elektronik eben-

falls nicht viel entdecken, allenfalls eine oder mehrere winzige Dioden oder Transistoren. Sie sind auf einer Glas- oder Keramikfläche befestigt, die metallisch oder grau schimmernde Linien und Flächen trägt.

Trotzdem stellt jedes dieser Gebilde eine arbeitsfähige elektronische Schaltung dar, etwa eine Und-Verknüpfung, eine Verstärkerstufe, eine Schaltung zur Gewinnung und Verarbeitung von Impulsen. Bauelemente und Verbindungsleitungen werden aber nicht aus vorher produzierten Teilen zusammengesetzt, sondern entstehen *gemeinsam* in einer Folge von Herstellungsschritten, die häufig auf Hunderte integrierter Schaltungen gleichzeitig angewandt werden. Nur als Übergangslösung werden gegenwärtig noch einzelne Bauelemente von außen und nachträglich zugesetzt.

Jede integrierte Schaltung bildet eine Einheit. Man kann keines ihrer Bauelemente reparieren oder verändern; bei einem Defekt muß die gesamte integrierte Schaltung ausgetauscht werden.

Zwei Hauptrichtungen können wir gegenwärtig unterscheiden: die der *Filmschaltkreise* und die der *Festkörperschaltkreise*.

Filmschaltkreise sind „entfernte Verwandte“ der gedruckten Schaltungen: Auf Isoliermaterial – Glas oder Keramik – werden Bauelemente und Verbindungsleitungen als dünne Schichten („Filme“) erzeugt. Verbindungsleitungen sind schmale Streifen aus gut leitendem Metall, etwa Silber oder Gold, während als Widerstände Streifen oder Flächen aus weniger gut leitenden Stoffen dienen. Kondensatoren mit ihren zwei „Platten“ und der isolierenden Schicht dazwischen erhält man durch Übereinanderschichten leitender und isolierender Flächen. Die Verbindungen entstehen während des Herstellungsprozesses (eine Kondensatorplatte mit ihrem Anschluß z. B. wird in „einem Stück“ und in einem Arbeitsgang hergestellt).

Filmschaltkreise in *Dickschichttechnik* – so genannt, weil die Schichten verhältnismäßig „dick“ (ganze 25 μm !) sind – verwenden meistens Keramikplättchen mit einer Fläche von einigen Quadratzentimetern als Trägermaterial. Auf dem Quadratzentimeter lassen sich etwa 5 Bauelemente unterbringen. Bauelemente und Leitungen werden im sogenannten Siebdruckverfahren hergestellt: Ein sehr feinmaschiges Netz wird mit einer Maske abgedeckt, in die etwa alle künftigen Leiterzüge eingearbeitet sind. Eine gut leitende Druckpaste wird durch Maske und Sieb gepreßt und druckt die Leiterzüge auf das Keramikplättchen. Nachdem die Leiterzüge, ähnlich wie Porzellanfarben, eingebrannt wurden, wird der Druckvorgang mit einer anderen Maske und anderer Paste, zum Beispiel für Widerstände, wiederholt usw.

Die *Dünnschichttechnik* (Bild 46), deren Trägermaterial meistens Glas ist, benutzt Schichten, die häufig nur Bruchteile eines Mikrometers „dick“ sind. Auch hier wendet man die „Maskentechnik“ an. Durch die Aussparungen der Masken schlägt sich verdampft oder zerstäubtes Metall oder anderes Material auf dem Trägerplättchen nieder. Die Bauelemente sind kleiner und rücken dichter zusammen als bei der Dickschichttechnik. Etwa 100 Bauelemente lassen sich heute auf einem Quadratzentimeter Trägermaterial unterbringen. Wegen der Feinkörnigkeit der aufgetragenen Teilchen sind Dünnschichtschaltungen zuverlässiger, in ihren elektrischen Werten genauer und stabiler als Schaltungen der Dickschichttechnik.

Nicht alle Bauelemente lassen sich in Filmschaltkreisen erzeugen. Kondensatoren großer Kapazität oder Spulen mit vielen Windungen zum Beispiel muß man, wenn sie sich durch Änderung der Schaltung nicht überhaupt umgehen lassen, nachträglich zusetzen. Das gilt besonders für Dioden und Transistoren. Daher versucht man seit Jahren, Dünnschicht-Halbleiterbauelemente herzustellen.

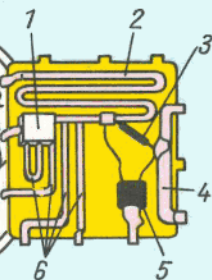
Sie stehen in Laboratoriumsausführung zwar bereits zur Verfügung, bedürfen aber noch der technischen Verbesserung. Deshalb werden bis heute in serienweise produzierten Filmschaltkreisen die Halbleiterbauelemente nachträglich ergänzt und dann mit dem Filmschaltkreis im gemeinsamen Gehäuse „verkappt“ (Hybridtechnik).

Bei Festkörperschaltkreisen (Bild 47) gibt es keine Schwierigkeiten mit Halbleiterbauelementen, da ihr Ausgangsmaterial kein isolierender Stoff, sondern halbleitendes Silizium ist, aus dem auch Dioden und Transistoren angefertigt werden. Etwa $1 \dots 10 \text{ mm}^2$ groß und $0,1 \dots 0,2 \text{ mm}$ dick sind die Siliziumplättchen, in denen die Bauelemente, bis zu 20 je mm^2 , erzeugt werden.

Man wendet dabei Verfahren an, die sich seit Jahren bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen bewährten: Durch äußerst genau gearbeitete Masken dringen zum Beispiel fünf- oder dreiwertige Atome als „Störstellen“ in genau bestimmter Zahl und bis zu bestimmter Tiefe in das Halbleitermaterial ein und führen n- oder p-Leitung herbei, schaffen pn-Übergänge usw.

Wie aber entstehen andere Bauelemente? Die Leitfähigkeit eines Halbleiters läßt sich durch Einbringen von Störstellen in weiten Grenzen ändern. Also legt man, um einen Widerstand herzustellen, eine Maske auf, durch deren Aussparung so lange Fremdatome in das Silizium dringen, bis der Bereich unter der Aussparung den gewünschten Widerstandswert hat.

Etwas schwieriger ist die Erzeugung von Kondensatoren. Man nutzt dabei eine von Halbleiterdioden bekannte Eigenschaft aus. Wenn eine Halbleiterdiode „sperrt“, also so angeschlossen wird, daß kein Strom hindurchfließt, sind p- und n-Gebiet durch einen Bereich sehr großen Widerstandes, durch einen „beinahe isolierenden“ Bereich, getrennt. Das aber ist die Anordnung Leiter–Isolator–Leiter, auf der jeder Kondensator beruht. Braucht



- 1 Kondensator
- 2 Widerstand
- 3 Diode
- 4 Widerstand
- 5 Transistor
- 6 Widerstände

Bild 45

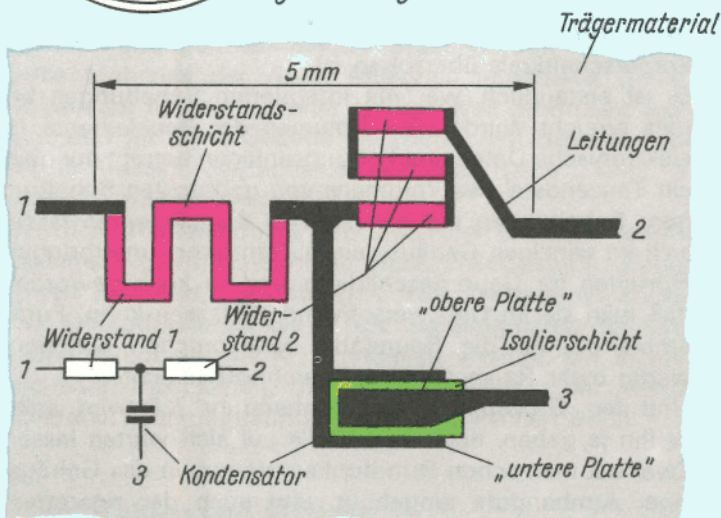


Bild 46

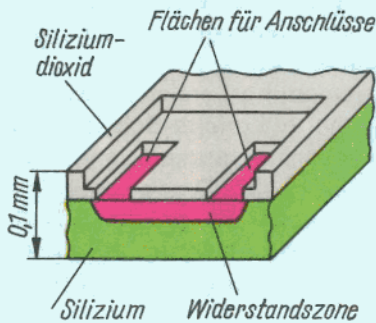
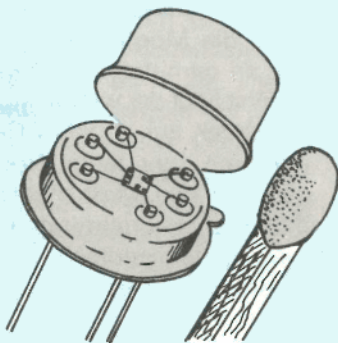


Bild 47



man daher in einem Festkörperschaltkreis einen Kondensator, so stellt man „eigentlich“ eine Diode her, nutzt aber nur ihre Kondensatoreigenschaft aus.

Verbindungen zwischen den Bauelementen kann man häufig dadurch sparen, daß man Bauelemente – etwa eine Diode und einen Widerstand – unmittelbar aneinandergrenzen läßt. Ist das nicht möglich, bringt man Metallfilme als Verbindung auf der schützenden und zugleich isolierenden Siliziumdioxidschicht an, mit der der Festkörperschaltkreis überzogen ist.

Es ist erstaunlich, was mit integrierten Schaltungen bereits erreicht wurde: Das Volumen der Bauelemente für elektronische Datenverarbeitungsanlagen beträgt nur noch ein Tausendstel des Volumens von gedruckten Schaltungen; Schaltungen mit nahezu 100 Bauelementen lassen sich im winzigen Gehäuse eines Transistors unterbringen; Hörhilfen für Gehörgeschädigte sind so klein geworden, daß man sie im Ohr „verschwinden“ lassen kann. Funkempfänger für die Raumfahrt beanspruchen nur noch wenig mehr Raum als eine Streichholzschachtel.

Und der „Großsuper in der Armbanduhr“? Er wird, sollte es ihn je geben, noch eine Weile auf sich warten lassen. Zwar hat man schon Rundfunkempfänger in das Gehäuse einer Armbanduhr eingebaut, und auch der zigaretten-schachtelgroße Fernsehempfänger ist keine Zeitungsente – aber bei diesen und anderen Geräten wollte man vor allem die Möglichkeiten der Mikroelektronik demonstrieren, an unmittelbare Anwendung dachte man kaum.

Vorerst liegt der wichtigste Anwendungsbereich der Mikroelektronik auf anderen Gebieten. Integrierte Schaltungen erfordern sehr teure Produktionseinrichtungen, angefangen von den Maskensätzen bis zu den Druck- oder Bedampfungseinrichtungen. Nur wenn die gleiche Schaltung vieltausendfach produziert wird, steht sie zu einem erträglichen Preis zur Verfügung. Integrierte Schaltungen

sind besonders gut für die Verarbeitung binärer Signale geeignet, bei denen nur zwei Signalzustände unterschieden werden. Auch können integrierte Schaltungen – gerade wegen ihrer geringen Abmessungen – nur sehr kleine elektrische Leistungen aufnehmen.

Das alles sind Bedingungen, die von der Steuerungs- und Regelungstechnik sowie von der elektronischen Datenverarbeitungstechnik mit ihren immer wiederkehrenden Grundschaltungen am besten erfüllt werden. Die über große Mehrzahl der vielen Millionen integrierter Schaltungen, die in jedem Monat auf der Welt produziert werden, sind für diese Gebiete bestimmt, zum Beispiel auch die in unserer Republik entwickelte Reihe „KME 3“ (komplexe Mikroelektronik).

Daß die Mikroelektronik aber auch bei der Verarbeitung analoger Signale zunehmend größere Bedeutung erlangt, zeigen integrierte Schaltungen, zum Beispiel Verstärker oder Demodulatoren, die in Nachrichtengeräten mit Baustufen herkömmlicher Art kombiniert werden. Mit Sicherheit kann man sagen, daß die Entwicklung der Mikroelektronik noch ungeahnte Fortschritte machen wird.

Daten, Zahlen und Modelle

Viele tausend Bürger machten sich vor dem Bildschirm mit den Grundlagen der elektronischen Datenverarbeitung vertraut, die das Fernsehen der DDR als Thema eines Fernsehkurses gewählt hatte, und lernten vor allem die in der DDR entwickelte und in vielen Betrieben, Institutionen, Rechenzentren eingesetzte Datenverarbeitungsanlage „Robotron 300“ kennen. Fernsehstationen anderer Länder führen ähnliche Sendereihen durch.

Auch in die Lehrpläne unserer sozialistischen Berufsausbildung wurde die elektronische Datenverarbeitung auf-

genommen. Man kann kaum eine Zeitschrift zur Hand nehmen, ohne – und zwar in Beiträgen aus unterschiedlichsten Gebieten – auf Wörter zu stoßen wie „elektronische Datenverarbeitungsanlage“, „Digitalrechner“, „Prozeßrechner“ und andere Fachausdrücke aus der jüngsten Geschichte der Elektronik. Warum aber ist die elektronische Datenverarbeitung so wichtig?

Bis vor wenigen Jahrzehnten waren Techniker und Ingenieure vor allem bemüht, die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen zu unterstützen und zu vergrößern. Arbeits- und Werkzeugmaschinen „verstärkten“ seine Muskelkraft, Verkehrsmittel vervielfachten Reichweite und Geschwindigkeit seiner Fortbewegung und gaben ihm „Flügel“, Meßinstrumente „schärften“ seine Sinne.

Heute genügt das nicht mehr. Ebenso wie ein modernes Verkehrswesen „mit Fußgängergeschwindigkeit“ undenkbar wäre, könnten zahlreiche Aufgaben, die Wissenschaft, Technik, Organisation, Planung und Leitung stellen, nicht gelöst werden, wären wir nur auf Block, Bleistift, Rechenschieber und Tabellenbücher angewiesen. Dafür drei Beispiele:

1970/71 wurde in der DDR eine Volks-, Berufs-, Wohnraum- und Gebäudezählung durchgeführt. Viele Millionen Angaben, „Daten“, kamen zusammen und sollten, sinnvoll ausgewählt und zueinander in Beziehung gesetzt, Tausende für Planung und Leitung der Volkswirtschaft wichtige Fragen beantworten: Wie viele Wohnungen, Kindergärten, Klassenräume brauchen wir in den nächsten Jahren? Welche Mittel müssen für Renten bereitgestellt werden? Wo bestehen günstige Voraussetzungen für den Aufbau neuer Betriebe?

Es ist nicht allzu schwierig, diese Antworten aus den eingegangenen Daten abzuleiten – aber es würde zu lange dauern. Selbst ein großes Arbeitskollektiv brauchte Jahre, um alle Angaben „von Hand“ herauszusuchen und aus-

zuwerten. Die meisten der daraus getroffenen Entscheidungen kämen aber viel zu spät; sie wären längst überholt. Hier konnten nur elektronische Datenverarbeitungsanlagen helfen. Mit kaum vorstellbarer Geschwindigkeit sortieren, wählen, verknüpfen sie größte Datenmengen nach allen nur verlangten Gesichtspunkten und verringern die Bearbeitungszeiten statistischen Materials von Jahren auf Tage.

Großbäckereien beliefern die Verkaufsstellen einer Bezirksstadt. Wie sieht der günstigste Transportplan aus, der Leerfahrten möglichst einschränkt, eine schnelle Belieferung sichert, besondere Wünsche der Verkaufsstellen berücksichtigt und Tragfähigkeit und technischen Zustand der Lieferwagen einbezieht?

Man könnte einen solchen Plan mathematisch exakt nach verhältnismäßig einfachen Regeln, aber unter gewaltigem Arbeitsaufwand aufstellen. Stapel Papier würden beschrieben; das Ergebnis läge erst nach Wochen vor – und wäre wahrscheinlich überholt, da sich diese oder jene Bedingungen für die Aufstellung des Transportplanes geändert haben. Eine elektronische Datenverarbeitungsanlage legt den Plan nach Stunden vor und kann notwendige Änderungen sofort einarbeiten. In ähnlichen Fällen wurde durch diese Methode mehr als die Hälfte der Transportkosten gespart. Wie groß wird erst der Nutzen, wenn man das Verfahren, wie es bei uns geschieht, auf noch umfassendere Transportprobleme, etwa den Umlauf von Güterwagen anwendet!

Die Flugbahn einer Rakete soll bestimmt werden – sei es, um ihren Kurs zu korrigieren, sei es, um sie zu vernichten. Hier gehen verhältnismäßig wenige Daten – etwa von den beobachtenden Radarstationen – ein, aber diese Daten müssen komplizierten mathematischen Operationen unterworfen werden, um Werte für Flugbahnkorrekturen oder Abwehr zu liefern. Selbst die besten Rechner wären

diesmal überfordert – ehe sie eine Rechenschiebereinstellung vornähmen, hätte die Rakete Kilometer zurückgelegt. Nur elektronische Datenverarbeitungsanlagen können mit solchen Geschwindigkeiten Schritt halten.

Für eine sozialistische Volkswirtschaft, in der über die eigenen Grenzen hinaus Betriebe und Institutionen der Bruderländer zum Nutzen aller zusammenarbeiten, sind die Möglichkeiten der Datenverarbeitung besonders wertvoll. Denn nur die schnelle Unterrichtung über verschiedenartigste Vorgänge, die Bewältigung der mit wachsender Zusammenarbeit immer dichter werdenden Informationsmenge, der rasche Datenaustausch geben die Möglichkeit, schnell sachkundige Entscheidungen zu treffen, erlaubt uns, ohne unnützen Aufwand mehr und besser zu produzieren und dabei jüngste Forschungsergebnisse unverzüglich zu berücksichtigen.

Die Rechenanlagen der Beispiele sind, wie „Robotron 300“, oder „ES 1040“, sogenannte *Digitalrechner* (Bild 48). Sie werden normalerweise mit Ziffern, Buchstaben und Zeichen „gefüttert“ und antworten auf gleiche Weise. Ihre oft fast unheimlich anmutenden Leistungen verdanken sie ihrem Arbeitsprinzip und ihrem Arbeitstempo: Jede Aufgabe, jedes Problem wird in eine Folge einfacher Schritte zerlegt. Nach einem ihm eingegebenen, aus „Befehlen“ aufgebauten *Programm* vollzieht sie der Digitalrechner – bei den modernsten Anlagen mit einer Geschwindigkeit von mehreren Millionen einfacher Operationen je Sekunde.

Der Digitalrechner verarbeitet *binäre* Signale, Kombinationen aus Impulsen, die nur durch die Zustände „Spannung vorhanden – Spannung nicht vorhanden“ gekennzeichnet sind. Alle einzugebenden Ziffern, Buchstaben und Zeichen müssen daher zunächst verschlüsselt, das heißt in binäre Impulskombinationen verwandelt werden. Das zunächst ebenfalls binär vorliegende Ergebnis wird

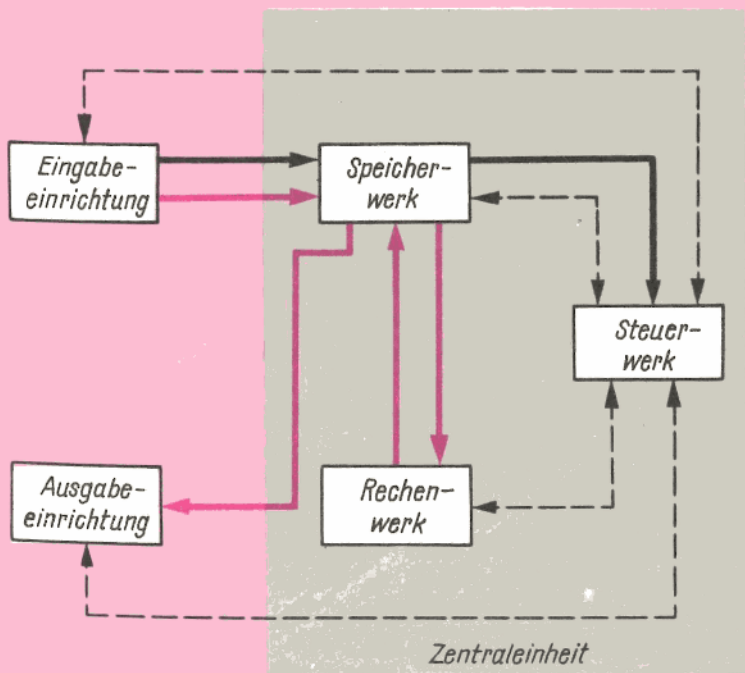


Bild 48

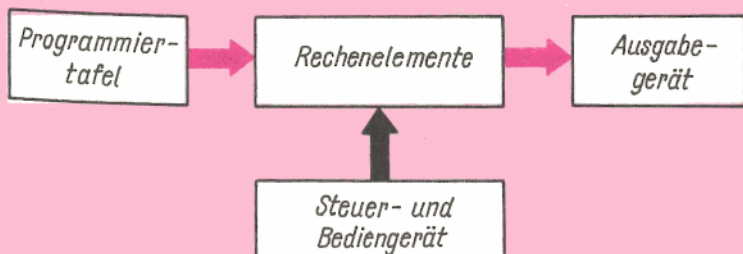


Bild 49

wieder in die uns gewohnten Zeichen rückübersetzt (beim Ver- und Entschlüsseln spielen häufig die uns bekannten Und- und Oder-Verknüpfungen eine wichtige Rolle).

Die *Zentraleinheit*, Kernstück des Digitalrechners, hat es also nur mit Impulsen zu tun. Im *Hauptspeicher* zum Beispiel magnetisieren sie häufig kleine „Ferritringe“, die, zu vielen Tausenden in bestimmter Weise angeordnet, das „Gedächtnis“ des Rechners darstellen. Der Hauptspeicher „merkt“ sich die Ausgangsdaten für Berechnungen, Zwischenergebnisse, Endresultate und die vom Programm vorgeschriebenen Befehle. Jedes Zeichen hat „seinen“ Platz im Speicher, von dem es bei Bedarf „abgerufen“ wird.

Im *Rechenwerk* wird addiert, subtrahiert, multipliziert, dividiert, werden durch das Programm vorgeschriebene (programmierte) Verknüpfung ausgeführt. Das übernehmen vor allem Schaltungen, die wir bereits kennenlernten: Und-, Oder- und Nicht-Verknüpfung sowie Kombinationen daraus.

Das *Steuerwerk*, auch *Leitwerk* genannt, sorgt dafür, daß alle Vorgänge im Digitalrechner in der richtigen Reihenfolge ablaufen; es entnimmt dem Hauptspeicher die Befehle und veranlaßt das Rechenwerk, sie auszuführen.

Peripheriegeräte stellen die Verbindung zwischen Rechenanlage und Umwelt her. Zu ihnen zählen vor allem Einrichtungen, mit deren Hilfe dem Digitalrechner Daten eingegeben oder mit deren Hilfe Ergebnisdaten ausgegeben werden. Als Eingabegeräte finden wir elektrische Schreibmaschinen, Fernschreiber, mitunter Registrierkassen, Lochkarten-, Lochband- und Magnetbandleser, manchmal auch Geräte, die normale Schriftzeichen erkennen können. Zur Ausgabe dienen wieder elektrische Schreibmaschinen, Fernschreiber, ferner Apparaturen zum „Stanzen“ von

136

Lochkarten und Lochbändern, außerdem Schnelldrucker, von denen manche in der Sekunde bis zu 1000 Zeilen wiedergeben können. Manchmal erscheinen die Ergebnisse als Kurven oder Diagramme auf den Bildschirmen von Elektronenstrahlröhren oder werden von einem Schreibkopf aufgezeichnet, der von den Ergebnisdaten gesteuert wird.

Geräte zur Datenfernübertragung auf dem Funk- oder Drahtweg dienen der Ein- und Ausgabe von Daten über beliebige Distanzen oder der Zusammenarbeit mehrerer Digitalrechner, während zusätzliche Speicher ihr „Gedächtnis“ vergrößern.

Wundert uns nach dieser nicht einmal annähernd vollständigen Aufzählung, daß Rechenanlagen manchmal über eine Million Bauelemente – Dioden, Transistoren, Widerstände usw. – enthalten? Müssen wir noch einmal daran erinnern, daß erst die Mikroelektronik, vor allem die Einführung integrierter Schaltungen, die raschen Fortschritte der elektronischen Datenverarbeitung ermöglichte? Diese Fortschritte drücken sich auch in immer neuen Anwendungsmöglichkeiten aus. Die Auswertung von statistischem Material, Lohn- und Materialberechnungen, die Führung von Konten, das Aufstellen und Ausschreiben von Rechnungen sind fast schon „alt“. Dazu kommen *Prozeßrechner*, die im Betrieb von zahlreichen Meßwandlern einlaufende Daten beobachten, kontrollieren und verknüpfen, daraus Kommandos für Maschinen und Aggregate ableiten und so ganze Produktionsanlagen nicht nur einwandfrei, sondern sogar so steuern, daß bei geringstem Aufwand das beste Ergebnis erzielt wird.

Man kennt Datenverarbeitungsanlagen, die bei der Sammlung, Auswahl und Ordnung geschriebener und gedruckter Informationen helfen, Kataloge und Stichwörterlisten zusammenstellen, „auf Abruf“ Literatur zu einem bestimmten Thema liefern, Fachtexte aus fremden Sprachen

übersetzen und dem Arzt auf Anfrage die Symptome auch der seltensten Krankheiten nennen.

Mit manchen Anlagen können wir bereits „diskutieren“: Eine Frage wird – zum Beispiel mit der Schreibmaschine – eingegeben, sofort erscheint die Antwort. Wir können Zusatzfragen stellen, Ergänzungen anfordern – die Maschine antwortet mit Text, einer Zeichnung, einem Diagramm. Sie „widerspricht“ uns sogar, wenn wir uns irren und wenn die Möglichkeit, unseren Fehler zu erkennen, in ihrem Programm vorgesehen war.

Analogrechner wurden nicht so „berühmt“ wie Digitalrechner, zu Unrecht, denn auch sie sind unentbehrlich. Sie verarbeiten stetig veränderliche Signale und sind vor allem im Bereich der Wissenschaft und Technik zu Hause.

Ein Energienetz mit zahlreichen Kraftwerken, Umspann- und Verteilerstationen wird projektiert. Wie wirkt sich eine Störung aus, was geschieht, wenn mehrere zusammentreffen? Unter welchen Bedingungen arbeitet das Netz am stabilsten? Man kann das nicht ausprobieren, und nicht immer reichen die an anderen Anlagen gewonnenen Erfahrungen für eine sichere Voraussage.

Welches ist die beste Form für die Tragflächen eines neuen Flugzeugtyps? Wie muß ein Konstruktionsteil aussehen, das bei geringstem Materialverbrauch möglichst hoch belastbar ist? Es gibt Windkanal-, Zerreiß-, Biege- und Bruchversuche, aber am schnellsten und wirtschaftlichsten käme man zum Ziel, wenn man Änderungen ohne Zeitverlust vornehmen, ihren Einfluß sofort erkennen und daraus weitere Korrekturen ableiten könnte. Das ist nicht möglich, wenn zwischendurch neue Modelle und Probeausführungen gebaut werden müssen.

In solchen Fällen verwendet man zur Lösung der Probleme einen *Analogierechenautomaten* (Bild 49). Er bildet das zu untersuchende Problem durch ein Modell nach – aber nicht durch ein Modell, das etwa zeigt, wie die Trag-

fläche aussieht, sondern durch ein elektrisches Modell, das erkennen läßt, wie sie sich bei bestimmten Vorgängen, unter verschiedensten Einflüssen verhält. Voraussetzung für ein solches Modell ist, daß für Verhalten des Originals und des Modells die gleichen mathematischen Gesetzmäßigkeiten gelten. Dann lassen sich aus dem Verhalten des Modells Rückschlüsse auf das Verhalten des Originals ziehen.

Die Gesetzmäßigkeiten der Stromerzeugung und -verteilung, die Spannungs-, Strom- und Leistungsbeziehungen im Energienetz seien bekannt. Man ahmt sie im kleinen nach, ersetzt zum Beispiel die Kraftwerke durch Spannungsquellen, die Fernleitungen durch Widerstände. Dann genügt es, Widerstände zu verändern, um zu erfahren, was etwa die Folgen einer Netzüberlastung wären, man braucht nur einen Schalter umzulegen, um ein Kraftwerk „ausfallen“ zu lassen.

Das Zusammenstellen des Modells ist „Baukastenarbeit“. Die Bausteine sind elektronische *Rechenelemente*; das sind oft entsprechend abgewandelte Ausführungen besonders stabil arbeitender Verstärker. Sie addieren, multiplizieren, subtrahieren, dividieren und können sogar Operationen der Differential- und Integralrechnung ausführen. Mit *Funktionsgeneratoren* (sie enthalten unter anderem Dioden und Widerstände) lassen sich innerhalb einer bestimmten Zeitspanne verlaufende Vorgänge, etwa das Ansteigen einer Spannung, einer Belastung oder einer Temperatur, nachahmen.

Die Bausteine werden für die jeweilige Untersuchung durch Steckerschnüre auf der sogenannten Programmier-tafel miteinander verbunden. Die Lösung des Problems erscheint als stehendes Bild auf dem Bildschirm eines Elektronenstrahloszillographen; sie kann aber auch von einem Schreibkopf aufgezeichnet oder nach Umwandlung in digitale Signale als Tabelle gedruckt werden.

Analogrechner bewähren sich vor allem dort, wo Bewegungsvorgänge, sich verändernde Vorgänge überhaupt, untersucht werden sollen und es nicht auf übergroße Genauigkeit ankommt (sie beträgt etwa 0,1 bis 1% und reicht für die meisten Zwecke völlig aus). Sie „modellieren“ Strömungen und Schwingungen, das Verhalten von Fahrzeugen, werden in der Erdbebenforschung und in der Wetterkunde eingesetzt, stellen Eisenbahnfahrpläne auf und können, wenn sie mit Steuerungseinrichtungen gekoppelt sind, als Prozeßrechner eingesetzt werden. Man kann mit ihnen kritische Situationen, sogar Katastrophenfälle modellieren, ihre Auswirkungen und Abwehrmaßnahmen untersuchen und Vorgänge schneller oder langsamer als in Wirklichkeit ablaufen lassen, sozusagen im Zeitraffer- oder Zeitlupentempo.

Ein Pilot sitzt im Cockpit. Gelände und Instrumente zeigen ihm an, daß er sich seinem Ziel nähert. Da blinken Warnlampen, Feuerschein flammt auf: Ein Triebwerk ist in Brand geraten. Keine Sekunde vergeht, bis die Löschanlage in Betrieb gesetzt wird. Ein Signallämpchen zeigt das Überfliegen eines Funkfeuers; der Pilot meldet sich über Sprechfunk. Schon taucht weit voraus der Flugplatz auf. Doch beim Ausfahren des Fahrwerks klemmt das Bugrad. Blitzartig überdenkt der Pilot, was er für diesen Fall gelernt hat, und handelt entsprechend. Wenig später setzt er die Maschine vorsichtig auf. Sie schlingert und holpert ungewohnt, rollt aus und steht endlich. Trotz des Defekts ist eine Landung geglückt.

Eine Tür im Rücken des Piloten öffnet sich. „Na, runtergekommen sind Sie ja ganz ordentlich. Aber wir wollen das Ganze noch einmal machen, damit Sie erkennen, wie Sie die Maschine noch besser auf den Boden bringen.“ Der Pilot geht zur Tür, steht gleich darauf im Ausbildungsraum, neben sich das naturgetreue Modell des Cockpits, in dem er soeben die Landung „erlebte“.

Ausbildung am *Simulator* nennt man dieses moderne Verfahren zur Ausbildung von Piloten, Kraftfahrern und Navigationsoffizieren. Alles wird nachgebildet, vom Gelände unter dem Flugzeug bis zum Feuerschein, vom Funk-sprechverkehr bis zum Ausfahren des Fahrwerks, notfalls bis zum „Krachen“ bei einem ernstem Fehler des „Schülers“. Mittelpunkt dieser Anlagen ist ein Analogrechner. Er steuert die Bordinstrumente, den Projektor für die Darstellung des Geländes, den Feuerschein, die Lautsprecher und Tonbänder für Geräusche, Motoren für Rütteln und Vibrieren des Flugzeugs. Bedient wird er von einem erfahrenen Ausbilder, der absichtlich „Störungen“ veranlaßt, um seinen Schützling auch auf außergewöhnliche und gefährliche Situationen vorzubereiten, die in der Praxis nicht geübt werden können – den Fahrschüler im Sommer auf Glatteis oder Großstadtverkehr im Winter, den Raumfahrer oder Flugzeugführer auf plötzlich eintretende Zwischenfälle, den Navigationsoffizier auf die Meisterung eines gefährlichen Fahrwassers bei Nebel und Sturm. Auch bei der Umschulung auf einen anderen Flugzeug- oder Fahrzeugtyp, bei der Ausbildung von „Anlagenfahrern“ der Industrie und an vielen anderen Stellen ersparen Simulatoren Zeit und Kosten.

* * *

Am Beginn unseres Jahrhunderts kannte man die Elektronenröhre noch nicht. Heute gibt es Rundfunk, Fernsehen, Radar, Nachrichtensatelliten, Datenverarbeitung, Leistungselektronik und vieles andere mehr.

Am Ende unseres Jahrhunderts wird die Elektronik ein gutes Stück weiter vorangekommen sein: Kranke werden ständig von elektronischen Geräten überwacht werden; elektronisch gesteuerte Prothesen, Ersatz für ausgefallene Glieder und Organe, werden selbstverständlich sein.

Ohne Wartezeit wird man jeden Punkt der Erde von jedem

anderen telefonisch erreichen können; bei zahlreichen Fernsprechverbindungen wird unser Partner nicht nur störungsfrei zu hören, sondern auch zu sehen sein.

Auf den Bildschirmen der Wohnungen werden nicht nur Fernsehprogramme erscheinen, sondern Buchauszüge, Dokumente, Bilder, Zeichnungen, die wir von der nächsten wissenschaftlichen Bibliothek oder von einem zentralen Informationszentrum anfordern.

Vor einem Farbfernsehempfänger des Jahres 1973 werden wir dann ebenso überlegen lächelnd stehen wie heute vor einem Rundfunkempfänger von 1923.

Und in den Jahren 2020, 2050 . . . ? Was uns die Elektronik bis dahin bringen wird, wissen wir noch nicht. Sicher ist nur, daß für sie das gleiche gilt wie für jede Wissenschaft, für jede technische Disziplin: Es gibt kein Ende, keinen Schlußpunkt, solange sie zum Nutzen aller Menschen entwickelt und angewendet wird. Die sozialistische Gesellschaftsordnung, die sich in immer mehr Ländern durchsetzt, gibt uns die Gewißheit, daß auch dieses Ziel erreicht werden wird.

INHALT

Elektronen unterwegs	5
Von Wellen, Sendern und Empfängern	26
Tausende Kanäle – hunderterlei Funkdienste	37
Zwischen Dezimetern und Millimetern Wellenlänge	60
Messen – groß geschrieben	83
Schneller – genauer – zuverlässiger	98
Schaltungen unter dem Mikroskop	120
Daten, Zahlen und Modelle	131

Alle Rechte vorbehalten
Printed in the German Democratic Republic
Lizenz-Nr. 304-270/99/74-(20)
Gesamtherstellung: Interdruck Leipzig
1. Auflage
LSV 7821
Für Leser von 12 Jahren an
Best.-Nr. 629 086 7
EVP 3,-

Ohne Elektronik gäbe es weder Rundfunk noch Fernsehen, wären Raumfahrt und moderne Datenverarbeitung nicht möglich. Kaum ein Berufszweig wird künftig ohne sie auskommen können. Dies alles ist Grund genug, sich mit Wesen und Wirkung der Elektronik bekannt zu machen.

