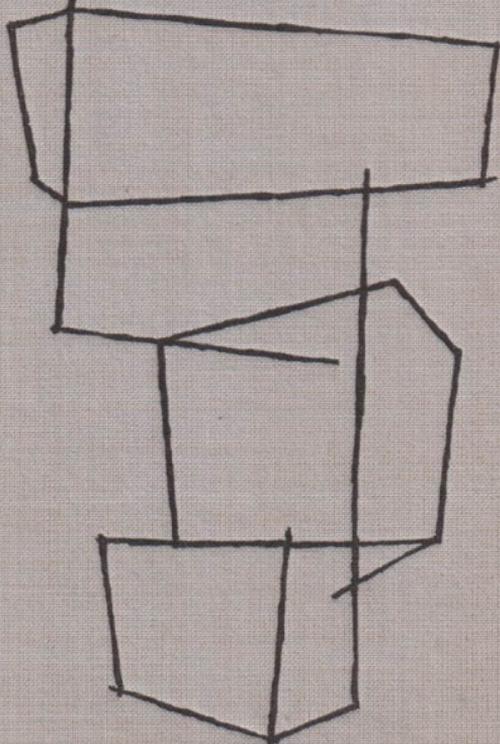


*Halbleiter-  
technik*



WALTER CONRAD

# Streifzüge durch die Halbleitertechnik

LEIPZIG · JENA · BERLIN



## WAS SIND HALBLEITER?

### Radios aus dem Schmelztiegel?

Es ist 20 Uhr; das Fernsehspiel beginnt. Sie winkeln den linken Arm an, drücken einen Stift an Ihrer Armbanduhr und setzen sich eine Art Sonnenbrille auf. Vor Ihren Augen erscheint, hell und gestochen scharf, das Fernsehbild; den Ton hören Sie aus dem Brillenbügel.

Ihr Betrieb hat sich die neueste elektronische Rechenanlage angeschafft. Sie erledigt nicht nur sämtliche Berechnungen des Konstruktionsbüros, hält nicht nur viele Tausende technischer Daten, Formeln und Informationen griffbereit, sondern übernimmt auch die Lohnabrechnung, die Buchführung und verwaltet das Materiallager. In der „Freizeit“ aber übersetzt sie, gewissermaßen um sich nicht zu „langweilen“, wissenschaftliche Fachtexte, Referate und Forschungsberichte ins Deutsche oder, wenn Sie wollen, auch in eine der Weltsprachen.

Verständlicherweise wollen Sie wissen, wie dieser Elektronengigant aussehen mag. Wo wird man die gewaltige, komplizierte Anlage untergebracht haben, in einer Zimmerflucht, in einem Saal? Die Überraschung ist groß: Dort in der Ecke, nicht größer als eine Fernsehtruhe aus dem Jahre 1962, steht die neue Rechenmaschine.

Sie besichtigen einen Betrieb der Elektronikindustrie. Es wundert Sie nicht sonderlich, daß die Besuchergruppe, der Sie sich angeschlossen haben, mehr Personen zählt als die Belegschaft des Betriebes. Das ist schließlich in vielen Produktionsstätten so; denn auch sie sind automatisiert, und wo sich früher zahllose Hände regten, ist heute nur der Ingenieur vom Dienst mit ein, zwei Technikern anwesend. „Und dieser Automat produziert Verstärker für Fernsprechämter, für Funkempfänger, für medizinische Zwecke und für die Regel- und Rechentechnik; zweitausend Stück in jeder Stunde!“, sagt man Ihnen, und Sie sehen: Aus einem Schmelztiegel mit flüssigem Germanium schiebt sich ein wenige Millimeter breites, glänzendes Band. Es wächst schnell, mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 30 cm in jeder Minute. Das Band verschwindet wieder im Inneren des Automaten. Daß auch weiterhin etwas geschieht, erkennen Sie nur am Spiel farbiger Kontrollämpchen, am Ausschlagen von Instrumentenzeigern und an leuchtenden Kurven



auf dem Schirm eines Oszillographen. An der Rückseite des Automaten wird das Band erneut sichtbar. Eine Vorrichtung, einer Schere nicht unähnlich, schneidet es in kleine Schnitzel. Sie fallen auf ein Transportband, verschwinden noch einmal und tauchen dann, mit drei oder vier Drahtenden versehen, endgültig auf.

„Dieses Kästchen in meiner Hand enthält fünfhundert Kleinstverstärker“, erklärt Ihnen der Ingenieur, auf einen der „Schnitzel“ deutend, „ich schließe einen Lautsprecher, ein Mikrophon und diese reißnagelgroße Batterie an... da, schon funktioniert er! Sie können aber die Batterie auch weglassen und den Verstärker in die Sonne stellen, das genügt. Übrigens – wenn Sie in zwei Monaten wiederkämen, könnten Sie sich einen Automaten ansehen, der auf ähnliche Weise wie dieser hier einfache Rundfunkempfänger herstellt.“

Auch wenn Sie bei dem, was die Technik in den vergangenen Jahrzehnten an großartigen Leistungen vollbracht hat, das Staunen schon verlernt haben, wird Ihnen doch wohl unglaublich erscheinen, was wir hier beschrieben. Fernsehempfänger in der Armbanduhr? Großrechenanlagen, die sich mit einer Hand heben lassen? Verstärker vom „laufenden Meter“, sozusagen „aus der Retorte“? So etwas mutet Ihnen ja nicht einmal ein Autor utopischer Erzählungen zu!

Doch wahrscheinlich können Sie das alles in zwölf, vielleicht schon in zehn Jahren miterleben; denn diese neue Technik hat ihre ersten Schritte bereits hinter sich gebracht. Das Zauberwort, mit dem Atomphysiker, Halbleiterspezialisten und Elektronikingenieure sie beschwören, heißt Molekularelektronik. In ihr vereinigen sich die jüngsten Ergebnisse der Atom- und Halbleiterforschung, und niemand kann auch nur abschätzen, welche Auswirkungen für die Technik und für unser Leben das Zusammengehen dieser beiden jungen Wissenschaften eines Tages haben wird.

Die ältere Schwester der Molekularelektronik, die Halbleitertechnik, hat in den vergangenen Jahren schon recht gut laufen gelernt. Längst wurden Halbleiter unsere anspruchslosen, zuverlässigen Helfer und Begleiter. Sie sind im Spiel, wenn wir das Radio oder den Fernsehempfänger anstellen; denn im Koffergerät und im Taschenempfänger haben Transistoren den Platz der Elektronenröhren eingenommen, und im „großen“ Empfänger sind Halbleitergleichrichter beteiligt, uns Bild und Ton ins Haus zu bringen.

Wenn unser Elektrorasierer schnurrt, versorgt ein kleiner, eingebauter Halbleitergleichrichter den Motor mit der richtigen Stromart. Die Temperatur in den Fächern des Kühlschranks kann ein Halbleiterbauelement auf dem gewählten Wert halten. Im Handgriff des „Elektronenblitzers“ verbergen sich Halbleiterbauelemente. Es gibt sogar Armbanduhren, deren Werk nicht mehr von der Energie einer gespannten Feder, sondern von einer winzigen Batterie getrieben und deren Lauf von einem Transistor kontrolliert wird.



Halbleiterbauelemente steuern die Verkehrsampeln, schalten die Straßenlampen pünktlich ein und aus und lassen Schaufensterbeleuchtungen immer dann aufflammen, wenn sich ein Schau-lustiger nähert. Hunderte Herzranke verdanken es der Halbleitertechnik, daß sie fast wie Gesunde leben und arbeiten können. Sie tragen ein unauffälliges, zigaretenschachtelgroßes Gerät an der Hüfte oder in der Tasche. Es enthält eine kleine elektrische Batterie, Widerstände und Kondensatoren, wie sie in jedem Rundfunkempfänger zu finden sind, und zwei oder drei Transistoren. Sie erzeugen elektrische Impulse, die den Herzschlag aufrechterhalten und im richtigen Takt steuern. Diese „Schrittmacher“ zählen vielleicht zu den großartigsten Erfolgen der Halbleitertechnik; doch sie sind nur eine von vielen Anwendungsmöglichkeiten der Halbleiter in der Medizin.

In unseren Wohnstätten, im täglichen Leben überhaupt haben sich Halbleiter bereits einen festen Platz erobert. Wieviel mehr gilt das für Betriebe und Forschungsstätten!

Halbleitergeräte überwachen die Temperatur in Silos, Bunkern und Lagerräumen; Halbleitergeräte messen die Feuchte und prüfen die Farbe von Rohstoffen; Halbleitergeräte zählen und sortieren fertige Produkte und wachen darüber, daß Maschinen und Fertigungsstraßen Rohmaterial mit den vorgeschriebenen Eigenschaften und Abmessungen zugeführt wird.

Halbleitergeräte verhindern, daß Pressenstempel, Messer oder andere Werkzeuge in Tätigkeit treten, solange sich ein Mensch in gefährlicher Nähe befindet. Halbleiter sind mehr und mehr beteiligt, wenn Maschinen oder Maschinenaggregate Arbeitsgänge exakt nach einem vorbestimmten Programm ausführen, Maßabweichungen selbsttätig beseitigen und bei Störungen Alarmsignale auslösen.

In Rechenanlagen helfen Halbleiter, in Minuten oder Sekunden Aufgaben zu bewältigen, zu deren Lösung bisher ein Menschenalter nicht ausgereicht hätte; sie befreien ein Heer von Rechnern von langweiligen, ermüdenden Arbeiten, übernehmen die kompliziertesten Buchungen, „verwalten“ umfangreiche Warenlager, stellen Statistiken, Tabellen und Diagramme auf und werten sie für die verschiedensten Zwecke aus.

Das und noch viel mehr können mit Halbleitern bestückte Anlagen bereits heute.

Und morgen? In den nächsten Jahren wird sich die Zahl der automatischen Taktstraßen vervielfachen; immer mehr Werke werden entstehen, die von der Anlieferung des Rohmaterials bis zum Versand des fertigen Produktes völlig selbsttätig arbeiten und nur von wenigen, aber hochqualifizierten Fachleuten überwacht werden. Steuer-, Regel- und Fernwirktechnik werden eine Bedeutung erlangen, die wir gegenwärtig noch kaum abzuschätzen vermögen. Ihre Geräte und Instrumente werden nicht ohne Halbleiterbauelemente auskommen.

Elektronische Übersetzungsmaschinen werden Fachtexte aus den Weltsprachen übertragen und nach allen nur gewünschten Gesichtspunkten ordnen. Erstmals wird dadurch die Forderung der Wissenschaftler und Techniker erfüllt werden, sich schnell und nahezu lückenlos über beliebige Spezialfragen informieren zu können, um Zeitverluste und Umwege in der Forschung und in der technischen Entwicklung zu vermeiden.

Im Verkehrswesen wird es mit Halbleiterbauelementen ausgerüstete Schutz- und Sicherheitsvorrichtungen geben, die Unfälle durch menschliches Versagen, sei es auf den Straßen, in der Luft, auf dem Wasser oder auf Schienenwegen, nahezu unmöglich machen. Von der Gefahrenbremse über den „stummen Lokomotivführer“ bis zur automatischen Steuerung der Schnellbahnnetze – in allen diesen Anlagen werden Halbleiter die „Heinzelmännchen“ sein.

Siedlungen, Expeditionslager und Baustellen, die weitab von den kontinentalen Energienetzen liegen, werden nicht auf Elektroenergie verzichten müssen: Halbleiterbatterien, die mit billigen Brennstoffen „geheizt“ werden oder Sonnenlicht als „Rohstoff“ verwenden, werden elektrischen Strom liefern.

In den Wohnungen werden uns Klimaanlage Luft gewünschter Temperatur und Feuchte spenden; Halbleiterinstrumente werden darüber wachen, daß die Anlagen ordnungsgemäß arbeiten und das ihnen auferlegte „Klimaprogramm“ einhalten.

Die unwirtschaftlichen Glühlampen werden neuen, großflächigen Lichtquellen weichen, in denen Halbleiterstoffe eine entscheidende Rolle spielen. Flache Fernsehbildschirme werden an der Wand hängen und in natürlichen Farben aufleuchten, wenn wir das kleine, mit Halbleitern bestückte Steuergerät bedienen.

Halbleitertechnik und Molekularelektronik werden es uns eines Tages ermöglichen, ein winziges drahtloses Telefon in die Tasche zu stecken, mit dem auch ein weit entfernter Partner jederzeit zu erreichen ist. Vielleicht wird eines Tages sogar ein kleiner Fernsehbildschirm zur Ausstattung solcher Geräte gehören.

Hoch über der Erde werden Satelliten kreisen, das Wetter beobachten, die Navigation in Luft- und Seefahrt erleichtern, Notrufe Schiffbrüchiger auffangen und weitergeben, Ferngespräche, Rundfunk- und Fernsehsendungen störungsfrei von Kontinent zu Kontinent übertragen. Ihre Energiequellen werden Halbleiterbatterien sein, ihre Geräte werden Halbleiter als wichtigste Bauelemente enthalten.

Vorstöße in den Weltraum werden auch künftig ohne Halbleitertechnik undenkbar sein: Sie wird die Nachrichtenverbindung zwischen Raumschiff und Erde sicherstellen; sie wird das Raumfahrzeug nach vorher festgelegtem Programm steuern und die Kosmonauten vor Gefahren schützen, die so plötzlich auftauchen, daß das menschliche Reaktionsvermögen nicht hinreicht, ihnen zu begegnen. Sie wird es möglich machen, selbsttätig arbeitende Beobachtungsstationen und Laboratorien auf unseren Nachbarplaneten und

später in den Weiten des Weltraumes einzurichten, und sie wird sich bewähren, wenn eines Tages „Funkfeuer“ auf den Planeten unseres Sonnensystems Raumfahrern den Weg zu fernen Welten zeigen werden.

Halbleiter prägen wesentliche Züge der Technik von heute; für die Technik von morgen werden sie von entscheidender Bedeutung sein. In unserem, dem sozialistischen Teil der Welt dient und nützt die Technik allen Menschen. Das verpflichtet uns, die Fortschritte der Technik in ihren Grundzügen und Möglichkeiten kennenzulernen und zu begreifen. Gerade die Halbleitertechnik, deren Bekanntschaft wir in diesem Buch machen wollen, hat den Wissenschaftlern und Ingenieuren Wege zur Lösung technischer Probleme gewiesen, von denen vor zwanzig Jahren niemand auch nur etwas ahnte. Diese Wege können um so eher eingeschlagen werden, je eher die Menschheit ihre Kräfte ausschließlich in den Dienst friedlicher Entwicklung stellt. Sie würden nie beschritten werden, wenn der Brand eines Kernwaffen- und Raketenkrieges weite Teile der Welt verwüstete.



## Die Mondgöttin und der Kristalldetektor

### Ein Grundstoff gibt Rätsel auf

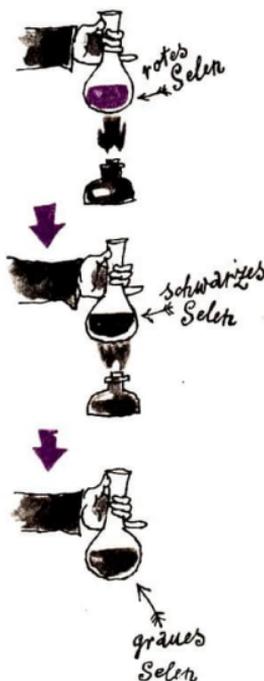
Wer immer sich mit Chemie beschäftigt, zieht seinen Nutzen aus einer großartigen Leistung des schwedischen Forschers Jöns Jacob Berzelius (1779 bis 1848); denn ihm verdanken wir die chemische Formelsprache, ohne die es Chemikern kaum möglich wäre, sich kurz, eindeutig und international verständlich auszudrücken.

Für uns ist jedoch hauptsächlich eine andere Entdeckung von Berzelius wichtig: Unter den Abfallstoffen der Schwefelsäureproduktion, im sogenannten Bleikammerschlamm, fand er einen bis dahin unbekanntem chemischen Grundstoff. Er taufte ihn in Anlehnung an den Namen der Mondgöttin „Selen“.

Das Selen erlangte zunächst keine große technische Bedeutung; doch sein ungewöhnliches Verhalten reizte dazu, sich mit ihm zu befassen. Es trat nämlich in drei verschiedenen Arten, in drei „Modifikationen“ auf:

Selen, das aus dem Bleikammerschlamm gewonnen wurde, war rot, zeigte Kristallstruktur und verhielt sich chemisch wie ein Nichtmetall. Schmolz man rotes Selen, um es anschließend rasch wieder abzukühlen, so entstand eine glasige, schwärzliche Masse. Erhitzte man das „schwarze“ Selen langsam, so wandelte es sich nochmals um und bildete „graues“ Selen, das sich wie ein Metall verhielt. Dieses graue, metallische Selen meinen wir immer, wenn im Verlauf dieses Buches vom Selen die Rede ist.

Metalle sind bekanntlich gute Leiter des elektrischen Stromes. Bei Untersuchungen am grauen Selen maß man jedoch eine so schlechte



Leitfähigkeit, daß man es kaum noch als „Leiter“ bezeichnen konnte.

Der Physiker Wilhelm Hittorf (1824 bis 1914) beobachtete, daß helles Sonnenlicht die Leitfähigkeit des Selens erhöhte. Doch Hittorf deutete diese Erscheinung nicht richtig. So wurde die technisch wichtigste Eigenschaft des Selens erst rund zwanzig Jahre später, nämlich 1873, wiederentdeckt. Es war dies die Zeit, in der man zahlreiche nationale Telegrafienlinien zu einem den ganzen Erdball umspannenden Nachrichtennetz verknüpfte.

Da das Verlegen von Unterseekabeln besonders schwierig und kostspielig war, arbeiteten der englische Telegrafeningenieur Willoughby Smith und sein Mitarbeiter May an einem Verfahren, Unterseekabel während des Auslegens ständig zu messen und zu kontrollieren. Den Meßinstrumenten mußten dabei Leiterstücke vorgeschaltet werden, die dem elektrischen Strom einen sehr hohen Widerstand entgegenseetzten. Auf der Suche nach einem geeigneten Widerstandsmaterial erprobten Smith und May auch Selen, von dessen schlechtem Leitvermögen sie wußten.

Selen hatte zwar den geforderten Widerstand, aber die Meßergebnisse befriedigten keineswegs. Manchmal stimmten sie gut mit den errechneten Werten überein; weit häufiger jedoch zeigten sich erhebliche Abweichungen. Was aber noch schlimmer war: Bei längeren Messungen pendelten die Instrumentenzeiger bisweilen langsam und unregelmäßig über die Geräteskalen.

Untersuchungen zeigten, daß das Selen schuld an diesem Mißerfolg sein müsse, und als man dem Übeltäter auf die Spur gekommen war, fand man auch bald das „Tatmotiv“: Selen war lichtempfindlich. Sein elektrischer Widerstand sank erheblich, wenn es hellem Licht ausgesetzt wurde; er betrug im Sonnenlicht nur noch einen Bruchteil des „Dunkelwiderstandes“. Eine erstaunliche Entdeckung, zeigte sie doch Zusammenhänge zwischen physikalischen Teilgebieten, die miteinander scheinbar nichts zu tun hatten.

Konnte man mit der Lichtempfindlichkeit des Selens „etwas anfangen“? Bereits Smith und May wollten ihre Beobachtung nutzen, um ein Lichttelefon zu konstruieren; sie erzielten jedoch keinen nennenswerten Erfolg.

Einen glücklicheren Einfall hatte zwei Jahre später Werner von Siemens (1816 bis 1892). Er konstruierte Selenzellen und schlug vor, sie als „objektive Fotometer“ zu benutzen. Objektiv nannte er seine Helligkeitsmesser, weil bei ihnen – abweichend von den bis dahin üblichen Lichtmessungen – das menschliche Auge als Meßinstrument ausgeschaltet wurde. Siemens bestimmte die durch Licht verschiedener Helligkeit bewirkte Widerstandsänderung einer Selenzelle und erhielt mit dem so geeichten Instrument Meßergebnisse, die nicht durch die Eigenschaften und Mängel des Auges beeinflusst wurden. Dieses Verfahren hat sich seitdem tausendfach bewährt, nicht zuletzt in der Fotografie; denn jeder elektrische Belichtungsmesser ist ein „objektives Fotometer“. Foto-



freunde wissen seinen Wert zu schätzen. Sogar ein ganz „moderner“ Gedanke wurde damals geboren: 1878 schlug ein portugiesischer Physiker vor, das lichtempfindliche Selen zur Verwirklichung des Fernsehens einzusetzen. Dieser Gedanke tauchte von da ab in fast allen Fernsehprojekten immer wieder auf und erlangte später größte praktische Bedeutung.

Selen ist, wie sich bald herausstellte, kein Einzelgänger. Es gibt eine Menge anderer chemischer Elemente und Verbindungen, die ebenfalls lichtempfindlich sind, z. B. Germanium, Silizium, Kupferoxydul, Kadmium- und Bleisulfid.

Selbstverständlich versuchte man, die Ursachen für die Lichtempfindlichkeit dieser Stoffe herauszufinden. Die verschiedensten Hypothesen entstanden, mußten aber wieder verworfen werden, weil sie zu Widersprüchen mit der Praxis führten. Erst Atomphysik und Quantentheorie brachten Klarheit über die lichtelektrischen Erscheinungen.

Nur eines war schon bald sicher: Den elektrischen Leitern konnte man das Selen und die übrigen lichtempfindlichen Materialien gewiß nicht zurechnen. Je eingehender man sie erforschte, desto größere Unterschiede zeigten sich. So galt z. B. für Metalle die Regel: Je höher die Temperatur, desto größer der elektrische Widerstand. Auch beim Selen gab es eine Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit, nur – Selen reagierte gerade umgekehrt wie metallische Leiter: Sein Widerstand verminderte sich mit steigender Temperatur rasch.

Nichtleiter, Isolatoren, waren das Selen und die anderen lichtempfindlichen Stoffe aber auch nicht, denn sie leiteten den elektrischen Strom, wenn auch schlecht.

Offensichtlich war man durch die lichtelektrischen Erscheinungen auf eine Stoffgruppe gestoßen, die eine Art Zwischenstellung zwischen Leitern und Isolatoren einnahm: Die untersuchten lichtempfindlichen Stoffe waren, wie wir heute sagen, *Halbleiter*.

### **Kristallplitter helfen der Funktechnik**

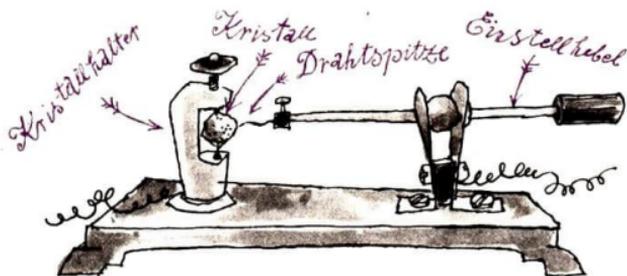
Auch von einer anderen Seite her traf man auf Halbleiter. In die Zeit um die Jahrhundertwende fallen die Anfänge der Funktechnik. Zur Herstellung sicher funktionierender drahtloser Verbindungen brauchte man – damals wie heute – nicht nur leistungsfähige Sender, sondern vor allem empfindliche Empfänger. Zu ihrer Konstruktion fehlte anfänglich ein „Detektor“, ein Instrument, das die von den Funkwellen im Empfänger hervorgerufenen Wechselströme so umformte, daß sie im Kopfhörer wahrzunehmen waren. Technisch ausgedrückt, handelt es sich dabei um eine Gleichrichtung (siehe S. 32).

Man erinnerte sich, daß bereits 1874 Ferdinand Braun (1850 bis 1918), dem wir die „Braunsche Röhre“, die Urform der Fernsichtbildröhre, verdanken, den gewünschten Effekt an Metall-Schwefel-

Verbindungen beobachtet und in den „Annalen der Physik“ beschrieben hatte. Wegen ihres elektrischen Verhaltens waren auch diese Verbindungen den Halbleitern zuzuzählen.

Man griff die Arbeiten Brauns wieder auf, und 1906 erschienen die ersten „Kristalldetektoren“. Fast alle waren nach dem gleichen Prinzip konstruiert: Einem Kristallstückchen aus halbleitendem Material – Eisenkies, Bleiglanz, Silizium, später hier und da auch Germanium – saß mit leichtem Druck eine feine Drahtspitze auf. An der Übergangsstelle Metall–Kristall wurde der Wechselstrom umgeformt.

Kristalldetektoren fanden schnell weite Verbreitung. Sogar in den Anfangszeiten des Rundfunks, als die Verstärkerröhre längst erfunden war, konnten sie sich noch behaupten.



Allerdings traten auch bald ernste Mängel zutage: Die Wirksamkeit eines Detektors war von Punkt zu Punkt der Kristalloberfläche verschieden. Die günstigsten Stellen mußten durch Probieren mühsam aufgesucht werden; sie vorher zu bestimmen, war nicht möglich. Wegen der lose aufsitzenden Drahtspitze waren Kristalldetektoren sehr empfindlich gegen Erschütterungen; auch genügten bereits Spuren von Feuchtigkeit oder Schmutz, die Eigenschaften der Kristalloberfläche zu verschlechtern.

Trotz aller Bemühungen gelang es nicht, den Kristalldetektor entscheidend zu verbessern; die vielen verschiedenen Ausführungen, die auf dem Markt erschienen, entsprangen vor allem dem Profitstreben geschäftstüchtiger Fabrikanten, weniger einer technischen Notwendigkeit.

Den Wissenschaftlern aber erging es mit dem Kristalldetektor ähnlich wie einige Jahrzehnte vorher mit dem Selen: Niemand wußte zu sagen, warum der Detektor funktionierte und was an der Übergangsstelle Metall–Kristall wirklich vorging. Noch vor zwanzig Jahren, als bereits die ersten Fernsender und Tausende von Radargeräten arbeiteten, heißt es in einem weltbekannten Lehrbuch der Hochfrequenztechnik: „Zur Erklärung des Verhaltens des Kristalldetektors sind vier verschiedene Theorien entstanden.“ Einige Seiten danach muß der Autor feststellen: „Welche von den vier

Theorien richtig ist, ist noch nicht restlos entschieden.“ Heute wissen wir, daß keine der vier Theorien stimmt.

Der Kristalldetektor konnte verständlicherweise nicht systematisch verbessert werden, solange seine Wirkungsweise unerklärt blieb. Um so höher sind Einzelerfolge mancher Wissenschaftler zu bewerten. Der sowjetische Forscher Lossew entwickelte die „Cristodynschaltungen“, in denen Kristalldetektoren schwache Wechselspannungen nicht nur wahrnehmbar machten, sondern auch verstärkten. Später gelang es Lossew sogar, mit Kristalldetektoren Funkwellen zu erzeugen. Doch die Vorteile, die die Einführung der Radoröhren mit sich brachte, waren so entscheidend, daß die Cristodynschaltungen, die wir als Vorläufer ganz moderner Entwicklungen ansehen können, wieder in Vergessenheit gerieten.

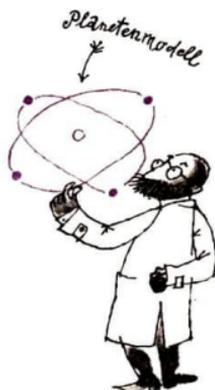
Noch an dritter Stelle halfen die Halbleiterstoffe dem Techniker, ohne daß er genau beschreiben konnte, wie dies vor sich ging. Sehr oft müssen in der Technik Wechselströme in Gleichströme verwandelt werden. Drückt man eine Kupferoxydul- oder eine Selenschicht gegen eine Metallscheibe, so wirkt die Grenze Metall-Halbleiter unter gewissen Voraussetzungen ebenfalls als „Gleichrichter“. Während aber der Kristalldetektor nur sehr schwache Ströme verarbeiten kann, lassen sich mit Kupferoxydul- und Selengleichrichtern ohne Schwierigkeiten Ströme von vielen Ampere gleichrichten.

So wurden Millionen von Kupferoxydul- und später Selengleichrichtern produziert und in Geräten der Elektro- und Nachrichtentechnik eingesetzt, ohne daß man eine genaue Vorstellung von dem hatte, was sich an der Grenzschicht zwischen Metall und Halbleitern abspielte. Die Elektrotechnik brauchte diese Gleichrichter dringend und konnte nicht auf die hieb- und stichfeste Erklärung ihrer Funktion warten.

Die Vorgänge im Kristalldetektor und im Kupferoxydul- und Selengleichrichter wurden erst enträtselt, als die Physiker tief in die Geheimnisse vom Aufbau der Stoffe eingedrungen waren.

Wer, wie wir, Bekanntschaft mit der Halbleitertechnik schließen will, muß sich daher auch mit elementaren Tatsachen der Halbleiterphysik vertraut machen. Das wäre insofern nicht ganz einfach, als ein tiefes Eindringen in die Halbleiterphysik ein gerüttelt Maß an Kenntnissen voraussetzt. Doch keine Angst! Wir wollen vereinfachen, wo immer das zulässig ist, und wir werden in großem Umfange von anschaulichen Modellvorstellungen und Vergleichen Gebrauch machen.

Damit greifen wir auf eine Methode zurück, die sich gerade in der Naturwissenschaft immer wieder bewährt hat: Man erklärt unbekannte Erscheinungen durch ein möglichst einfaches „Modell“. Es wird mit fortschreitender Erkenntnis immer mehr verfeinert und dem tatsächlichen Vorgang angepaßt. Denken wir hier nur an das geradezu berühmte, im Laufe der Jahrzehnte vielfach abgewandelte „Planetenmodell“ des Atoms oder an die Vorstellung von den „Kraftlinien“ eines Magneten!



Erst wenn ein Modell nicht mehr „ausreicht“ oder wenn es zu Widersprüchen mit dem tatsächlichen Geschehen führt, muß man sich von ihm trennen. Das ist den Naturwissenschaftlern schon oft widerfahren; auch wir werden Beispiele dafür kennenlernen.

## Halbleiter leiten anders

### Elektronen auf Wanderschaft

Ehe wir uns in die „Geheimnisse“ der Halbleitertechnik vertiefen, müssen wir wissen, warum überhaupt manche Stoffe, die Leiter, den elektrischen Strom gut leiten, während andere, die Isolatoren, ihm den Weg verlegen.

Elektrischer Strom ist die gemeinsame Bewegung einer großen Zahl kleinster, elektrisch geladener Teilchen. Man nennt sie Elektronen und hat vereinbart, ihrer Ladung ein negatives Vorzeichen (-) zu geben. Elektronen sind also negativ elektrisch. Bereits an sehr schwachen Strömen sind fast unvorstellbar viele Elektronen beteiligt. Um ein Taschenlampenbirnchen aufleuchten zu lassen, sind in jeder Sekunde rund 2 Trillionen Elektronen notwendig.

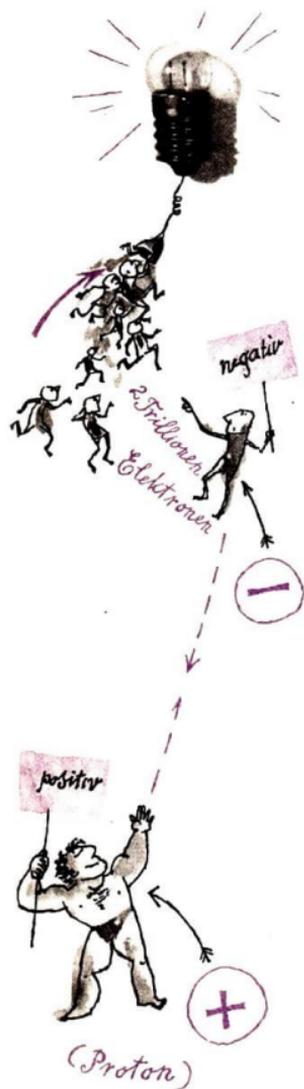
Elektronen sind keine „besondere Substanz“; im Gegenteil: Sie gehören zu den elementarsten und „gewöhnlichsten“ Bausteinen unserer Welt und sind normalerweise in jedem Atom anzutreffen. Sie sitzen aber nicht unverrückbar fest, sondern umrunden auf bestimmten Bahnen und mit rasender Geschwindigkeit den Atomkern.

Der Atomkern enthält ebenfalls elektrische Ladungen. Sie werden von den sogenannten Protonen getragen und verhalten sich, was ihre elektrischen Eigenschaften anbelangt, umgekehrt wie die negativen Elektronen. Deshalb spricht man den Protonen eine positive (+) Ladung zu. Positive und negative Ladungen ziehen einander an, und eben diese Anziehungskräfte zwingen die Elektronen auf ihre Bahnen. Normalerweise halten sich im Atom die positiven und negativen Ladungen die Waage: das Atom zeigt dann nach außen keine elektrische Wirkung.

Während Protonen nur mit den gewaltigen Apparaturen der Kernphysik aus dem Atomkern herausgeschlagen werden können, lassen sich Elektronen relativ leicht von einem Atom abtrennen oder zusätzlich in ein Atom „einbauen“.

Fehlen einem Atom Elektronen, so überwiegen die positiven Ladungen im Kern; das Atom erscheint positiv elektrisch, ist aber bestrebt, die fehlenden Elektronen zu ergänzen und damit in den elektrisch neutralen Zustand zurückzukehren. Zusätzliche Elektronen hingegen verursachen ein nach außen hin negativ elektrisches Atom; diesmal sucht das Atom den Normalzustand wiederherzustellen, indem es die überschüssigen Elektronen abstößt.

Auch sämtliche Elektronen, die die Ströme der Elektrotechnik bil-



den, entstammen Atomen. Es gibt keine Möglichkeit, Elektronen aus anderen Stoffen „herzustellen“.

Wer sich auch nur ein wenig mit der Elektrotechnik befaßt hat, weiß, daß Strom nur in einem „Stromkreis“ fließt. Man könnte den elektrischen Stromkreis mit einer Warmwasserheizung vergleichen. Im Heizofen (Spannungsquelle) wird Wasser erwärmt, d. h., es wird ihm Energie zugeführt. Es fließt anschließend in verschiedene Heizkörper (elektrische Geräte), gibt dort seine Wärmeenergie wieder ab und strömt abgekühlt in den Heizofen zurück, wo es von neuem erwärmt wird. Dieser Kreislauf dauert an, solange die Heizung in Betrieb ist. Ständig strömt dabei das gleiche Wasser in der Heizung.

Auch im elektrischen Stromkreis sind stets die gleichen Elektronen in Bewegung. Wie das Wasser schon in den Röhren der Heizung enthalten ist und nur noch erwärmt und in Bewegung gesetzt wird, so sind auch die Elektronen des elektrischen Stromes bereits in den Leitern vorhanden; Aufgabe der Spannungsquellen ist es lediglich, sie in Bewegung zu setzen und ihnen „Energie aufzuladen“.

Die Atome eines Leiters, z. B. eines Kupferdrahtes, sind nicht „neutral“, sondern haben Elektronen abgegeben, wobei man im Durchschnitt mit einem Elektron auf ein bis zwei Kupferatome rechnen kann. Diese Elektronen sind also „frei“ und bewegen sich regellos zwischen den Kupferatomen.

Sobald der Leiter mit den Anschlüssen einer Spannungsquelle verbunden wird, finden wir neben der ungeordneten Elektronenbewegung noch eine Bewegung unter der Einwirkung der jetzt auftretenden elektrischen Kräfte. Die Elektronen wandern in Richtung zum positiven (+) Anschluß der Spannungsquelle; denn dort „fehlen“ Elektronen. Vom negativen (-) Anschluß her treten neue Elektronen in den Leiter ein; denn dort gibt es „zuviel“ Elektronen. Diese gleichgerichtete Elektronenbewegung nennen wir elektrischen Strom; die an ihm beteiligten, von den Metallatomen freigesetzten Elektronen heißen „Leitungselektronen“.

Gäbe es in Metallen nicht stets eine große Zahl Leitungselektronen, säßen alle Elektronen fest bei ihrem Atom, so könnte Metall den elektrischen Strom nicht leiten.<sup>1</sup>

Die Frage, was ein Isolator ist, beantwortet sich damit fast von selbst: Isolatoren sind Stoffe, in denen es keine oder doch nur sehr wenige Leitungselektronen gibt. Zu ihnen zählen viele Nichtmetalle und organische Verbindungen. Zahlreiche Laboratorien und Betriebe sind damit beschäftigt, immer bessere Isolierstoffe zu entwickeln und zu produzieren; denn es kommt in der Elektrotechnik nicht nur darauf an, dem Strom gute Wege zur Verfügung zu stellen, sondern es ist ebenso wichtig, zu verhindern, daß er von diesen Wegen abweicht.



frei  
und  
regellos

<sup>1</sup> Der Vollständigkeit halber sei gesagt, daß in Flüssigkeiten und Gasen neben den Elektronen auch die Atome selbst an der Stromleitung beteiligt sind. Doch ist diese Art der Stromleitung für uns uninteressant.

## Was im Germanium geschieht

Sind wir durch den Abstecher in die Elektrizitätslehre eigentlich klüger geworden, was die Vorgänge in Halbleitern betrifft? Ein wenig schon; denn jeder Leser wird richtig vermuten, daß auch bei der Elektrizitätsleitung in Halbleitern Leitungselektronen eine wichtige Rolle spielen und daß überdies ihre Zahl in Halbleitern im Verhältnis geringer ist als etwa in Kupferdrähten.

Doch wir müssen mehr über Halbleiter wissen. Wenn unsere Vermutungen auch richtig sind, so reichen sie z. B. nicht aus, zu erklären, warum die Leitfähigkeit des Selens von der Helligkeit abhängt oder weshalb Halbleiter dem elektrischen Strom einen um so geringeren elektrischen Widerstand entgegensetzen, je höher ihre Temperatur ist.

Tatsächlich ist für die Halbleitertechnik nicht allein entscheidend, daß es in Halbleitern weniger Leitungselektronen gibt und daß ihre Leitfähigkeit geringer ist als die von Metallen. Die Ursache für das Verhalten der Halbleiter ist vor allem, daß der Stromfluß durch Halbleitermaterialien anderen Gesetzmäßigkeiten gehorcht als der Stromfluß in einer Lichtleitung oder im Anschlußkabel des Bügeleisens.

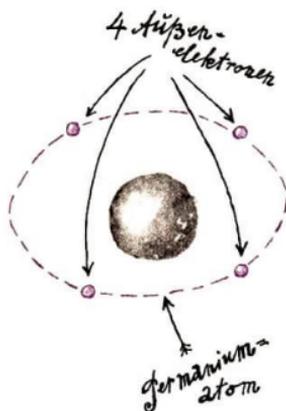
Uns bleibt daher nichts anderes übrig, als – aufbauend auf dem, was wir über Leitungselektronen jetzt wissen – die Vorgänge in Halbleitern zu untersuchen.

Der Stoff, der für die Halbleitertechnik gegenwärtig besonders wichtig ist, eignet sich auch vorzüglich dazu, die elektrischen Vorgänge in Halbleitern zu erklären. Wir meinen das chemische Element Germanium. Seine Existenz wurde um 1870 von dem russischen Forscher Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834 bis 1907) vorausgesagt. Dieser hatte bei der Aufstellung des Periodischen Systems der Elemente eine Lücke entdeckt, in die ein dem Silizium ähnliches, aber noch unbekanntes chemisches Element gehörte. Mendelejew konnte sogar einige Eigenschaften des hypothetischen „Eksasiliziums“ angeben. Fünfzehn Jahre später fand der Deutsche Clemens Winkler (1838 bis 1904) dieses Element und taufte es Germanium (Ge). Es steht im Periodensystem der Elemente in einer Gruppe mit den wichtigen Grundstoffen Kohlenstoff und Silizium und ist wie diese vorwiegend vierwertig.

Jedes Germaniumatom besitzt vier Valenzelektronen (Außenelektronen); das sind Elektronen auf der dem Kern fernsten Bahn. Im Ge-Kristall bildet je ein Außenelektron mit je einem Außenelektron eines benachbarten Germaniumatoms ein „Elektronenpaar“. Jedes Ge-Atom wird so an vier Nachbaratome gebunden. Es entsteht das charakteristische „Germanium-Kristallgitter“.

Da die perspektivische Darstellung eines Germaniumkristalls recht unübersichtlich würde, wollen wir uns mit einem flächenhaften Modell behelfen. Aus ihm geht die Hauptsache, die Bindung eines Germaniumatoms an vier Nachbarn, deutlich hervor.

Unser Modell, das einen stark vergrößerten Ausschnitt eines Ger-



manium-Kristallgitters darstellt, läßt erkennen; daß sämtliche Außenelektronen zur Bindung mit den Nachbaratomen „gebraucht“ werden. Leitungselektronen, die sich frei zwischen den Germaniumatomen bewegen könnten, gibt es nicht. Ein streng nach dem Modell gebauter Germaniumkristall könnte keinen elektrischen Strom leiten, sondern wäre ein Isolator.

In Wirklichkeit jedoch befinden sich die Atome des Kristalls wie die Atome jedes anderen Stoffes niemals völlig in Ruhe. Sie schwingen vielmehr ständig um bestimmte Ruhelagen. Je höher die Temperatur des Kristalls ist, desto heftiger sind diese Schwingungen; nur am absoluten Nullpunkt (also bei  $-273,16^{\circ}\text{C}$ ) wäre ein Germanium-Kristallgitter wirklich erstarrt.

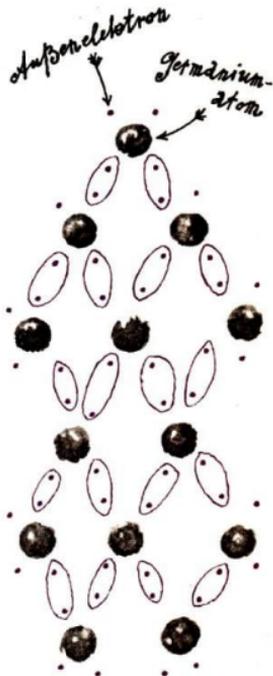
Durch das Schwingen reißen hier und da Bindungen zwischen den Germaniumatomen auf. Dabei wird jeweils ein Elektron freigesetzt und zum Leitungselektron „befördert“. Es bewegt sich regellos im Kristall, bis es an anderer Stelle „eingefangen“ wird und eine Lücke füllt, die von einem weiteren freigesetzten Elektron hinterlassen wurde. Dieser Vorgang wiederholt sich fortwährend und an vielen Stellen des Germaniumkristalls, so daß jederzeit eine gewisse Zahl von Leitungselektronen zur Verfügung steht.

Wir sollten uns durch unsere Modellvorstellung und dadurch, daß so oft von einzelnen Atomen und Elektronen die Rede ist, nicht täuschen lassen: An Vorgängen in Halbleitern sind stets sehr viele Atome und Elektronen beteiligt. Ein Kubikzentimeter Germanium besteht aus Trilliarden Einzelatomen, und bereits bei Zimmertemperatur gibt es in diesem Kubikzentimeter rund 30 Billionen aufgebrochene Bindungen und Leitungselektronen.

Wir haben bereits erwähnt, daß die Atome um so heftiger schwingen, je wärmer der Kristall ist. Bei kräftigeren Schwingungen aber werden mehr Bindungen aufgerissen als bei schwächeren. Das bedeutet: Je höher die Temperatur des Germaniumkristalls ist, desto mehr Leitungselektronen sind verfügbar, und desto größer ist seine elektrische Leitfähigkeit. Daraus erklärt sich, daß der Widerstand des Germaniums (und anderer Halbleiter) mit wachsender Temperatur abnimmt.

In Metallen dagegen schwirrt bereits bei Zimmertemperatur eine gewaltige Anzahl von Leitungselektronen umher. Es werden kaum mehr, wenn wir den Leiter weiter erwärmen. Nur die Atomschwingungen und die Elektronenbewegung nehmen an Stärke und Geschwindigkeit zu.

Da im Metall von vornherein viel mehr Leitungselektronen als in Halbleitern vorhanden sind, stoßen die Leitungselektronen bei steigender Temperatur immer öfter mit den Atomen des Leitermaterials zusammen; das läuft letztlich auf eine Behinderung der Elektronenbewegung, auf eine Widerstandszunahme hinaus. In Halbleitern spielen solche Zusammenstöße dagegen keine wesentliche Rolle.



## Halbleiterphysik an der Tankstelle

Was geschieht eigentlich an den Stellen, an denen eine Bindung aufgebrochen wurde? Dort fehlt ein Elektron, dort entstand ein „Loch“, das so lange erhalten bleibt, bis es von einem anderen Elektron geschlossen wird. Das Fehlen der negativen Elektronenladung wirkt sich wie eine positive Ladung aus; das Loch verhält sich, als säße an seinem Platz eine positive Ladung von der Größe der Elektronenladung. Aus diesem Grunde spricht man häufig von einem „positiven Loch“ oder auch von einem „Defektelektron“.

Wir würden uns nicht bei den Defektelektronen aufhalten, wenn sie nicht eine sehr bemerkenswerte Eigenschaft besäßen: Sie können, ähnlich wie „richtige“ Elektronen, durch den Halbleiter wandern. Wie das möglich ist, wollen wir uns zunächst an einem Beispiel klarmachen.

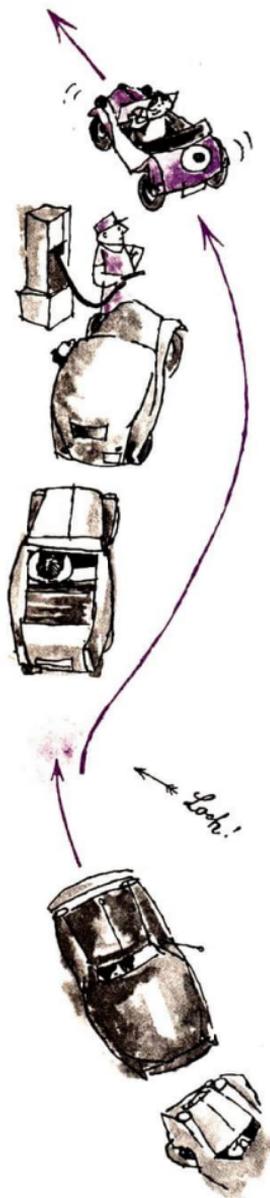
Es ist ein warmer Sommertag. Tausende sind unterwegs, und so hat sich in den Abendstunden eine lange Autoschlange an der Tankstelle des Ausflugsortes gebildet. Sie rückt nur langsam vor, so langsam, daß einem der Ausflügler das Warten zu lange dauert. Er schert mit seinem Wagen aus der Schlange, um sein Glück im nächsten Ort zu versuchen. Der Wagen hinterläßt einen leeren Platz. Allerdings nur für wenige Sekunden, denn dann schließt der Hintermann auf und hinterläßt seinerseits eine Lücke. Dies setzt sich durch die ganze Reihe fort: Wagen um Wagen rückt auf. Während die Fahrzeuge beim Aufrücken ein Stückchen vorankommen, wandert die Lücke in entgegengesetzter Richtung, zum Ende der Schlange.

Nehmen wir uns nun wieder den Germaniumkristall vor. Allerdings haben wir diesmal gegenüberliegende Flächen mit den Anschlüssen, den „Polen“ einer Spannungsquelle, verbunden. Von den Leitern her wissen wir bereits, daß die Leitungselektronen, wenn auch unter häufigen Kreuz- und Quersprüngen, zum positiven Pol wandern. Dabei können sie allerdings im Halbleiter in Löcher „fallen“, was ihr Ende als Leitungselektron bedeutet.

Das Bild zeigt in starker, schematisierter Vergrößerung einige „Momentaufnahmen“ von den Vorgängen im Germanium. In der oberen Skizze ist gerade eine Bindung aufgebrochen. Ein Elektron wird frei, bewegt sich als Leitungselektron durch das Kristallgitter und hinterläßt ein (positives) Loch.

In der mittleren Skizze wurde in der Nähe des Loches 1 eine weitere Bindung gelöst. Das freiwerdende Elektron gerät in die Nachbarschaft von Loch 1 und wird „eingefangen“. Damit ist Loch 1 zwar geschlossen; es entstand aber ein neues Loch (2). Wird, wie in der unteren Skizze gezeigt, nahe dem Loch 2 erneut ein Elektron frei, so kann es Loch 2 füllen und läßt ein Loch 3 zurück.

Dieser Vorgang, an dem in unserer Darstellung immer nur ein Elektron und ein Loch beteiligt waren, wiederholt sich in Wirklichkeit gleichzeitig millionen- und aber millionenfach. Dabei gilt, was wir am Einzelfall beobachteten: Die Löcher wandern in umgekehr-



ter Richtung wie die Elektronen. Da sich die Leitungselektronen unter dem Einfluß der angelegten Spannung dem positiven Pol nähern, bewegen sich die Löcher zum negativen Pol. Dort werden sie von Leitungselektronen aus dem Anschlußdraht der Spannungsquelle „aufgefüllt“. In Leitern sind solche Vorgänge nicht zu beobachten, da von vornherein die meisten Atome des Leiters Elektronen abgegeben haben.

Neben dem Elektronenstrom, wie er in Leitern auftritt, fließt in Halbleitern also noch ein „Löcherstrom“. Beide tragen zur Leitfähigkeit des Halbleitermaterials bei. Es versteht sich von selbst, daß es ebensoviel Leitungselektronen wie Löcher gibt; denn stets entsteht oder vergeht ein Elektronen-Loch-Paar.

Die Stromleitung wird hier nur durch die Vorgänge an Germaniumatomen ermöglicht. Deshalb spricht man von „Eigenleitung“ des Germaniums. Sie hängt – wir müssen noch einmal daran erinnern – von der Temperatur ab, eine Tatsache, die sich, wie wir erfahren werden, oft recht unangenehm bemerkbar macht.

### „Verunreinigungen“ nach Wunsch

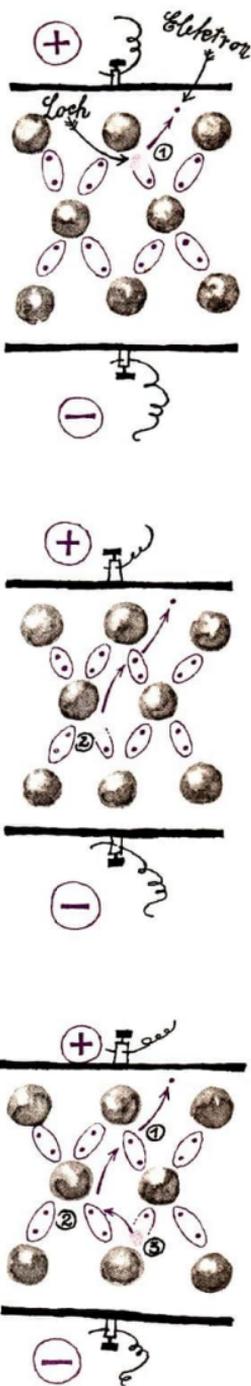
Die Eigenschaften eines Halbleiters kann man den verschiedensten, von der Technik geforderten Bedingungen anpassen.

Schon bei den ersten Untersuchungen am Selen, am Germanium und an anderen Halbleitern bemerkte man, daß die Reinheit der verwendeten Stoffe von entscheidender Bedeutung ist. Bereits geringfügigste, chemisch nicht mehr nachweisbare Verunreinigungen können in einem Halbleiter Veränderungen hervorrufen, die seine ursprünglichen Eigenschaften völlig überdecken. So treten z. B. im Germanium ganz neuartige Effekte auf, wenn auf eine Million Germaniumatome auch nur ein Fremdatom entfällt. „Reines“ Germanium, das Ausgangsmaterial für zahlreiche Halbleiterbauelemente ist, darf unter hundert bis tausend Millionen Atomen höchstens ein „fremdes“ Atom aufweisen, sonst ist das Material bereits „zu schmutzig“. Wären die Erbsen, die einst Aschenbrödel auszulesen hatte, ebenso „sauber“ gewesen, und hätte Aschenbrödel in jeder Sekunde drei Erbsen ins Töpfchen fallen lassen, so hätte es unter Umständen pausenlos fast elf Jahre arbeiten müssen, ehe es auf eine schlechte Erbse gestoßen wäre.

Daher ist das Reinigen des Ausgangsmaterials eines der wichtigsten Probleme bei der Produktion von Halbleiterbauelementen; wir werden darauf noch ausführlich eingehen.

So unangenehm natürliche Verunreinigungen wegen ihrer unkontrollierbaren Wirkung sein können, so nützlich erweisen sich „Verunreinigungen“, die man nachträglich in gereinigtes Halbleitermaterial „einbaut“. Diesmal hat man es in der Hand, welchen Stoff und wieviel davon man zusetzen will, und die Veränderungen der Halbleitereigenschaften bleiben unter Kontrolle.

Bauen wir also Fremdatome in einen Germaniumkristall ein, „do-





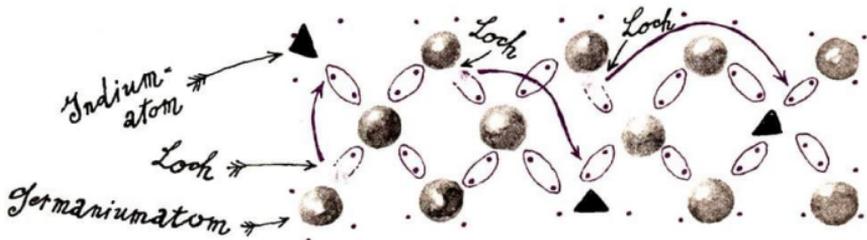
tieren" wir ihn z. B. mit Arsen. Arsen ist fünfwertig; von den fünf Außenelektronen seiner Atome werden aber im Germaniumkristall nur vier durch Nachbaratome gebunden; das fünfte findet keinen Elektronenpartner. Es hängt nur noch ganz lose an „seinem" Atom und ist bereits bei Zimmertemperatur zum Leitungselektron geworden. Da jedes Arsenatom ein Elektron abgibt, steigt die elektrische Leitfähigkeit des „dotierten" Germaniums an. Sie wird so groß, daß bei Zimmertemperatur ihr gegenüber die gleichzeitig vorhandene „Eigenleitung" kaum ins Gewicht fällt.

Da die Leitfähigkeit des dotierten Germaniums vor allem durch „Störstellen" im Kristall, nämlich durch Fremdatome, hervorgerufen wird, nennt man diese Art der Leitung „Störstellenleitung". Weil negative Elektronen die Leitfähigkeit hervorrufen, spricht man von „n-leitendem Germanium" oder auch kürzer von „n-Germanium". Die Arsenatome, die die Elektronen lieferten, heißen „Donatoren", Spender. An die Stelle des Arsens könnten auch andere fünfwertige Grundstoffe treten, z. B. Phosphor oder Antimon. Einen anderen Typ der Störstellenleitung erhalten wir, wenn wir Atome eines dreiwertigen chemischen Grundstoffes in den Germaniumkristall einfügen.

Sitzt ein Indium-, Bor- oder Aluminiumatom im Germaniumkristall, so fehlt an dieser Stelle ein Elektron zur vollständigen Bindung an die Nachbaratome; ein Loch entsteht. Es schließt sich zwar bald durch ein Elektron aus einem anderen Germaniumatom, doch wird dabei natürlich ein neues Loch aufgerissen, das dann wieder durch ein weiteres Elektron aufgefüllt wird. Liegt eine elektrische Spannung am Kristall, so wandern die Löcher zum negativen Anschluß der Spannungsquelle.

Selbstverständlich erhöht auch die große Zahl der durch den Zusatz dreiwertiger Stoffe vorhandenen Löcher die Leitfähigkeit des Germaniums. Da sie diesmal durch positive Löcher verursacht wird, spricht man von „p-leitendem Germanium" oder kurz von „p-Germanium". Die dreiwertigen, Elektronen aufnehmenden Atome heißen Akzeptoren.

Bei der Eigenleitung sind stets ebensoviel Leitungselektronen wie Löcher als „Ladungsträger" vorhanden. Bei Störstellenleitung ist dieses Gleichgewicht nicht mehr vorhanden: Im n-Germanium besteht ein Überschuß an Leitungselektronen, im p-Germanium dagegen ein Überschuß an Löchern.



## Thermometer, Temperaturen, Thermistoren

### Halbleiter als Temperaturfühler

Überall werden Temperaturen gemessen: vor dem Fenster, im Kühlschrank, in der Badewanne und im Krankenzimmer, an Heizanlagen, Kesseln, Motoren und Maschinenteilen, in Gewächshäusern, Lagerräumen und bei ungezählten Produktionsprozessen und wissenschaftlichen Untersuchungen.

Nichts scheint leichter zu sein als eine Temperaturmessung: Man bringt ein Thermometer an Ort und Stelle, liest es ab – fertig.

Nicht immer freilich ist das Temperaturmessen so einfach. So brauchen Thermometer eine gewisse Zeit, ehe sie sich auf die zu messende Temperatur eingestellt haben, eine Erfahrung, die jedermann beim Fiebermessen macht. Die Temperatur kleiner, leichter Körper läßt sich mit gewöhnlichen Thermometern nur schwer feststellen, weil diese dem Meßobjekt zuviel Wärme zuführen oder entziehen. Wollte man z. B. die Temperatur von ein oder zwei Kubikzentimetern einer Flüssigkeit in einem Reagenzglas bestimmen, so würde durch das Einbringen des Thermometers die Flüssigkeit so weit abgekühlt oder erwärmt, daß das Meßresultat ungenau wäre.

In der Produktionstechnik ist mit Thermometern, wie sie uns aus dem täglichen Leben bekannt sind, häufig überhaupt nichts anzufangen; denn sehr oft kann man Temperaturen nicht dort ablesen, wo sie festgestellt werden. Denken wir nur an die Temperatur im Feuerraum einer Kesselanlage! Deshalb sind Fernthermometer weit verbreitet. Ihr Arbeitsprinzip ist es, Temperaturänderungen in Änderungen eines elektrischen Stromes oder einer elektrischen Spannung umzuwandeln, die weitab von der eigentlichen Meßstelle durch Instrumente angezeigt werden.

Die sogenannten Widerstandsthermometer nutzen die Erscheinung aus, daß der Widerstand eines Leiters mit zunehmender Temperatur wächst. Sie bestehen aus einem dünnen Platin- oder Nickeldraht, der in ein Quarzrohr eingeschlossen und an die Meßstelle gebracht wird. Je höher die Temperatur des Drahtes in diesem „Temperaturfühler“ ist, desto mehr wird ein hindurchfließender Strom behindert. Die jeweilige Stromstärke wird gemessen und auf einer Skala angezeigt, die unmittelbar in Celsiusgraden geeicht ist.

Die Widerstandsänderung je Grad Temperaturerhöhung oder -erniedrigung ist jedoch gering; der Widerstand eines Platindrahtes ändert sich nur um etwa  $0,4\%$ , wenn die Temperatur um  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  steigt oder sinkt. Außerdem sind Widerstandsthermometer ziemlich empfindlich gegen Stöße und Erschütterungen.

Die Industrie verlangte robuste, kleine Temperaturfühler, die bereits auf geringfügige Temperaturänderungen mit großen Strom- oder Spannungsschwankungen reagieren. Stoffe, mit denen sich diese Forderungen verwirklichen ließen, fand man in den Halbleitern. Ihre Eigenleitung steigt rasch mit der Temperatur. Bei



manchen Halbleitermaterialien beträgt die Widerstandsänderung je Grad Temperaturerhöhung beziehungsweise -erniedrigung 4% und mehr; sie ist also zehnmal größer als bei Platin.

So wurden in den vergangenen dreißig Jahren Bauelemente geschaffen, bei denen die temperaturabhängige Eigenleitfähigkeit der Halbleiter bewußt genutzt wird. Man nennt sie „Halbleiterwiderstände“, „Thermistoren“ (*Thermally sensitive resistor*, wärmeempfindlicher Widerstand) oder auch „Heißleiter“, da sie in heißem Zustand elektrischen Strom besser leiten als in kaltem.

Äußerlich sehen Halbleiterwiderstände recht unscheinbar aus. Viele Typen ähneln den kleinen Widerständen, die sich dutzendweise in jedem Rundfunk- oder Fernsehempfänger finden. Andere wieder sind als Scheibe von der Größe eines Reißnagelkopfes oder als streichholzkopfgröße Pille ausgeführt. Auffällig sind vor allem die geringen Abmessungen und das niedrige Gewicht: Der VEB Keramische Werke Hermsdorf stellt serienmäßig Heißleiter her, die nur 11 mm lang sind, 1,6 g wiegen und nicht einmal die Stärke eines Streichholzes erreichen. Für Spezialaufgaben kann man die Abmessungen noch weiter verringern; es gibt Thermistoren, die man durch das Ohr einer Stopfnadel schieben könnte.

Halbleiterwiderstände ließen sich aus Germanium oder Silizium herstellen. Diese Stoffe sind jedoch teuer und nur schwer zu verarbeiten. Ausgangsmaterial für Halbleiterwiderstände bilden daher pulverförmige Metalloxyde, die bei hoher Temperatur gesintert („zusammengebacken“) werden. Dieses Herstellungsverfahren gestattet es, Thermistoren alle nur gewünschten Formen zu geben und ihren Preis niedrigzuhalten.

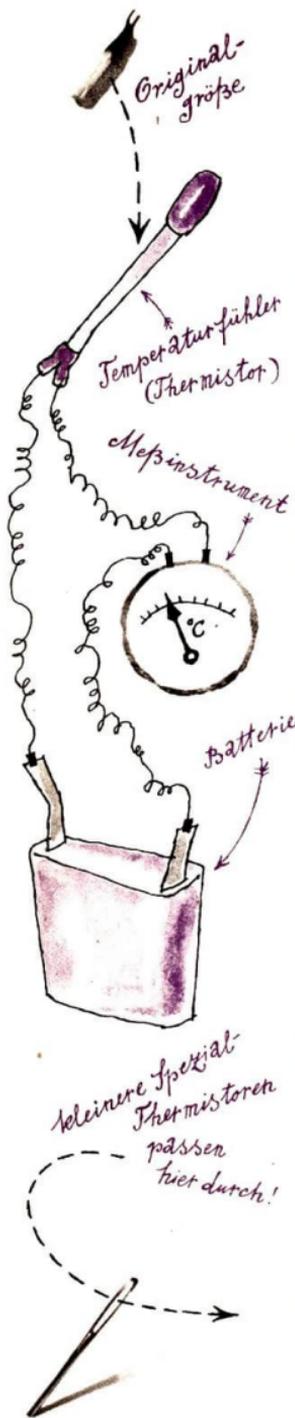
Den Technikern der Deutschen Demokratischen Republik steht ein sorgfältig abgestimmtes Angebot an Thermistoren aus eigener Produktion zur Verfügung.

### Temperaturen ferngemessen

Die Schaltung eines Halbleiter-Fernthermometers ist sehr einfach. Der von der Batterie verursachte elektrische Strom passiert nacheinander den als Temperaturfühler dienenden Thermistor und einen Strommesser. Der Instrumentenzeiger schlägt um so weiter aus, je stärker der Strom, je höher also die Temperatur des Thermistors ist. Die Skala des Strommessers wird in Celsiusgraden geeicht.

Meistens sollen Temperaturmessungen andere Vorgänge auslösen. Heute läßt sich bei den meisten derartigen Aufgaben das „Zwischenglied Mensch“ bereits ausschalten. Seine Funktion wird von einer selbsttätigen Temperaturregel- oder -überwachungsanlage übernommen.

Das Bild zeigt einen Flüssigkeitsbehälter, dessen Temperatur stets gleichbleiben soll, ohne daß es notwendig wäre, die elektrische Heizung von Hand aus- und einzuschalten. An die Stelle des Meß-



instruments tritt hier ein „Relais“, ein Bauelement der Elektrotechnik, das es ermöglicht, starke Ströme mit Hilfe schwacher Ströme aus- und einzuschalten. Wir haben das Relais sehr vereinfacht dargestellt: Vor einem Pol eines Elektromagneten ist eine federnde Zunge angebracht, die in Ruhestellung einen Kontakt schließt und damit einen Stromkreis eingeschaltet hält. Fließt ein genügend kräftiger Strom durch die Spule des Magneten, wird die Zunge angezogen; der Kontakt ist dann geöffnet.

Temperaturfühler, Magnetspule und Batterie bilden einen Stromkreis; Relaiskontakt, Behälterheizung und Lichtnetz einen zweiten. Nehmen wir zunächst an, die Flüssigkeit werde kalt in den Behälter gefüllt. Dann ist auch der Temperaturfühler kalt. Er läßt nur einen sehr schwachen Strom passieren, der nicht kräftig genug ist, den Magneten ansprechen zu lassen. Der Kontakt im Heizkreis bleibt geschlossen; die Heizung ist eingeschaltet und erwärmt die Flüssigkeit. Damit nimmt auch die Temperatur des Thermistors zu. Seine Eigenleitung wächst, und in gleichem Maße steigt auch die Stromstärke in der Magnetspule.

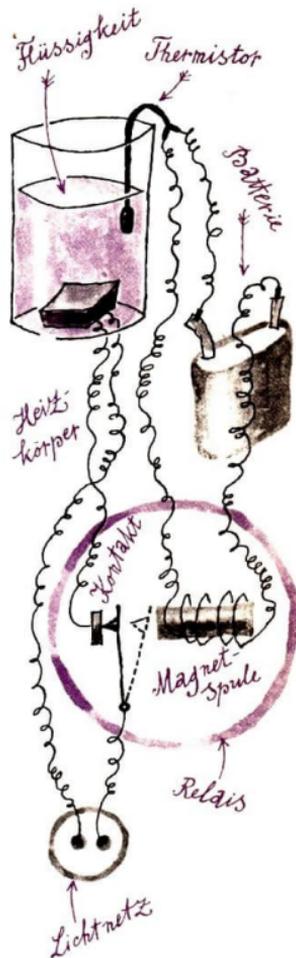
Bei einer bestimmten Temperatur ist der Strom so stark geworden, daß der Magnet die federnde Zunge anzieht. Im gleichen Augenblick öffnet sich der Relaiskontakt; die Heizung wird ausgeschaltet. Allmählich kühlt sich die Flüssigkeit wieder ab; der Strom durch den Magneten wird schwächer, die Zunge wird losgelassen und schaltet die Heizung erneut ein. Da sich dieses Spiel ständig wiederholt, wird die Flüssigkeit auf der Solltemperatur gehalten. Genau genommen pendelt die Temperatur fortwährend um den Sollwert.

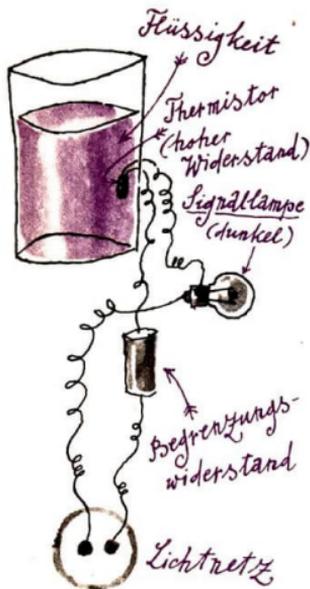
Wir haben vereinfacht, soweit es nur möglich war. Heizung, Heißleiter und Relais müssen selbstverständlich genau berechnet und konstruiert werden, damit der Schaltvorgang bei der gewünschten Temperatur ausgelöst wird. Auch will man im allgemeinen die Temperatur innerhalb eines bestimmten Bereichs wählen können; bereits bei jedem Kühlschrank ist das der Fall. Das alles ist jedoch verhältnismäßig leicht zu bewerkstelligen; wir brauchen nicht auf diese Spezialprobleme einzugehen.

Die gleiche Anlage läßt sich mit nur geringfügigen Änderungen auch für andere Zwecke benutzen. Man könnte z. B. mit ihr die Raumtemperatur regeln oder statt der elektrischen Heizung eine Alarmglocke vorsehen, die anspricht, wenn die Temperatur eines Raumes oder eines Rohstoffes gefährlich hohe Werte erreicht. Die Brandwache muß z. B. alarmiert werden, wenn die Temperatur eines Raumes unzulässig steigt; der Kraftfahrer soll Kühlwasser nachfüllen, der Kesselwärter die Brennstoffzufuhr beschleunigen oder drosseln.

Da Thermistoren leichter, kleiner und robuster als andere Temperaturfühler konstruiert werden können, sind Temperaturmessungen auch dort möglich, wo sie bisher ausgeschlossen waren.

Mediziner haben durch Einführen winziger Heißleiter die Bluttemperatur unmittelbar in den Venen messen und die Temperatur-



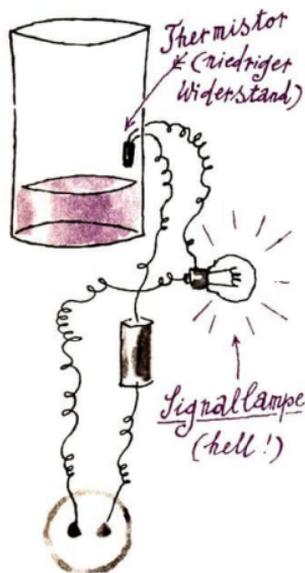


verteilung in Organen und Geweben des menschlichen und tierischen Körpers untersuchen können. Ein in den volkseigenen Keramischen Werken Hermsdorf entwickeltes Temperaturmeßgerät bewährte sich zur Feststellung von Hauttemperaturen bei Durchblutungsmessungen. Biologen führten an Pflanzen und Pflanzenteilen Temperaturmessungen aus, die unser Wissen um den Wärmehaushalt der Pflanzen wesentlich bereichert haben.

Die Außenhaut von Testflugzeugen und von Raketen wird manchmal mit Tausenden von Thermistoren förmlich gespickt, um die Erwärmung bei sehr großen Geschwindigkeiten und beim Flug in verschiedenen Höhen zu messen. Die Ergebnisse werden durch automatisch arbeitende Sender unverzüglich zum Erdboden übertragen. Auch in „Radiosonden“, die, von Ballonen in die Höhe getragen, meteorologische Daten messen und zur Erde funken, haben sich Thermistoren wegen ihres niedrigen Gewichts und ihrer geringen Abmessungen gut bewährt.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil ist auch, daß Halbleiter sehr empfindlich gemacht werden können. Spezielle Thermistoren reagieren noch auf Temperaturunterschiede von  $0,01^\circ\text{C}$  bis auf  $0,0002^\circ\text{C}$  genau. Mit einem Halbleiterwiderstand, den man im Brennpunkt eines großen Hohlspiegels montiert hatte, ließ sich die Wärmestrahlung einer Hand auf 50 m, die Strahlung einer Kerzenflamme auf eine Distanz von mehr als 100 m feststellen.

### Ein Thermistor heizt sich selbst



Alle Anlagen, in denen ein Thermistor als Wärmefühler dient, setzen stillschweigend voraus, daß eine Bedingung erfüllt ist: Der Heißleiter darf durch den hindurchfließenden Strom nicht merklich erwärmt werden. Hier macht sich ein Gesetz der Elektrizitätslehre unangenehm bemerkbar: Elektrischer Strom erwärmt die Materialien, durch die er fließt. Soll diese Temperaturerhöhung nicht stören, indem etwa ein Thermometer falsche Werte anzeigt, muß man bei Thermistortemperaturfühlern mit schwachen Strömen arbeiten. Gerade der Eigenerwärmung verdanken wir aber weitere Anwendungen des Thermistors; man muß nur verhindern, daß die Stromstärke unzulässig anwächst. Sonst würde der Thermistor zerstört. Die skizzierte Anlage ähnelt dem Fernthermometer. Diesmal aber soll keine Temperatur gemessen, sondern ein Signal ausgelöst werden, wenn der Flüssigkeitspegel im Vorratsbehälter einen bestimmten Wert unterschreitet.

Spannungsquelle und Thermistor sind so bemessen, daß sich der Thermistor allmählich erwärmt. Solange er sich unter dem Flüssigkeitsspiegel befindet, wird er durch die Flüssigkeit gekühlt. Die Temperatur steigt nicht weiter an, und im Stromkreis fließt nur schwacher Strom.

Sinkt der Flüssigkeitsspiegel unter den Thermistor, so fehlt die kühlende Flüssigkeit; die Temperatur des Halbleiters steigt. Der

Strom wächst und wird bald so stark, daß er die Signallampe hell aufleuchten läßt.

Der „Begrenzungswiderstand“ schließt ein zu starkes Anwachsen der Stromstärke aus. Selbst wenn das elektrische Leitvermögen des (erwärmten) Thermistors groß wird, begrenzt der Widerstand den Strom so, daß der Halbleiterwiderstand nicht überlastet wird.

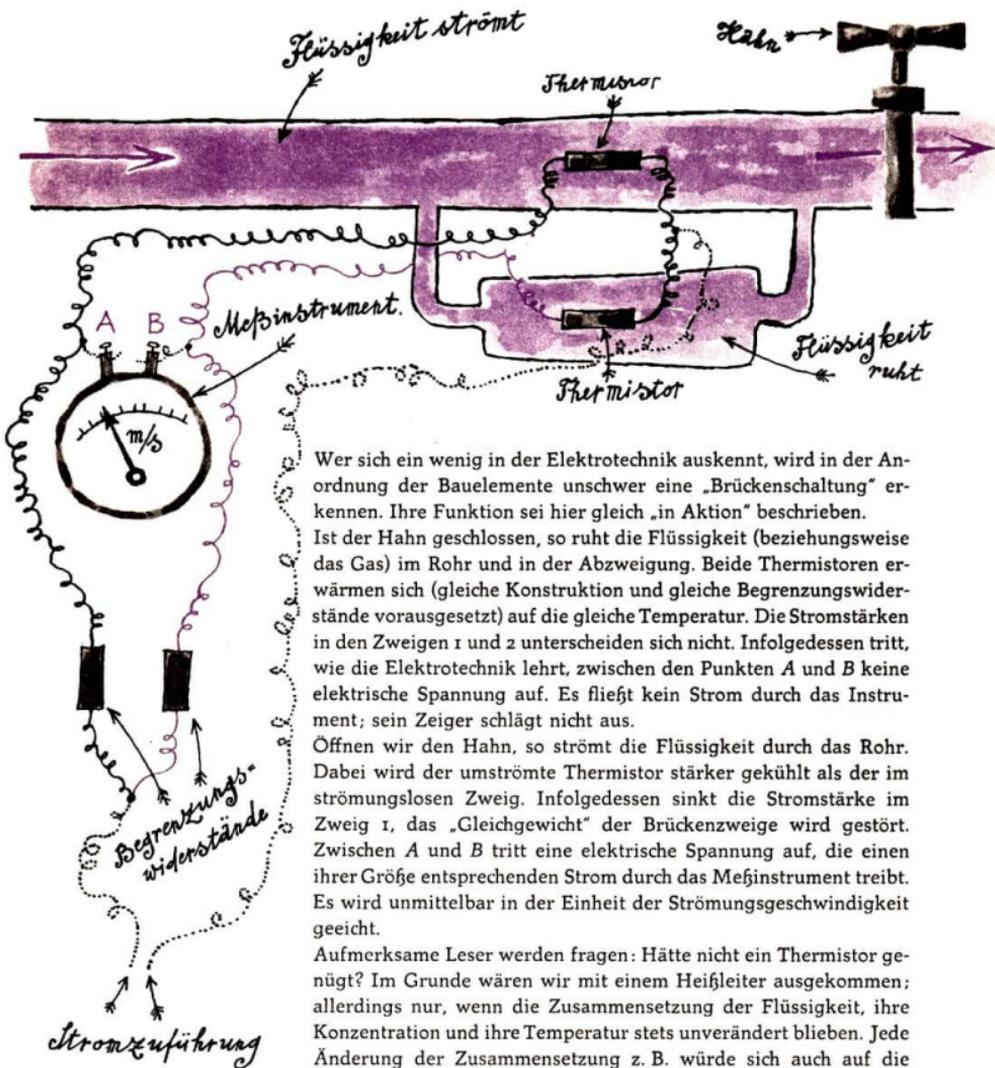
Zahlreiche Varianten dieser Schaltung sind möglich und werden angewandt. So ließe sich statt einer Lampe ein Relais vorsehen, das den Motor einer Pumpe einschaltet, wenn der Behälter leer zu werden droht. Man könnte mehrere Thermistoren in verschiedenen Höhen einbauen und an den zugehörigen Signallampen den ungefähren Füllstand des Behälters ablesen. Man könnte endlich durch eine Schaltungsänderung auch signalisieren lassen, wenn der Behälter überzulaufen droht.

Dieses Meßverfahren ist nicht auf Flüssigkeiten beschränkt. Es läßt sich auch bei Gasen anwenden. Befindet sich ein Heißleiter in einem luft- oder gasgefüllten Gefäß, so wird seine Wärme durch das Gas um so weniger abgeleitet, je niedriger der Gasdruck ist. Mißt man den durch den Heißleiter fließenden Strom mit einem entsprechend geeichten Instrument, kann man den Gasdruck bestimmen und in beliebiger Entfernung vom Behälter anzeigen.

In den Rauchgasen einer Kesselfeuerung oder einer Heizung ist stets Kohlendioxyd ( $\text{CO}_2$ ) enthalten. Sein mengenmäßiger Anteil erlaubt Rückschlüsse, ob die Brennstoffe gut ausgenutzt werden. Weil Kohlendioxyd ein schlechterer Wärmeleiter als Luft ist, leitet ein Gemisch aus Luft und Kohlendioxyd die Wärme um so schlechter, je höher der Anteil des Kohlendioxyds ist. Wie man das zur Rauchgasprüfung ausnutzen kann, brauchten wir eigentlich gar nicht mehr zu beschreiben; die meisten Leser würden von selbst darauf kommen.

Das Rauchgas wird an einem Thermistor vorbeigeleitet, der durch hindurchfließenden Strom etwas geheizt wird. Der Heißleiter erreicht eine um so höhere Temperatur, je schlechter das ihn umgebende Gas die Wärme ableitet. Der Temperatur entsprechend stellt sich die Stromstärke ein, die mit einem in Prozent Kohlendioxyd geeichten Instrument gemessen wird. Auf ähnliche Weise lassen sich unter anderem schon geringfügige Anteile von Wasserstoff in Luft nachweisen; denn Wasserstoff leitet die Wärme viel besser als Luft.

Bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten oder Gasen hilft der Heißleiter ebenfalls. Im Bild erkennen wir zwei Thermistoren. Einer sitzt im Rohr, in dem die Geschwindigkeitsmessung erfolgen soll, der andere in einer Abzweigung, die zwar von der Flüssigkeit oder dem Gas erfüllt wird, in der jedoch keine nennenswerte Strömung auftritt. Zwischen den zwei Begrenzungswiderständen und den Thermistoren liegt ein Meßinstrument, das allerdings „quer“ zwischen Widerstände und Thermistoren geschaltet ist.



Wer sich ein wenig in der Elektrotechnik auskennt, wird in der Anordnung der Bauelemente unschwer eine „Brückenschaltung“ erkennen. Ihre Funktion sei hier gleich „in Aktion“ beschrieben.

Ist der Hahn geschlossen, so ruht die Flüssigkeit (beziehungsweise das Gas) im Rohr und in der Abzweigung. Beide Thermistoren erwärmen sich (gleiche Konstruktion und gleiche Begrenzungswiderstände vorausgesetzt) auf die gleiche Temperatur. Die Stromstärken in den Zweigen 1 und 2 unterscheiden sich nicht. Infolgedessen tritt, wie die Elektrotechnik lehrt, zwischen den Punkten A und B keine elektrische Spannung auf. Es fließt kein Strom durch das Instrument; sein Zeiger schlägt nicht aus.

Öffnen wir den Hahn, so strömt die Flüssigkeit durch das Rohr. Dabei wird der umströmte Thermistor stärker gekühlt als der im strömungslosen Zweig. Infolgedessen sinkt die Stromstärke im Zweig 1, das „Gleichgewicht“ der Brückenzweige wird gestört. Zwischen A und B tritt eine elektrische Spannung auf, die einen ihrer Größe entsprechenden Strom durch das Meßinstrument treibt. Es wird unmittelbar in der Einheit der Strömungsgeschwindigkeit geeicht.

Aufmerksame Leser werden fragen: Hätte nicht ein Thermistor genügt? Im Grunde wären wir mit einem Heißleiter ausgekommen; allerdings nur, wenn die Zusammensetzung der Flüssigkeit, ihre Konzentration und ihre Temperatur stets unverändert blieben. Jede Änderung der Zusammensetzung z. B. würde sich auch auf die Wärmeableitung auswirken; das Instrument jedoch würde darauf mit der Anzeige einer in Wirklichkeit nicht vorhandenen Geschwindigkeitsänderung reagieren.

Die Brückenschaltung macht die Anlage gegen solche Fehler unempfindlich. Von jeder Änderung in der Zusammensetzung oder der Temperatur werden beide Thermistoren gleich beeinflusst, so daß das Gleichgewicht zwischen A und B nicht gestört wird.

$\text{---}$  = Zweig 1

$\text{---}$  = Zweig 2

## Heißleiter schützen und schalten

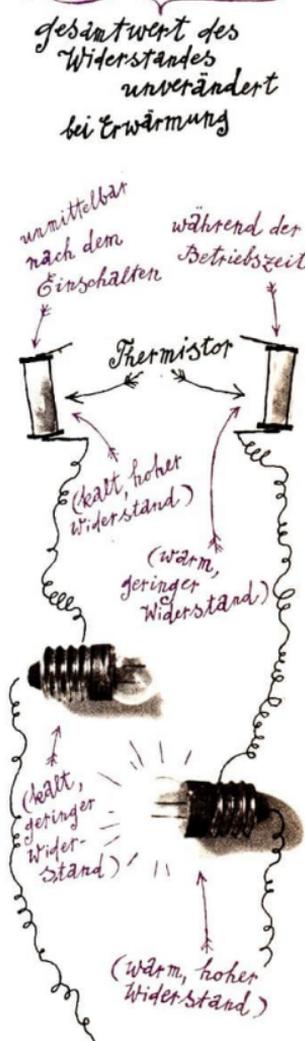
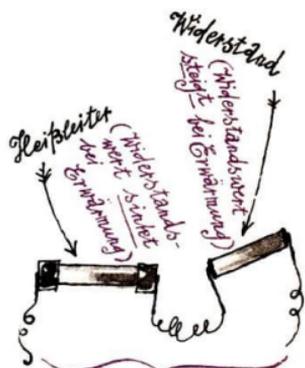
Nicht nur in Meßapparaturen, sondern in fast alle Geräte der Nachrichtentechnik und Elektronik müssen als Bauelemente „Widerstände“ eingebaut werden. Sie sollen elektrische Spannungen vermindern und haben auch noch verschiedene andere Aufgaben zu erfüllen. Erwärmen sich diese Widerstände, was durch den hindurchfließenden Strom, aber auch durch benachbarte andere Bauteile, wie Verstärkerröhren, geschehen kann, so ändern sich die Widerstandswerte. Das führt nicht selten dazu, daß Meßergebnisse ungenau werden oder elektronische Geräte nicht mehr einwandfrei funktionieren.

Mit Thermistoren kann man die Abweichungen besonders „kritischer“ Widerstände kompensieren. Die in elektronischen Geräten verwendeten Widerstände weisen im allgemeinen einen „positiven Temperaturkoeffizienten“ auf, d. h., der Widerstandswert wird bei Erwärmung größer. Halbleiter dagegen haben einen „negativen Temperaturkoeffizienten“; ihr Widerstand nimmt bei Erwärmung ab. Teilt man nun einen Widerstand so auf, daß ein Teil durch einen „normalen“ Widerstand, der andere aber durch einen Heißleiter dargestellt wird, so läßt sich erreichen, daß die durch Erwärmung hervorgerufene Widerstandsvergrößerung des einen Teils gerade durch die Widerstandsabnahme des anderen Teils aufgehoben wird. Der Gesamtwiderstand bleibt unverändert.

Häufig fließt in elektrischen Anlagen unmittelbar nach dem Einschalten ein weit stärkerer Strom als während des normalen Betriebes. Das bekannteste Beispiel dafür sind Glühlampen. Der Widerstand des kalten Leuchtdrahtes ist sehr gering. Infolgedessen übertrifft der Einschaltstrom der Lampe den normalen Betriebsstrom um ein Vielfaches. Eine ähnliche Erscheinung ist in Allstromrundfunk- und Fernsehempfängern zu beobachten, in denen die Heizfäden der Röhren und meistens auch die Leuchtdrähte der Skalenlampen hintereinandergeschaltet sind. Hier werden durch den Einschaltstromstoß nicht nur die Röhren, sondern vor allem die empfindlichen Skalenlämpchen übermäßig beansprucht; das setzt ihre Lebensdauer herab.

Mit einem Halbleiterwiderstand läßt sich der Einschaltstromstoß auffangen: Bei Beginn des Stromflusses ist der Thermistorwiderstand noch hoch; trotz der kalten Röhrenheizfäden kann nur ein sehr schwacher Strom durch Röhren und Skalenlämpchen fließen. Allmählich wird der Thermistor wärmer und läßt einen stärkeren Strom hindurch. Gleichzeitig aber steigt der Widerstand der „warmwerdenden“ Röhren und Skalenlampen, so daß keine übermäßig hohe Stromstärke auftreten kann. Dieser Heißleiterschutz hat sich in Millionen von Empfängern bewährt.

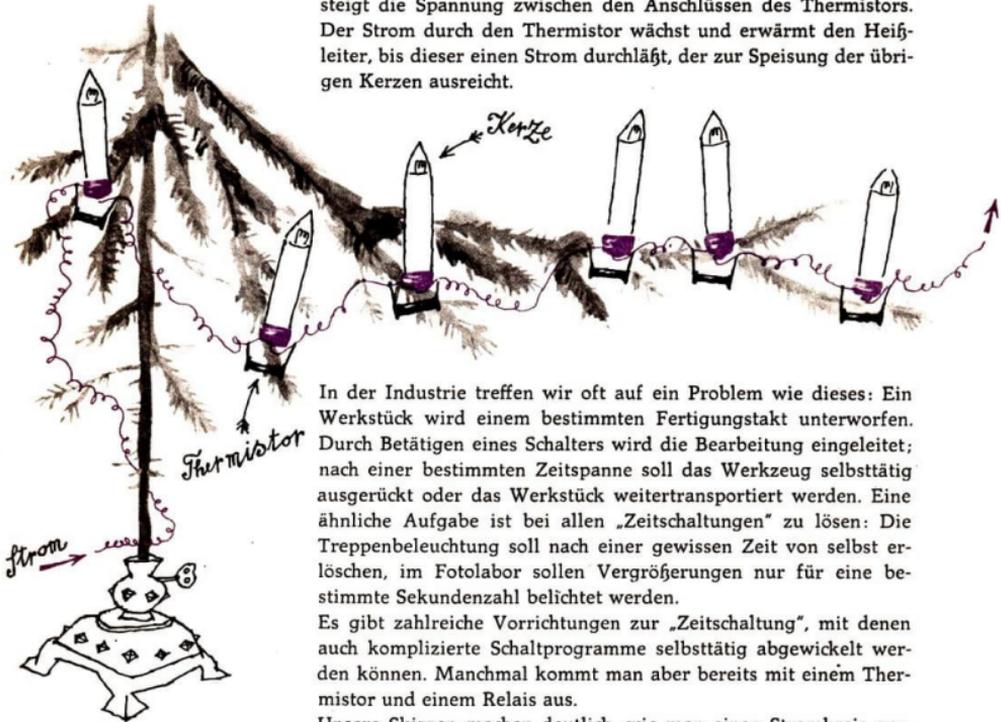
Durch Vorschalten eines Heißleiters kann man Lampen allmählich aufglühen lassen. In Krankenzimmern und bei Nachttischlampen wird davon bisweilen Gebrauch gemacht, um das Geblendetwerden oder Erschrecken durch plötzlich aufflammendes Licht zu vermei-



den. Der Stromstoß beim Einschalten kleiner Elektromotoren kann ebenfalls durch Thermistoren gedämpft werden.

Oft werden mehrere Glühlampen hintereinandergeschaltet. Wir brauchen dabei nur an die elektrische Weihnachtsbaumbeleuchtung oder an die Lichterketten in Gartenrestaurants zu denken. Das Hintereinanderschalten hat einen Nachteil: Brennt eine Lampe der Kette durch, so erlöschen alle anderen, weil auch ihre Stromversorgung unterbrochen wird.

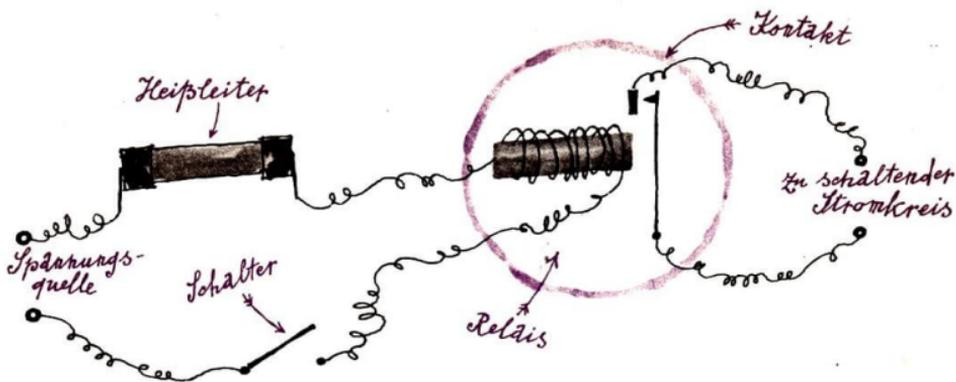
Bei einer in den letzten Jahren hergestellten Weihnachtsbaumbeleuchtung würden wir etwas anderes beobachten: Brennt eine elektrische Kerze durch oder schrauben wir sie versuchsweise los, so erlischt die Beleuchtung zwar für einen Augenblick, kommt aber anschließend langsam wieder. In jeder Lampenfassung ist nämlich ein Thermistor als „Strombrücke“ untergebracht. Solange die zugehörige Lampe brennt, fließt nur ein sehr schwacher Strom durch den Thermistor. Sobald jedoch der Leuchtfaden unterbrochen wird, steigt die Spannung zwischen den Anschlüssen des Thermistors. Der Strom durch den Thermistor wächst und erwärmt den Heißleiter, bis dieser einen Strom durchläßt, der zur Speisung der übrigen Kerzen ausreicht.



In der Industrie treffen wir oft auf ein Problem wie dieses: Ein Werkstück wird einem bestimmten Fertigungstakt unterworfen. Durch Betätigen eines Schalters wird die Bearbeitung eingeleitet; nach einer bestimmten Zeitspanne soll das Werkzeug selbsttätig ausgerückt oder das Werkstück weitertransportiert werden. Eine ähnliche Aufgabe ist bei allen „Zeitschaltungen“ zu lösen: Die Treppenbeleuchtung soll nach einer gewissen Zeit von selbst erlöschen, im Fotolabor sollen Vergrößerungen nur für eine bestimmte Sekundenzahl belichtet werden.

Es gibt zahlreiche Vorrichtungen zur „Zeitschaltung“, mit denen auch komplizierte Schaltprogramme selbsttätig abgewickelt werden können. Manchmal kommt man aber bereits mit einem Thermistor und einem Relais aus.

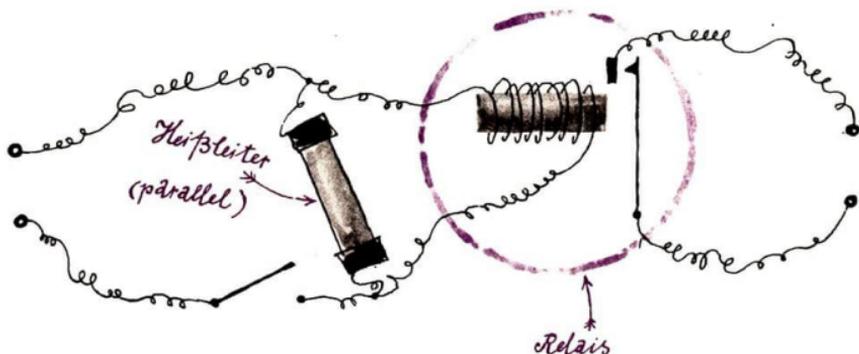
Unsere Skizzen machen deutlich, wie man einen Stromkreis verzögert einschalten kann: Wird der Schalter betätigt, so fließt zunächst nur ein schwacher Strom durch den kalten Thermistor. Er reicht nicht aus, das Relais anzusprechen zu lassen. Erst wenn sich der



Thermistor erwärmt hat und einen stärkeren Strom hindurchläßt, werden die Schaltkontakte des Relais betätigt.

Die andere Skizze zeigt die umgekehrte Möglichkeit: Das Relais schließt den Stromkreis, sobald der Schalter gedrückt wird. Der Heißleiter, der diesmal den Anschlüssen der Relaispule parallel liegt, wirkt sich zunächst nicht aus, da sein Widerstand sehr groß ist. Allmählich jedoch erwärmt er sich, und je stärker der Thermistorstrom wird, desto weniger Strom bleibt für das Relais „übrig“. Schließlich wird der Relaisstrom so schwach, daß der Magnet die federnde Zunge nicht mehr festhalten kann. Sie fällt ab und öffnet den Stromkreis.

Durch geeignete Wahl des Thermistors, des Relais und der Spannungen kann man mit solchen einfachen Vorrichtungen Verzögerungen von wenigen Sekunden bis zu vielen Minuten erzielen. Freilich darf man keine übergroße Genauigkeit erwarten, beeinflusst doch bereits die Umgebungstemperatur den Thermistor. Es dauert in einem kalten Raum länger als in einem warmen, bis er die Schalttemperatur erreicht hat. Sehr oft kommt es aber, z. B. bei einer Treppenbeleuchtung, gar nicht auf eine Genauigkeit von Sekundenbruchteilen an.





# FÜR WECHSELSTROM VERBOTEN!

## Ventil für Elektrizität gesucht!

### Gleichstrom – Wechselstrom: beide wichtig

Zwei Stromarten kennt der Elektrotechniker; beiden begegnet er bei seiner Tätigkeit. Da ist zunächst der Gleichstrom: Er fließt, wenn wir einen Stromverbraucher an eine Taschenlampenbatterie oder an einen Akkumulator anschließen. Ständig drückt dann die Spannungsquelle Elektronen in den Leitungsdraht, um dafür andere am entgegengesetzten Ende des Stromkreises abzusaugen. Es ist ein steter Elektronenkreislauf, bei dem sich weder Stromrichtung noch Stromstärke verändern.

In Licht- und Kraftleitungen jedoch fließt meistens Wechselstrom (der sogenannte Drehstrom ist nur eine besondere Form des Wechselstroms). Er wird durch eine Wechsellspannungsquelle angetrieben, bei der die Pole fortwährend ihr Vorzeichen wechseln: Was jetzt Pluspol ist, wird im nächsten Sekundenbruchteil Minuspol, im folgenden erneut Pluspol und so fort. Dieser Wechsel vollzieht sich in einem regelmäßigen Rhythmus, dessen Geschwindigkeit man mit Hilfe der „Frequenz“ der Wechsellspannung beschreibt.

Die Frequenz der Licht- und Kraftnetze der meisten europäischen Länder beträgt 50 Hz.

Auch für Wechsellspannungen gilt die Regel, daß Elektronen stets vom Gebiet des Elektronenüberschusses zum Gebiet des Elektronenmangels wandern. Daher müssen die Elektronen im Wechselstromkreis ihre Bewegungsrichtung jedesmal umkehren, wenn sich die Vorzeichen der Spannungsquelle ändern.

Eigentlich dürfte man also gar nicht mehr von einem „fließenden“ Strom sprechen; denn die Elektronen pendeln nur noch im Rhythmus der Wechsellspannung im Leiter hin und her. Außerdem ändert sich die Stromstärke fortwährend zwischen Null und einem Höchstwert, und zwar ebenfalls mit der Frequenz der antreibenden Wechsellspannung.

Einfach scheint das alles gerade nicht zu sein. Tatsächlich geben die Besonderheiten des Wechselstroms dem Techniker manche Nuß zu knacken. Man nimmt sie aber gern in Kauf; denn dafür hat der Wechselstrom auch entscheidende Vorzüge.

Wechselströme und Wechsellspannungen lassen sich viel leichter



als Gleichströme und Gleichspannungen gewinnen. Das gilt vor allem dann, wenn große Mengen Elektroenergie erzeugt werden sollen. Die Umwandlung von niedrigen in sehr hohe Spannungen und zurück – eine Voraussetzung für die Elektroenergieübertragung auf größere Entfernungen – läßt sich nur mit Wechselstrom auf einfache Weise durchführen. Daher fließt in allen großen Energieversorgungssystemen der Welt Wechselstrom.

Trotzdem hat auch der Gleichstrom seine Existenzberechtigung, und seit einiger Zeit nimmt seine Bedeutung sogar wieder zu: In der chemischen Industrie und in der Grundstoffindustrie werden gewaltige Energiemengen benötigt, die oft als Gleichstrom zur Verfügung stehen müssen (z. B. bei der Aluminiumgewinnung und bei der Kupferraffination). Auch die Galvanotechnik, die so wichtig für die Behandlung von Metalloberflächen ist, kommt nicht ohne Gleichstrom aus.

Motoren, die starken Belastungsschwankungen unterworfen sind oder deren Drehzahl sich in weiten Grenzen stetig regeln lassen muß, werden besser mit Gleichstrom als mit Wechselstrom betrieben. Deshalb sind die Triebwagen von Untergrund- und Stadtschnellbahnen fast immer mit Gleichstrommotoren ausgerüstet. Aus diesem Grunde werden in Förderanlagen ebenfalls Gleichstrommotoren bevorzugt. Auch zum Antrieb von Werkzeugmaschinen haben sich Gleichstrommotoren bewährt; sie sind vor allem dann beinahe unentbehrlich, wenn man die Vorteile elektronischer Motorsteuerungen und -regelungen ausnutzen will.

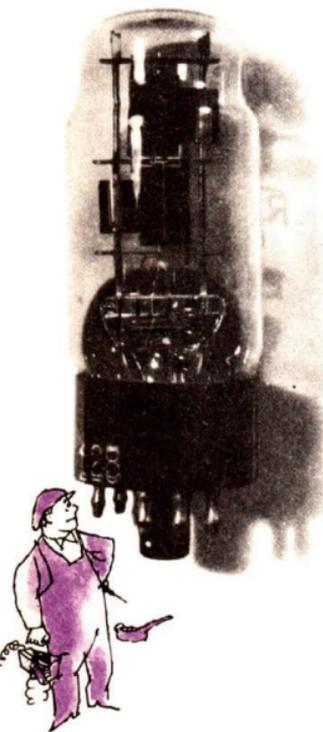
Einer der wichtigsten Gleichstromverbraucher schließlich ist die Nachrichtentechnik. Fernsprechnetze und die Röhren oder Halbleiterbauelemente von Verstärkern, Sendern und Empfängern müssen mit Gleichstrom gespeist werden.

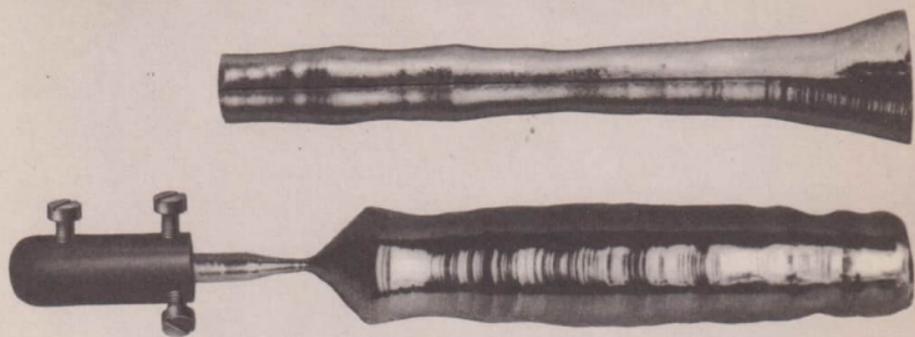
Wo nun diesen Gleichstrom hernehmen? Ihn erst am Verbrauchsort zu gewinnen oder aus Batterien zu entnehmen, wäre unmöglich oder doch sehr unwirtschaftlich, zumal fast überall Wechselstromenergie zur Verfügung steht. Daher entwickelte man Geräte, die den Wechselstrom des Energieversorgungsnetzes in Gleichstrom umwandeln. Diese Geräte heißen Gleichrichter.

Alle Gleichrichter benutzen ein Arbeitsprinzip: Sie lassen die hin- und herpendelnden Elektronen nur in einer Richtung passieren, während sie ihnen in der anderen den Weg verlegen. Sie wirken also wie ein Ventil, das ein Gas oder eine Flüssigkeit nur in einer Richtung hindurchläßt.

Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Gleichrichterarten geschaffen: Man verwendete Umformeraggregate, in denen ein aus dem Netz gespeister Wechselstrommotor eine Gleichstromdynamomaschine trieb. In anderen Geräten wurde eine Stromrichtung durch ein Pendel unterdrückt, das mit der Frequenz der Wechselspannung schwang. Auch die elektrochemischen Erscheinungen wurden zur Gleichrichtung von Wechselströmen herangezogen.

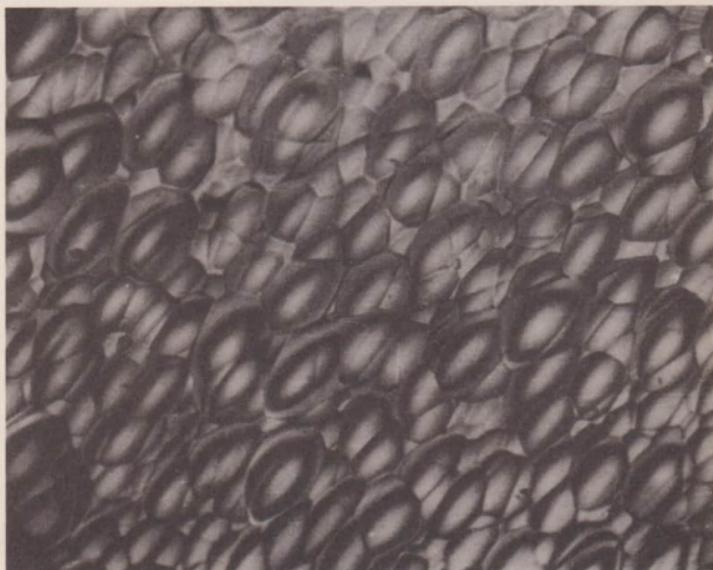
Später nutzte man die Elektronenbewegung im Vakuum oder in





Siliziumekristall und Germaniumekristall

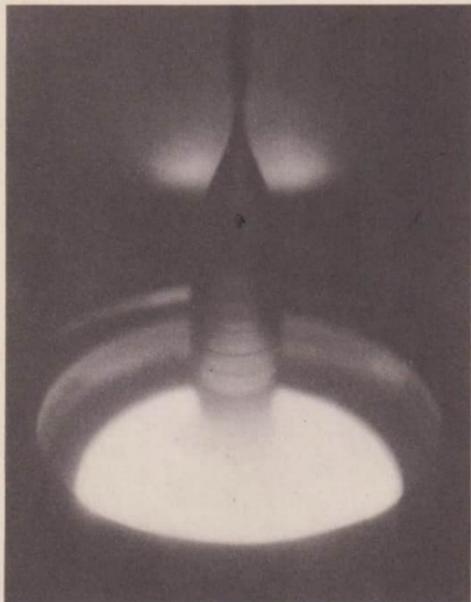
Geätzte Germaniumoberfläche, stark vergrößert



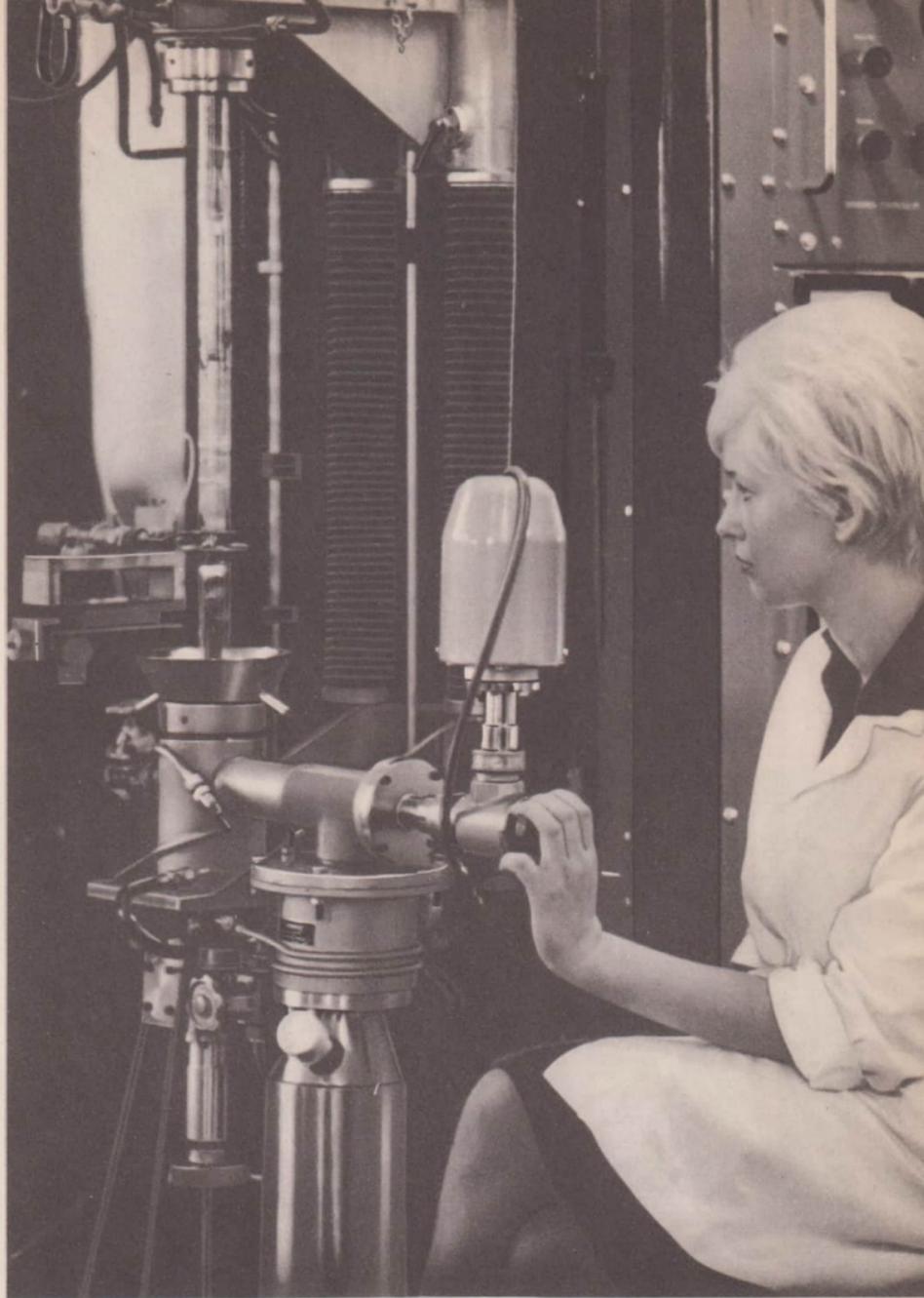


Zonenschmelzapparatur

Der Einkristall wird aus der Schmelze gezogen



In dieser Apparatur wird Halbleiter-Silizium gewonnen ►





Germaniumplättchen

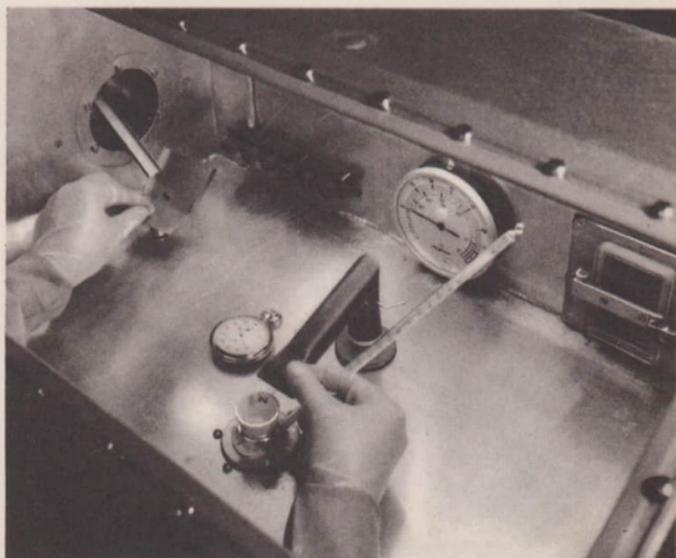
Halbleiter brauchen ihr „eigenes Klima“

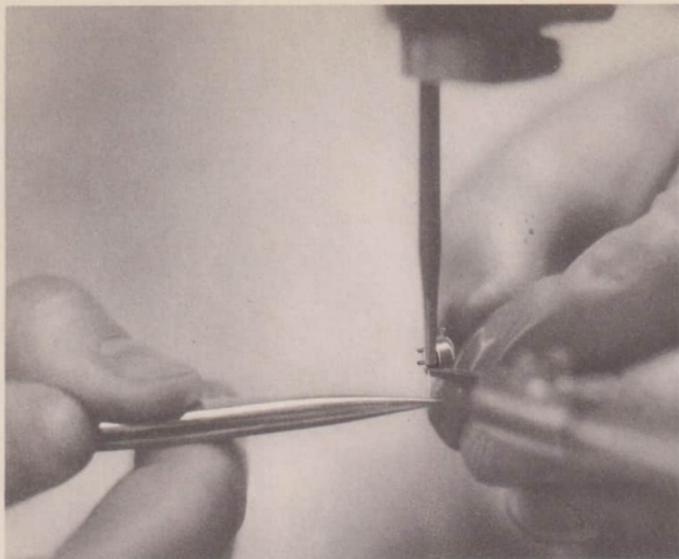




Mit Pinzette und geschickten Händen

Immer wieder wird gemessen und kontrolliert





Ein Transistor wird montiert

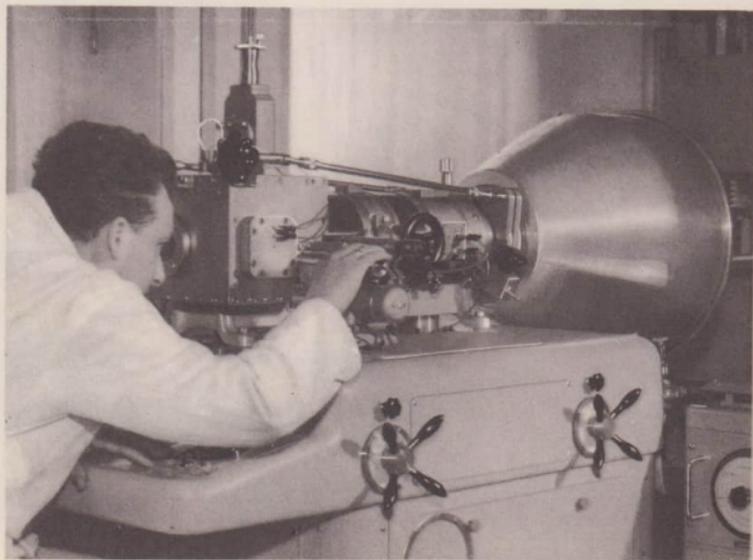
Präzisionsarbeit im Halbleiterwerk

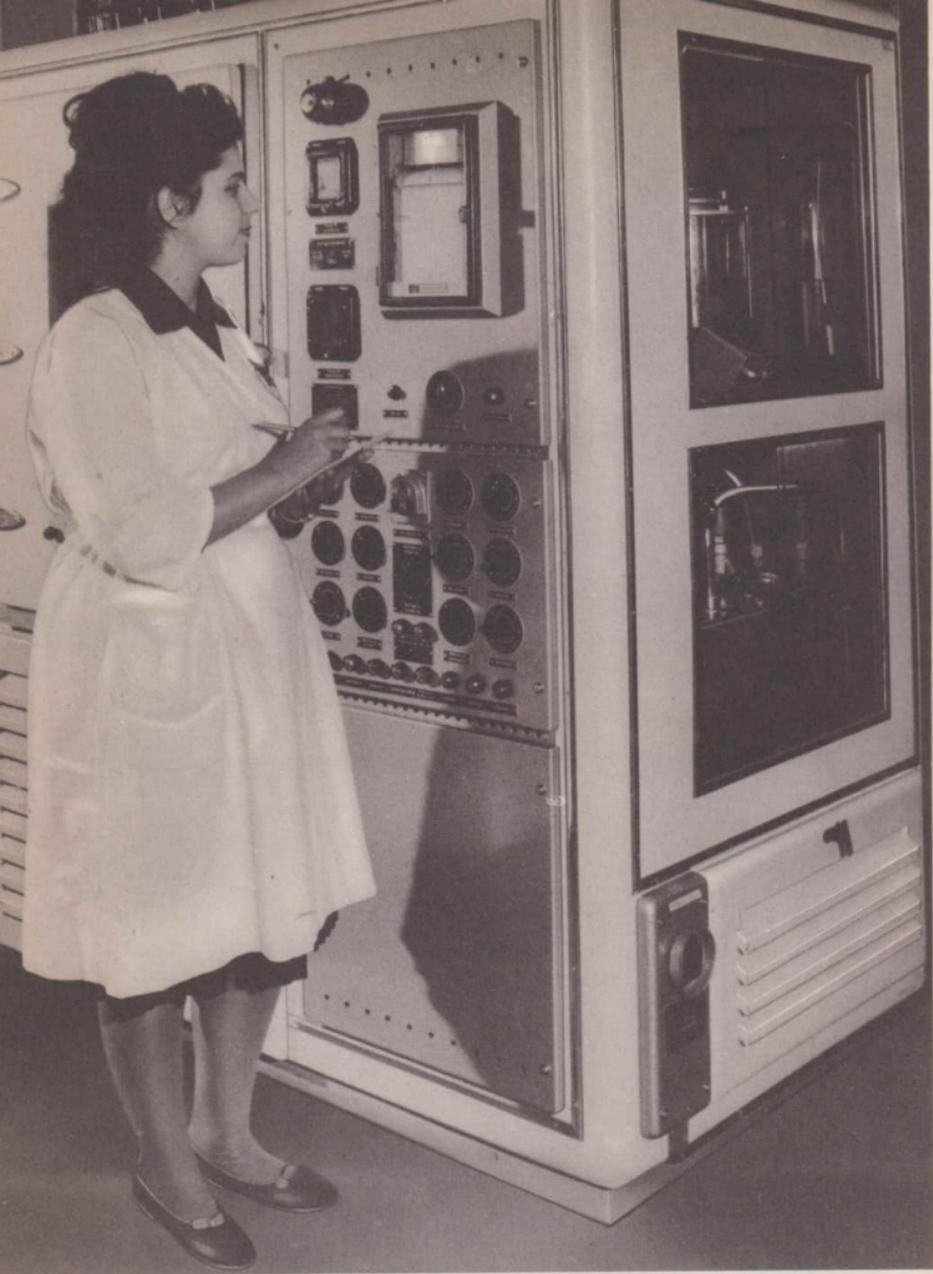




Junge Technik – junge Menschen

Elektronenstrahl-Schneidapparatur für Halbleiter und Metalle





Moderne Technik erfordert neue Kenntnisse und Fertigkeiten

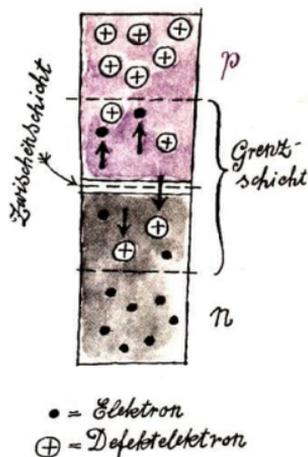
verdünnten Gasen für die Gleichrichtung aus. Es wurden „Gleichrichterröhren“ entwickelt, die jedem Rundfunkhörer wenigstens dem Namen nach bekannt sind. Für große elektrische Leistungen standen „Quecksilberdampf-Gleichrichter“ zur Verfügung.

Die Gleichrichter besaßen Mängel: Die Maschinenaggregate, die Pendel- und die elektronischen Gleichrichter mußten ständig gewartet werden und waren einem raschen Materialverschleiß unterworfen. Sie beanspruchten außerdem viel Platz.

Gleichrichterröhren haben eine nur begrenzte Lebensdauer; außerdem bewältigen sie keine großen elektrischen Leistungen und sind mechanisch empfindlich.

Der Wirkungsgrad aller dieser Gleichrichter befriedigte nicht. Nur ein Teil der zugeführten Wechselstromenergie konnte als Gleichstromenergie wieder entnommen werden. Der nicht unerhebliche Rest ging verloren und wurde größtenteils in Wärme verwandelt.

Die Halbleitertechnik änderte diese Situation gründlich.



### Wo p und n zusammenstoßen

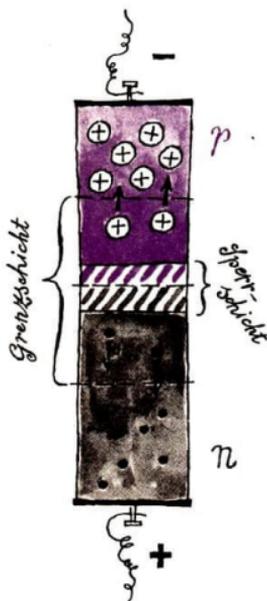
Stellen Sie sich einen Germanium- oder Siliziumkristall vor, der zum Teil n- und zum Teil p-leitend ist. Wir nennen ihn wegen seiner Zusammensetzung einen pn-Kristall. Beide Gebiete sollen nicht ineinander übergreifen, sondern durch eine scharfe Grenze säuberlich voneinander getrennt sein. Außerdem setzen wir voraus, daß etwa ebensoviel überschüssige Elektronen wie Löcher vorhanden sind.

Still liegt der Kristall vor uns. Nichts deutet darauf hin, daß in seinem Inneren etwas Besonderes vor sich geht. Nicht einmal mit Meßinstrumenten könnten wir etwas Derartiges feststellen. Doch wie bei allen anderen Stoffen befinden sich sämtliche Atome dieses Kristalls und mit ihnen die Löcher und Leitungselektronen in ständiger „Wärmebewegung“, wobei die Atome um Ruhelagen schwingen.

Infolge der Wärmebewegung kommt es an der Trennfläche fortwährend zu Grenzübertreten. Aus dem n-Gebiet dringen Elektronen in das grenznahe p-Gebiet vor, während umgekehrt Löcher in das n-Gebiet an der Trennfläche „diffundieren“. Nähern sich dabei ein Loch und ein Elektron einander zu sehr, so „rekombinieren“ sie: Das Elektron „fällt“ in das Loch, und die Ladungen heben sich gegenseitig auf.

Viel wichtiger ist allerdings eine andere Folge des Diffundierens: Da aus dem p-Gebiet in Grenznähe Löcher abgewandert sind, fehlt dort nunmehr positive Ladung. Der Grenzbezirk zeigt sich gegenüber dem übrigen Teil des p-Gebietes negativ elektrisch; er erhält eine negative „Raumladung“. Sie wird dadurch noch größer, daß über die Trennfläche hinweg Elektronen zugewandert sind.

Im grenznahen n-Gebiet kommt es zu gleichen Erscheinungen, wenn auch mit umgekehrten Vorzeichen. Aus dem Grenzbezirk diffundieren Elektronen über die Trennfläche. Dabei wird das



Grenzgebiet gegenüber dem restlichen n-Germanium positiv elektrisch. Die von jenseits der Grenze zugewanderten Löcher verstärken diese positive Raumladung.

Die beiderseits der Grenze auftretenden Ladungen wachsen jedoch nicht unbeschränkt. Je „negativer“ das p-Gebiet an der Trennfläche geworden ist, desto schwerer fällt es weiteren Elektronen, dort noch einzudringen; denn elektrische Ladungen gleichen Vorzeichens stoßen einander ab. Andererseits können Löcher nicht in unbegrenzter Zahl in das n-Gebiet vorstoßen, da ihre Vorgänger sie daran hindern. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand her, der durch eine bestimmte Ladungsansammlung zu beiden Seiten der Trennfläche gekennzeichnet ist.

Durch die Rekombination und durch das Abwandern von Löchern und Elektronen verarmt das der Grenze unmittelbar benachbarte Gebiet an Ladungsträgern. Es entsteht eine dünne Zwischenschicht sehr geringer elektrischer Leitfähigkeit, d. h. hohen Widerstandes. Dieses Gleichgewicht ist jedoch von außen her leicht zu beeinflussen. Wir schließen an den Kristall eine Spannungsquelle in der Weise an, daß ihr negativer Pol mit dem p-Gebiet, ihr positiver Anschluß dagegen mit dem n-Gebiet verbunden wird. Der Zeiger des Meßinstruments bleibt dann in Ruhe. Durch den pn-Kristall fließt kein Strom.

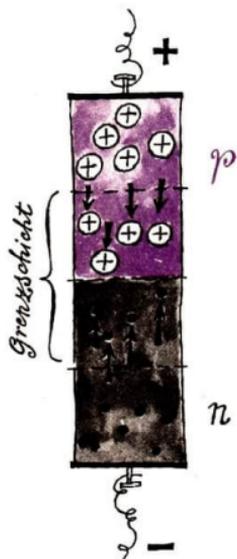
Es ist nicht schwer, diese Beobachtung zu erklären: Aus dem n-Gebiet werden Elektronen abgesaugt, da am positiven Pol der Spannungsquelle Elektronenmangel herrscht. Auf der anderen Seite der Trennfläche, im p-Gebiet, geschieht ähnliches: Die Löcher werden vom negativen Pol der Spannungsquelle angezogen.

Durch diese Vorgänge beiderseits der Trennfläche wird die Zwischenschicht breiter. Die Zahl der Elektronen und Löcher im Grenzgebiet nimmt so ab, daß es kaum noch elektrischen Strom leiten kann. Das Grenzgebiet wird zur „Sperrschicht“.

Vertauschen wir die Batterieanschlüsse, so daß der Pluspol am p-Gebiet, der Minuspol am n-Gebiet liegt, so schlägt der Instrumentenzeiger weit aus; es fließt ein kräftiger Strom durch den pn-Kristall.

Jetzt werden Elektronen von dem negativen Pol der Spannungsquelle weggestoßen und in das Grenzgebiet auf der n-Seite des Kristalls gedrückt. Sie „verstopfen“ die zugewanderten Löcher. Auf der p-Seite des Kristalls werden vom positiven Anschluß Löcher in das Grenzgebiet „gepumpt“. Sie kompensieren die dort vorhandene negative Ladung. Gleichzeitig nimmt die Zahl der Ladungsträger in Nähe der Trennfläche zu. Dadurch wird die Sperrschicht abgebaut; die elektrische Leitfähigkeit des Grenzgebietes steigt an; sein Widerstand wird sehr gering.

Warum haben wir das alles so ausführlich beschrieben? Fassen wir noch einmal zusammen: Wird ein pn-Kristall in „Sperrichtung“ (Pluspol der Spannungsquelle an n-Gebiet) geschaltet, läßt er den elektrischen Strom nicht hindurch. Wird ein pn-Kristall in „Durch-

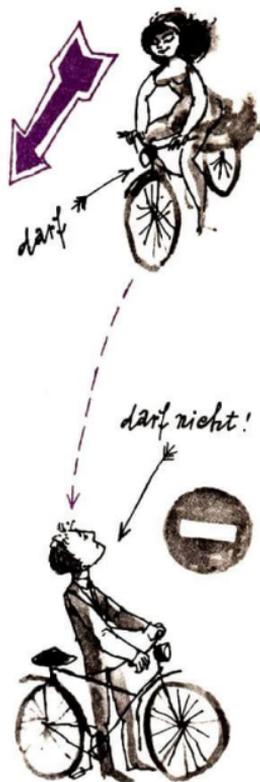


lafrichtung" (Pluspol an p-Gebiet) geschaltet, setzt er dem elektrischen Strom einen nur geringen Widerstand entgegen.

Das aber ist die Arbeitsweise eines Ventils! Verbinden wir den pn-Kristall mit den Anschlüssen einer Wechselspannungsquelle, so kann immer nur dann Strom über den Kristall fließen, solange der mit dem p-Gebiet verbundene Anschluß der Wechselspannungsquelle positiv ist. Solange er dagegen negativ ist, können Elektronen die Sperrschicht nicht durchstoßen. An die Stelle des Hin- und Herpendelns der Leitungselektronen tritt eine „schubweise“ Bewegung in *einer* Richtung. Im Stromkreis fließt kein Wechselstrom mehr, sondern Gleichstrom. Der pn-Übergang wirkt also als Gleichrichter; man nennt ihn Flächengleichrichter, weil sich die entscheidenden Vorgänge an einer Grenzfläche abspielen.

Einen kleinen Schönheitsfehler allerdings besitzt der Germaniumgleichrichter (wie jeder andere Halbleitergleichrichter). Würden wir bei dem beschriebenen Versuch ein sehr empfindliches Meßinstrument einsetzen, so zeigte dieses auch dann einen sehr schwachen Strom an, wenn der Kristall in Sperrrichtung geschaltet ist. Dieser Strom heißt „Sperrstrom“ und kann nicht völlig beseitigt werden. Für die meisten Anwendungen ist er wegen seiner geringen Stärke belanglos. Allerdings nimmt er rasch zu, wenn der Kristall erwärmt wird, und er kann dann solche Werte erreichen, daß die Gleichrichterwirkung des pn-Kristalls verlorengeht. Die Wärmeabhängigkeit des Sperrstroms deutet bereits seine Hauptursache an: Er wird vor allem durch die stets vorhandene Eigenleitung des Germaniums hervorgerufen.

Zu einem vollständigen Gleichrichter, wie er in der Technik eingesetzt wird, gehört allerdings noch etwas mehr als nur ein Halbleiterbauelement. So muß zwischen Stromversorgungsnetz und Gleichrichter ein Transformator geschaltet werden, der die Spannung des Netzes auf die erforderliche Höhe herab- oder heraufsetzt. Außerdem besteht der vom Gleichrichter gelieferte Strom nur aus einzelnen „Stromschüben“, da nur die unteren (oder oberen) Hälften der Wechselspannungswellen ausgenutzt werden. Dieser pulsierende Gleichstrom, wie der Techniker ihn nennt, kann jedoch leicht „geglättet“ werden, so daß er dem Strom aus einer Batterie fast gleicht.



## Wie Halbleitergleichrichter entstehen

### Langer Weg zum Ausgangsstoff

Jahre vergingen, ehe es gelang, Halbleitergleichrichter zu produzieren, die nicht nur im Laboratorium funktionierten, sondern auch für den Einsatz in der Technik geeignet waren. Fast schien es, als hätten sich alle nur erdenklichen Schwierigkeiten gegen die Halbleitertechniker verschworen.

Bei der Gewinnung des Rohmaterials, bei seiner Reinigung, ja sogar bei der Endmontage der Bauelemente tauchten Probleme auf, die erst durch langwierige Versuchsreihen und Untersuchungen gemeistert werden konnten. Um so höher sind die Leistungen der Forscher, Techniker und Facharbeiter zu bewerten, denen wir es verdanken, daß Halbleitergleichrichter heute für die mannigfaltigsten technischen Aufgaben zur Verfügung stehen.

Die wichtigsten Ausgangsstoffe für die Herstellung von Halbleiterbauelementen sind gegenwärtig Germanium und Silizium. Alles, was wir über ihre Reinigung und Behandlung erfahren werden, gilt in gleicher Weise für die Produktion von Halbleitergleichrichtern wie von Transistoren.

Germanium ist zwar weit verbreitet, kommt aber stets nur in geringen Mengen, gewissermaßen als Verunreinigung anderer Stoffe vor. Nirgends gibt es so etwas wie ein „Germaniumbergwerk“, und nur in wenigen Mineralien und chemischen Verbindungen ist Germanium in einem Prozentsatz enthalten, der eine einigermaßen wirtschaftliche Gewinnung möglich macht. Hier wäre vor allem das „Germanit“ zu nennen, das 4 bis 8% Germanium enthält. Außerdem ist – in der DDR, den USA und in Belgien – Germanium ein wertvolles Nebenprodukt bei der Verhüttung von Zinkerzen; es wird in England und Japan aus Rückständen der Leuchtgasgewinnung und aus Steinkohlenasche isoliert; in der CSSR und einigen anderen Ländern entzieht man es auch dem Flugstaub von Wärmekraftwerken.

Allerdings gewinnt man auf diese Weise nicht den Grundstoff Germanium, sondern zunächst Germaniumverbindungen, die überdies noch verschiedene Beimengungen enthalten.

In mehreren Arbeitsgängen werden diese Beimengungen mit Hilfe physikalischer und chemischer Methoden abgetrennt. Das Ergebnis dieser komplizierten Prozesse ist die chemische Verbindung Germaniumdioxid ( $\text{GeO}_2$ ).

Als nächstes muß dem Germaniumdioxid der Sauerstoff entzogen werden. Diese Reduktion wird mit Wasserstoffgas durchgeführt. Es strömt über das Germaniumdioxid, das in einem Graphit- oder Quarztiegel auf eine Temperatur um  $650^\circ\text{C}$  erhitzt wird, und verbindet sich mit dem Sauerstoff des Germaniumdioxids. Dabei bildet sich Wasserdampf, während Germaniumpulver zurückbleibt. Es wird anschließend bei fast  $1000^\circ\text{C}$  zu einem Barren zusammenschmolzen.

Sowohl bei der Reduktion als auch beim Zusammenschmelzen des Germaniums muß auf peinlichste Sauberkeit geachtet werden; sonst wären alle vorher vollzogenen Arbeitsgänge hinfällig. Nicht einmal mit Luft darf das Germanium in Berührung kommen, wenn seine Oberfläche nicht durch unerwünschte chemische Verbindungen „verschmutzt“ werden soll. Man schmilzt es im Vakuum oder in einem Behälter, der von einem chemisch inaktiven „Schutzgas“ durchströmt wird.



Werfen wir nun einen Blick auf die Gewinnung des zweiten wichtigen Halbleiterstoffes. Silizium nimmt unter den chemischen Elementen der Erde und ihrer Lufthülle den zweiten Platz ein. Sein Anteil macht etwas mehr als 25% aus. Meistens tritt Silizium in der Sauerstoffverbindung Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) auf, die wir als Quarz kennen und die im Sand in unbeschränkter Menge zur Verfügung steht.

Unglücklicherweise ist Siliziumdioxid eine sehr stabile Verbindung. Sie wäre mit einfachen technischen Reduktionsverfahren nicht zerlegbar. Daher geht man bei der Gewinnung von Halbleitersilizium von anderen Verbindungen aus, z. B. von Siliziumtetrachlorid ( $\text{SiCl}_4$ ) oder von Silizium-Wasserstoff-Verbindungen. Auf die Beschreibung des langwierigen und komplizierten Herstellungsganges wollen wir verzichten. Am Ende erhält man Siliziumpulver, das unter hohem Druck zu Stangen gepreßt oder im Vakuum geschmolzen wird.

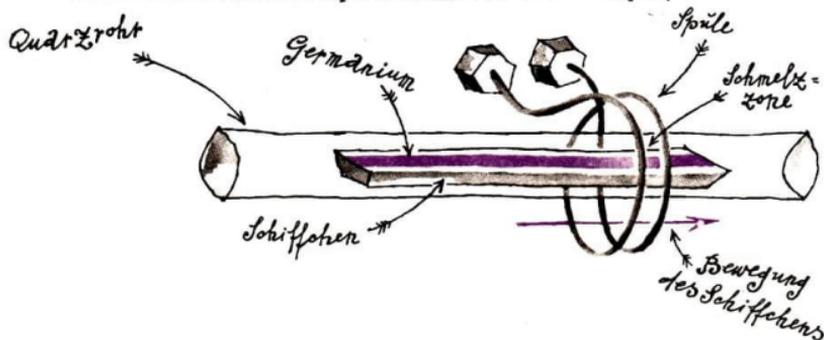
### Einmal heiß – einmal kalt

Der Germaniumbarren ist, wenn wir einen Chemiker fragen, tatsächlich „reines Germanium“. Ein Halbleiterfachmann jedoch wäre über diese Behauptung entsetzt: Für ihn ist das Germanium längst nicht sauber genug; denn noch entfallen auf eine Million Germaniumatome im Durchschnitt ein bis zwei Atome „Schmutz“. Also heißt es: weiterreinigen! Allerdings kommt man mit den Methoden der Chemie nun nicht mehr voran; man muß physikalische Verfahren zu Hilfe nehmen.

Mehrere physikalische Reinigungsmethoden wurden in den vergangenen fünfzehn Jahren erprobt. Vor allem bewährte sich das „Zonenschmelzen“.

Der Germaniumbarren wird in ein Quarzschiffchen gelegt und dieses in ein Quarzrohr geschoben. Das Rohr wird luftleer gepumpt oder mit einem Schutzgas gefüllt, um schädliche chemische Reaktionen an der Germaniumoberfläche zu verhindern.

Von außen greift eine Spule um das Quarzrohr. Sie wird von kräftigen Wechselströmen hoher Frequenz durchflossen. Bringt man einen elektrisch leitenden Körper in das Innere einer solchen Spule,



so entstehen auch in ihm starke Ströme, die den Körper erhitzen und zum Glühen oder gar Schmelzen bringen können. Bei der „induktiven Hochfrequenzerwärmung“, einem in der Industrie weitverbreiteten Verfahren, werden auf diese Weise Werkstoffe geschmolzen, gegläht, gehärtet oder gelötet.

In der Zonenschmelzapparatur schmilzt das Stück des Germaniumbarrens, das sich gerade im Spulenninneren befindet. Die Schmelzzone steht aber nicht still, sondern wandert langsam – mit einer Geschwindigkeit von z. B. 1 mm/min – durch den Barren. Entweder wird das Schiffchen langsam durch die Spule gezogen oder die Spule am feststehenden Schiffchen entlangbewegt.

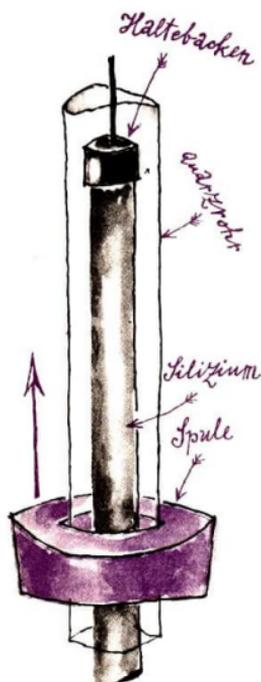
Jedes Stück des Barrens wird also einmal flüssig und erkaltet anschließend wieder. Dabei zeigt es sich – und gerade auf diesen Effekt kommt es beim Zonenschmelzen an –, daß Fremdatome nur teilweise wieder in das erstarrende Germanium eingebaut werden. Die meisten Fremdatome bleiben in der Schmelzzone zurück und wandern mit ihr langsam durch den Barren. Es ist, als würden die Verunreinigungen von der Schmelzzone mitgenommen.

Um eine möglichst vollkommene Reinigung zu erzielen, wiederholt man den Durchlauf der Schmelzzone mehrfach oder bringt mehrere Spulen in gewissem Abstand voneinander an, so daß mehrere Schmelzonen gleichzeitig durch den Barren wandern. Das Zonenschmelzen liefert einen Halbleiterstab, der aus einem langen, sehr „sauberen“ Teil besteht (ein Fremdatom auf mehrere hundert Millionen Germaniumatome) und von einem stark verunreinigten Endstück abgeschlossen wird.

Was für Germanium galt, gilt gleichermaßen auch für Silizium. Es muß ebenfalls nach physikalischen Methoden gereinigt werden. Wollte man dabei genauso vorgehen wie beim Germanium, wären allerdings die technologischen Schwierigkeiten nur unter großen Mühen zu überwinden.

Während Germanium bei einer Temperatur von rund 960 °C schmilzt, liegt der Schmelzpunkt des Siliziums fast um 500 °C höher. Bei dieser hohen Temperatur wäre nur sehr schwer zu vermeiden, daß Teile des Schiffchens das Silizium an der Oberfläche verunreinigen. Außerdem gibt es nur sehr wenige Stoffe, aus denen man derart hitzebeständige Schiffchen anfertigen könnte.

Zur Reinigung des Siliziums wurde daher ein Verfahren ausgearbeitet, das auf Schiffchen und Schmelztiigel verzichtet. Beim „tiigel-freien Zonenschmelzen“ befindet sich der Siliziumbarren, an seinen Enden von Wolframbacken gehalten, im Inneren eines senkrechtstehenden Quarzrohres, das mit einem Schutzgas gefüllt ist. Die Spule, mit deren Hilfe das Silizium erhitzt wird, wandert langsam von unten nach oben über das Quarzrohr. Dabei wird eine schmale Zone des Siliziums geschmolzen. Adhäsions- und Kohäsionskräfte halten das flüssige Silizium zusammen und verhindern sein Auseinanderfließen. Auch diesmal wandert die Zone allmählich durch den ganzen Siliziumbarren und nimmt die Verunreinigungen zum



oberen Ende mit. Auch hier muß der Reinigungsprozeß mehrfach wiederholt werden; dabei scheidet aber die Möglichkeit aus, mehrere Schmelzonen gleichzeitig wandern zu lassen. Deshalb wird Silizium oft nach dem Zonenschmelzverfahren vorgereinigt, während das tiegelfreie Zonenschmelzen die Feinreinigung übernimmt.

In jüngster Zeit bringt man das Silizium mitunter dadurch auf die Schmelztemperatur, daß man es mit Elektronen „beschießt“. Dabei wird viel weniger Energie benötigt als bei Hochfrequenzerhitzung.

### Kristalle werden gezogen

Wir sind noch längst nicht am Ziel. Das Material, das der Zonenschmelzapparatur entnommen wird, ist für die Produktion von Gleichrichtern und Transistoren noch nicht geeignet. Würden wir es unter stärkster Vergrößerung betrachten, so sähen wir ein Bild, das an einen Haufen durcheinandergeworfener Ziegel erinnert: Der gereinigte Germanium- oder Siliziumbarren besteht aus winzigen, in allen möglichen Richtungen zusammengewachsenen Kristallen; zwischen ihnen hat sich eine Unzahl von kleinsten Grenzflächen gebildet, vergleichbar den Lücken und Hohlräumen zwischen durcheinandergeworfenen Ziegeln.

Die Halbleitertechnik aber verlangt Material, das nach allen Richtungen gleichmäßig und fehlerfrei aufgebaut ist und keine unregelmäßigen Grenzflächen im Inneren aufweist. Um bei unserem Bild zu bleiben: Aus dem Ziegelhaufen muß ein Ziegelstapel werden. An die Stelle von Millionen und aber Millionen winziger Kristalle muß ein einheitlich und regelmäßig gebauter „Einkristall“ treten.

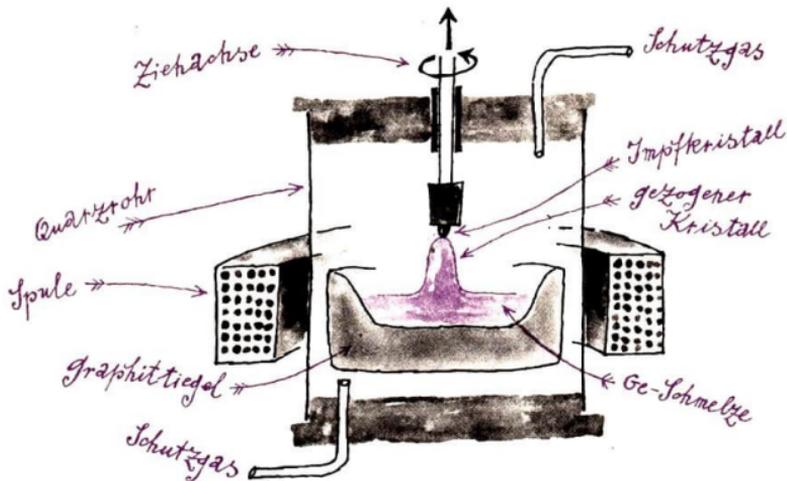
Das Gewinnen von Einkristallen macht eine weitere Bearbeitung des Germaniums beziehungsweise Siliziums notwendig. Die gereinigten Barren werden deswegen wieder zerstückelt und eingeschmolzen.

Einkristalle werden „gezogen“: In flüssiges Germanium wird ein kleiner Einkristall als „Impfkristall“ oder „Keim“ getaucht. Zieht man den Keim langsam aus der Schmelze, so „wächst“ an ihm der geforderte Einkristall. Soweit das Prinzip. Seine Verwirklichung ist nicht ganz so einfach.

Die wichtigsten Teile einer Kristallziehvorrichtung sind im Bild zu erkennen: In einem Quarz- oder Graphittiegel wird der zerstückelte Germaniumbarren geschmolzen. Ähnlich wie beim Zonenschmelzen wird das Schmelzgut durch eine von Hochfrequenzstrom durchflossene Spule aufgeheizt, die den Tiegel umschließt. Eine selbsttätige Regelvorrichtung hält die Temperatur der Schmelze auf dem vorgeschriebenen Wert.

Der Impfkristall wird von oben in die Schmelze getaucht und dann mit einer Geschwindigkeit von wenigen Zentimetern je Stunde herausgezogen. Damit der Kristall gleichmäßig wächst, wird der





Keim mit dem sich bildenden Kristall ständig um seine Längsachse gedreht. Jedes Teilchen des wachsenden Kristalls führt also eine Schraubenbewegung mit sehr geringer Steigung aus. Man zieht auf diese Weise etwa handlange Einkristalle aus der Schmelze.

Damit der Kristall ungestört wächst, müssen Zieh- und Rotationsgeschwindigkeit genau eingehalten werden. Auch Erschütterungen sind sorgfältig von der Apparatur fernzuhalten. Sogar Schwingungen, die durch die Motoren für Kristallvorschub und -drehung verursacht werden, dürfen sich nicht auf den Kristall übertragen.

Die ganze Kristallziehapparatur ist luftdicht abgeschlossen; der Kristall wächst im Vakuum oder in einem Schutzgas.

Siliziumeinkristalle können auf die gleiche Weise gewonnen werden. Es treten dabei wegen der Eigenschaften des Siliziums ähnliche Schwierigkeiten auf, wie wir sie schon beim Zonenschmelzen kennenlernten. Es ist jedoch gelungen, ihrer Herr zu werden.

Die Halbleitertechnik benötigt meistens Germanium oder Silizium eines bestimmten Leitungstypus, also n- oder p-Germanium (beziehungsweise Silizium). Es müssen drei- oder fünfwertige Atome in genau bemessener Menge in den Einkristall eingebaut werden; denn er liefert das Grundmaterial für alle Bauelemente.

Beim Dotieren gibt man geeignete Fremdstoffe in die Schmelze. Setzt man z. B. Arsen, Antimon oder Wismut zu, so zeigt der gezogene Einkristall n-Leitfähigkeit.

pn-Übergänge lassen sich gleichfalls schon während des Einkristallziehens herstellen. Hat das aus der Schmelze gezogene n-leitende Stück des Einkristalls die gewünschte Länge erreicht, so setzt man der Schmelze dreiwertige Fremdstoffe zu, etwa Gallium, Indium oder Bor. Die hinzugefügte Menge wird so dosiert, daß nicht nur die n-Leitfähigkeit aufgehoben wird, sondern daß es darüber hin-

aus zu einem Umschlag in p-Leitfähigkeit kommt. Das im weiteren Verlauf aus der Schmelze gezogene Stück des Einkristalls ist also p-leitend.

Wird später nochmals n-leitendes Material zugesetzt, so läßt sich ein erneuter Umschlag des Leitungstypus herbeiführen.

Bei einem anderen Dotierungsverfahren werden der Schmelze, wenn pn-Übergänge erreicht werden sollen, die Zusatzstoffe für beide Leitungstypen gleichzeitig zugeführt. Durch genau berechneten Wechsel der Ziehgeschwindigkeit wird erreicht, daß der eine oder andere Leitfähigkeitstypus überwiegt.

### Mit Lupe und Pinzette

Jetzt erst trennen sich die Wege, die zur Herstellung von Halbleitergleichrichtern einerseits und zur Produktion von Transistoren andererseits führen.

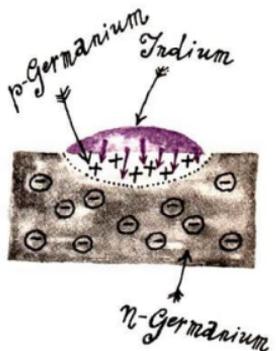
Im Prinzip könnte man bereits ein Stück eines Einkristalls als Gleichrichter verwenden, das einen pn-Übergang aufweist; ein solches Stück entspräche dem pn-Kristall, an dem wir den Gleichrichtereffekt untersucht haben. Da sich aber aus einem Einkristall nur wenige Gleichrichter herausschneiden ließen, wäre ein solcher Halbleitergleichrichter alles andere als billig. Man geht daher anders vor.

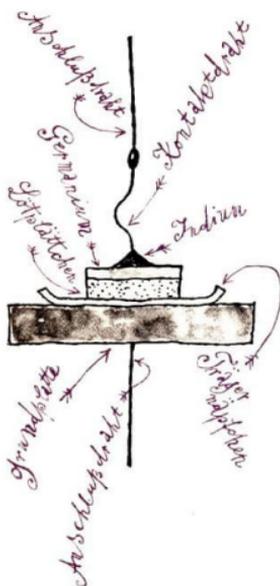
Zunächst wird ein n-leitender Einkristall quer zu seiner Längsrichtung in Scheiben geschnitten, deren Stärke je nach dem Gleichrichtertyp zwischen Bruchteilen eines Millimeters und einigen Millimetern liegt. Die Scheiben werden in quadratische oder rechteckige Plättchen zerteilt. Als Werkzeug dienen häufig schnell rotierende Diamanttrennscheiben. Der Materialverlust beim Schneiden ist groß, obwohl das „Sägemehl“ wieder in den Produktionsablauf zurückgeführt werden kann. In jüngster Zeit „schneidet“ man auch mit Ultraschall oder mit Elektronenstrahlen. Die Materialverluste können durch diese neuen Methoden erheblich gesenkt werden.

Das Schneiden hat eine unangenehme Folge: Die regelmäßige Kristallstruktur wird an den Schnittflächen zerstört. Man muß daher die Plättchen noch einer mechanischen und einer chemischen Behandlung unterziehen, bei der die Kristallstruktur wieder zutage tritt. Außerdem wird die Oberfläche von allen Verunreinigungen befreit, die sich abgesetzt haben könnten.

Auch die Chemikalien, die für diese Arbeitsgänge benutzt werden, enthalten Germanium. Auf die Dauer entstehen dadurch erhebliche Verluste. Um sie zu vermeiden, wurde in unserer Republik ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe das Germanium aus Ätzlösungen zurückgewonnen und nochmals verwendet werden kann.

Damit aus dem n-leitenden Germaniumplättchen ein Gleichrichter wird, muß ein pn-Übergang geschaffen werden: Auf das Germaniumplättchen wird eine Pille aus dreiwertigem Indium gelegt.





Für kurze Zeit werden Plättchen und Pille auf eine Temperatur um 600 °C erhitzt. Dabei schmilzt das Indium, das Germanium unter der Pille wird oberflächlich gelöst. Beim Abkühlen kehren die Germaniumatome in das Kristallgitter zurück. Dabei werden zahlreiche Indiumatome in den Kristall eingebaut, und da Indium dreiwertig ist, wird dieser Kristallteil p-leitend. Es bildet sich eine flache Mulde p-leitenden Germaniums, die scharf gegen den übrigen n-leitenden Kristall abgegrenzt ist. Das Legieren verläuft wieder in einer Schutzgasatmosphäre.

Ein Kontaktdraht, häufig aus Silber, stellt eine leitende Verbindung mit dem Indium her. An das freie Ende des Kontaktdrahtes wird ein Anschlußdraht gelötet. Mittels eines Lötplättchens wird das Gleichrichterelement im Trägernäpfchen befestigt. Die Grundplatte, die das Element trägt, wird mit einem Anschlußdraht oder einem Schraubbolzen versehen.

Der Gleichrichter wird durch ein Gehäuse hermetisch abgeschlossen. Dabei kommt es nicht nur darauf an, das Eindringen von Luft, Staub oder Feuchtigkeit zu verhindern. Das Schutzgehäuse muß auch lichtdicht sein, da Germanium zu den Stoffen mit lichtelektrischen Eigenschaften zählt.

Während des Entstehens hat jeder Gleichrichter eine Reihe mechanischer und elektrischer Prüfungen und Messungen zu absolvieren. Die dabei benötigten Meß-, Prüf- und Sortiereinrichtungen arbeiten heute häufig schon völlig automatisch. Die Produktion von Siliziumgleichrichtern verläuft ähnlich. Nur wird statt der Indiumpille ein Draht aus Reinstaluminium anlegiert.

Nicht ohne Grund haben wir den Herstellungsgang eines der einfachsten Halbleiterbauelemente recht ausführlich beschrieben. Einmal kehren die gleichen Arbeitsgänge und Schwierigkeiten – das Gewinnen des Rohmaterials, seine Reinigung und das Ziehen der Einkristalle – bei vielen Halbleiterbauelementen mit nur geringen Abänderungen wieder. Zum anderen aber wollten wir schon hier zeigen, wie sehr sich die Halbleitertechnik mit ihren extremen Forderungen an die Reinheit der verwendeten Stoffe von den meisten sonst in der Industrie angewandten technologischen Verfahren unterscheidet.

## Was Halbleitergleichrichter leisten

### Die Vorläufer sind überrundet

Germanium- und Siliziumgleichrichter (in Anlehnung an die zur Gleichrichtung benutzten Elektronenröhren nennt man sie auch Germanium- beziehungsweise Siliziumdioden) waren – wir erwähnten es bereits – nicht die ersten Halbleitergleichrichter. Sie hatten Vorläufer in den Kupferoxydul- und Selengleichrichtern, die 1924 und 1930 Eingang in die Technik fanden.

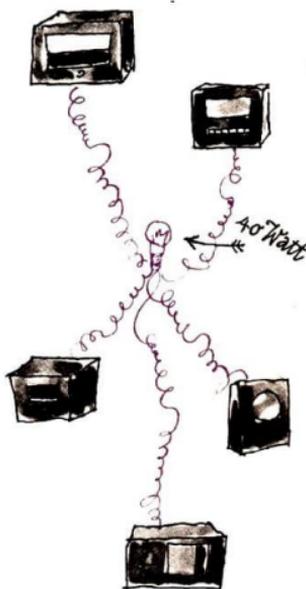
Auch beim Selen- und beim Kupferoxydulgleichrichter werden die Wechselströme durch die Ventilwirkung einer Sperrschicht gleichgerichtet. Sie liegt allerdings nicht im Inneren eines Einkristalls, sondern an den Grenzflächen zwischen Metall und Halbleiter, zwischen Kupfer und Kupferoxydul oder zwischen einer Metallplatte und einer Selenschicht.

Diese „Trockengleichrichter“ – so nannte man sie im Gegensatz zu den gleichfalls üblichen „nassen“, elektrochemischen Gleichrichtern – waren ein echter Fortschritt der Gleichrichtertechnik: Sie konnten auch unter rauen Betriebsbedingungen eingesetzt werden. Während Gleichrichterröhren nur einige tausend Stunden durchhielten und dann ausgewechselt werden mußten, nutzten sich Trockengleichrichter praktisch nicht ab. Noch nach hunderttausend Betriebsstunden erfüllten sie ihre Pflicht. Einer besonderen Wartung bedurften sie nicht.

Ein weiterer Vorzug zeigte sich vor allem dort, wo kleine Leistungen gleichzurichten waren, z. B. in der Nachrichtentechnik. Dort hatten sich Gleichrichterröhren durchgesetzt. Sie verbrauchten aber bereits elektrische Energie, um überhaupt erst einmal funktionieren zu können. In ihrem Inneren befand sich eine sogenannte Kathode, die durch elektrischen Strom geheizt werden mußte, damit die Röhre gleichrichten konnte. So war für die in Hunderttausenden von Rundfunkempfängern und Verstärkern eingesetzte Gleichrichterröhre AZ 12 eine „Heizleistung“ von rund 8 W aufzubringen. Das klingt bescheiden; doch mit der Gleichrichter-Heizleistung von fünf Empfängern könnte bereits eine 40-W-Lampe erstrahlen, und in einer Großstadt mit 100 000 Empfängern würden in den Abendstunden, wenn fast alle Geräte eingeschaltet sind, 800 kW allein zum Heizen der Gleichrichterröhren verbraucht. Acht Straßenbahnzüge könnte man mit dieser Leistung betreiben. Außerdem ist ein besonderer Transformator oder wenigstens eine zusätzliche Transformatorwicklung auf dem Gleichrichtertransformator vonnöten, um den Heizstrom abnehmen zu können.

Der Trockengleichrichter braucht weder Heizung noch Heiztransformator. Sein Einsatz hilft Elektroenergie und wertvolle Rohstoffe sparen. Anfänglich gelang es nur, Kupferoxydul- und Selengleichrichter für schwache Ströme herzustellen; Großverbraucher von Gleichstrom konnten nur schwer aus Trockengleichrichtern gespeist werden. Das änderte sich, als man mit den technologischen Schwierigkeiten fertig geworden war. Sie sind übrigens bei der Produktion von Selen- und Kupferoxydulgleichrichtern geringer als bei der Herstellung von Germanium- und Siliziumdioden.

Der letzte Satz provoziert geradezu eine Frage: Wenn sich die Selen- und Kupferoxydulgleichrichter so bewährten, warum beschritt man dann überhaupt den mit Schwierigkeiten und Hindernissen gepflasterten Weg zum Germanium- und Siliziumgleichrichter? Die Antwort ist schnell gegeben: Germanium- und Siliziumdioden haben Kupferoxydul- und Selengleichrichter in allen



wichtigen Eigenschaften überrundet; die komplizierte Technologie wird durch zahlreiche Vorzüge mehr als aufgewogen. Wir haben sie zunächst einmal tabellarisch festgehalten:

	Kupferoxydulgleichrichter	Selengleichrichter	Germaniumgleichrichter	Siliziumgleichrichter
maximale Sperrspannung (V)	6	25	110	über 500
Stromdichte (A/cm <sup>2</sup> )	0,1	0,15	70	150
Wirkungsgrad (%)	70	90	97	99
Rauminhalt (relativ)	30	15	3	1



### Kleiner, leichter, sparsamer

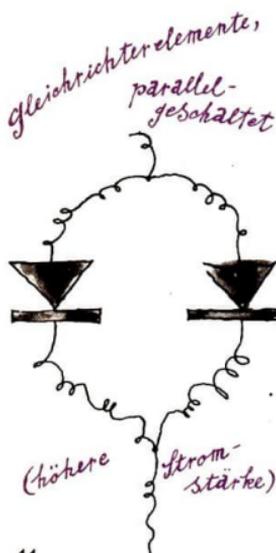
Unter der „maximalen Sperrspannung“ versteht man die höchste Spannung, die dem in Sperrichtung geschalteten Gleichrichter zugemutet werden kann. Wird sie wesentlich überschritten, bedeutet dies das Ende des Gleichrichters. Der pn-Übergang wird zerstört.

Der Kupferoxydulgleichrichter verträgt nur Sperrspannungen bis 6 V. Sollen höhere Spannungen gleichgerichtet werden, so müssen mehrere Gleichrichter hintereinandergeschaltet werden. Die Spannung verteilt sich dann auf die einzelnen „Gleichrichterelemente“. So braucht man für eine Spannung von 90 V mindestens fünfzehn Gleichrichterelemente. Man könnte sie durch ein Germanium-Gleichrichterelement ersetzen; denn dessen Sperrspannung beträgt 110 V. Ein Silizium-Gleichrichterelement kann sogar mehr als achtzig Kupferoxydul- beziehungsweise zwanzig Selengleichrichterelemente vertreten.

In der zweiten Zeile der Tabelle finden wir die „Stromdichte“. Es ist die höchste Stromstärke, die durch 1 cm<sup>2</sup> „aktiver“ Gleichrichterfläche fließen darf. Beim Kupferoxydul- und beim Selengleichrichter ist die Stromdichte sehr niedrig. Um stärkere Ströme gleichrichten zu können, muß man große Gleichrichterflächen wählen oder eine Anzahl kleiner Gleichrichter „parallelschalten“.

Germanium- und Siliziumgleichrichter dagegen kann man trotz kleiner aktiver Gleichrichterfläche mit hohen Stromstärken belasten. Ein pfenniggroßes Siliziumplättchen verträgt Ströme bis 200 A (ein Strom solcher Stärke fließt durch die Motoren eines Straßenbahnwagens). Ein Kupferoxydulgleichrichter derselben Leistungsfähigkeit müßte eine Fläche von mindestens 40 cm · 50 cm aufweisen.

Die Bedeutung der hohen Sperrspannung und der großen Stromdichte von Germanium- und Siliziumgleichrichtern ist damit offensichtlich: Moderne Gleichrichter beanspruchen nur einen Bruchteil

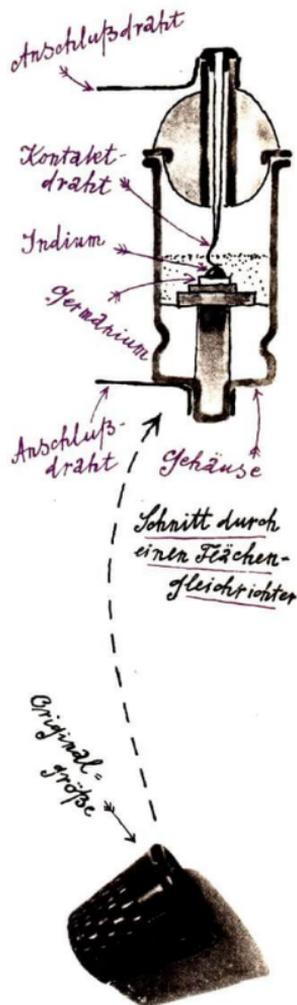


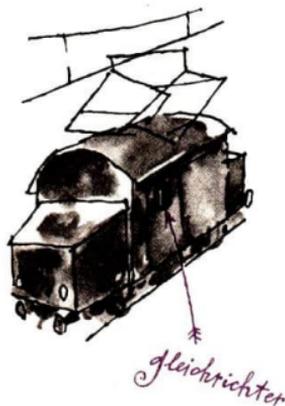
des Raumes ihrer Vorgänger. Um wieviel sie „geschrumpft“ sind, geht aus den Vergleichszahlen für den Rauminhalt von Gleichrichterelementen derselben Leistungsfähigkeit hervor. An die Stelle langer, aus zahlreichen Elementen zusammengesetzter „Gleichrichtersäulen“ großen Durchmessers treten Germanium- oder Siliziumgleichrichter, die häufig nicht größer als ein Fingerhut sind. In Rundfunk- und Fernsehgeräten begegnen uns heute vorwiegend noch Gleichrichterröhren oder Selengleichrichter. Ihr Rauminhalt liegt ungefähr zwischen 20 und 60 cm<sup>3</sup>. Für den gleichen Zweck stehen bereits Siliziumgleichrichter zur Verfügung, die ein Volumen von nur 55 mm<sup>3</sup> aufweisen; andere, leistungsfähigere Gleichrichter sind bei 8 mm Durchmesser nur 8 mm hoch. Außerdem sind die für Nachrichtengeräte benutzten Germanium- und Siliziumgleichrichter so leicht (sie wiegen allenfalls wenige Pond), daß eine besondere Montage oft nicht nötig ist. Man lötet sie lediglich mit ihren Anschlußdrähten fest.

Ladegeräte für Akkumulatoren beanspruchten früher stets viel Platz und waren schwer. Heute kann man sie handlich und leicht konstruieren. Es gibt Ausführungen – beispielsweise zum Aufladen von Akkumulatoren –, die so leicht und klein sind, daß man sie einfach an eine Steckdose steckt. Daß sich die Akkumulatoren von Kofferradios ohne irgendwelche Zusatzgeräte am Lichtnetz aufladen lassen, ist gleichfalls den Halbleitern zu verdanken.

Am meisten wirkt sich naturgemäß die Volumenverringerng dort aus, wo sehr große elektrische Leistungen gleichzurichten sind. So ersetzte man in einem Aluminiumwerk die bisherige Gleichrichteranlage, die bei einer Spannung von 600 V einen Strom von 10 000 A zu liefern hatte, durch Siliziumgleichrichter. Dadurch wurde der bisherige Gleichrichtersaal überflüssig. Die gesamte Gleichrichtereinheit ist nunmehr in einem Gestell von 3 m · 3 m · 1,5 m untergebracht. Ähnliche Ergebnisse erhielt man in vielen Betrieben der Elektrochemie, die dazu übergangen, ihre Gleichrichteranlagen zu modernisieren.

An raumsparenden, widerstandsfähigen Gleichrichtern sind auch die Eisenbahnfachleute stark interessiert. Auf der ganzen Welt besteht die Tendenz zur Elektrifizierung der Bahnen; überall stößt man dabei auf den gleichen Widerspruch. Die Energie für den Bahnbetrieb wird am wirtschaftlichsten als Wechselstrom übertragen; zum Antrieb der Lokomotiven aber sind Gleichstrommotoren besser als Wechselstrommotoren geeignet. Sollen die Vorteile der Wechselstromübertragung und des Gleichstrommotors genutzt werden, so muß man „Gleichrichterlokomotiven“ bauen, in denen der Strom aus der Fahrleitung erst gleichgerichtet wird und anschließend die Motoren treibt. Hierin sind Germanium- und Siliziumgleichrichter allen anderen Gleichrichterarten überlegen. Man kann sie zu kompakten, leicht auswechselbaren Baugruppen zusammenfassen und jedem Fahrmotor eine Gleichrichtereinheit zuweisen. Sogar die Gleichrichtereinheiten von schweren Güterzuglokomoti-





ven beanspruchen nur einen Metallzylinder von 70 cm Durchmesser und knapp 90 cm Höhe.

Auch in unserer Republik entwickelte man Gleichrichterlokomotiven. Sie können aus dem 50-Hz-Energieversorgungsnetz gespeist werden. Erste Ausführungen wurden der Öffentlichkeit im Sommer 1962 auf einer eigens dafür eingerichteten Versuchsstrecke bei Henningsdorf vorgestellt.

Sehr wichtig ist der hohe Wirkungsgrad von Germanium- und Siliziumgleichrichtern. Je größer er ist, desto geringer sind die Verluste. Besitzt ein Gleichrichter beispielsweise einen Wirkungsgrad von 75%, so geht ein Viertel der dem Gleichrichter zugeführten Energie „verloren“, drei Viertel stehen als Gleichstromenergie zur Verfügung. Bei einem Wirkungsgrad von 95% betragen die Verluste nur noch 5%.

Es gibt mehrere Gründe, den Wirkungsgrad von Gleichrichteranlagen möglichst hochzutreiben. Als erster sei die Notwendigkeit genannt, mit Elektroenergie so sparsam wie nur möglich umzugehen. Bei den gewaltigen elektrischen Leistungen, die z. B. in der elektrochemischen Industrie umgesetzt werden, wirken sich bereits wenige Prozent Erhöhung des Wirkungsgrades überraschend aus.

Die Gleichrichteranlage des schon genannten Aluminiumwerkes entnimmt dem Kraftnetz 6030 kW und verbraucht bei einer Betriebszeit von 8000 Stunden im Jahr etwas über 48 Millionen kWh. Hätte man sich mit Kupferoxydulgleichrichtern begnügt, so betrüge der jährliche Energieverbrauch etwa 68 Millionen kWh. Mit den 20 Millionen kWh, die durch die Verwendung von Siliziumgleichrichtern eingespart wurden, könnte man 1000 t Aluminium mehr produzieren. Allein durch die niedrigeren Energiekosten machen sich Siliziumgleichrichter bezahlt.

Noch in einer anderen Hinsicht ist der Wirkungsgrad wichtig: Der größte Teil der Gleichrichterverluste wird in Wärme umgewandelt, die durch Kühlen des Gleichrichters abgeführt werden muß. Je geringer die Verluste sind, desto weniger Wärme entsteht (im Vergleich zu einem Gleichrichter derselben Leistung, aber geringeren Wirkungsgrades), und desto einfacher wird die Kühlung. Der Siliziumgleichrichter mit seinem Wirkungsgrad von 99% (manchmal bis 99,8%) schneidet hier mit weitem Vorsprung ab.

### Leistungsfähigkeit groß geschrieben

Als die ersten Labormuster von Germanium- und Siliziumdioden funktionierten, hätten nicht einmal Optimisten unter den Fachleuten es für möglich gehalten, daß keine zwei Jahrzehnte später Halbleitergleichrichter für große und größte Leistungen zur Verfügung stehen würden. Gleichrichteraggregate für Ströme von 100 000 A sind heute nicht mehr selten; größere Anlagen werden projiziert oder bereits ausgeführt.

Es gelingt allerdings nicht – vielleicht sollten wir besser sagen

„noch nicht“ – , Ströme von vielen Tausenden von Ampere in einem Gleichrichterelement zu beherrschen. Deshalb schaltet man auch Germanium- und Siliziumgleichrichter so zu Gruppen zusammen, wie man es mit Kupferoxydul- und Selengleichrichtern getan hatte. Dabei kommt man immer mehr davon ab, von Fall zu Fall Spezialgleichrichter zu entwerfen und zu konstruieren. Statt dessen hat man einheitliche, standardisierte „Bausteine“ entworfen, die sich für die am häufigsten vorkommenden Spannungen und Stromstärken kombinieren lassen. Dadurch werden nicht nur die Herstellungskosten niedriger; auch die „Reservehaltung“ wird erleichtert, und die Zeit für Reparaturen sinkt, da meistens nur die schadhafte Bausteine ausgewechselt werden müssen.

Ein wichtiges Ziel der Halbleitertechnik ist es, die Leistungsfähigkeit der einzelnen Gleichrichterelemente zu erhöhen. Deshalb wird in Zukunft der Germaniumgleichrichter gegenüber dem Siliziumgleichrichter mit höherer Sperrspannung, besserem Wirkungsgrad und größerer Stromdichte immer mehr zurücktreten. Berichte über Versuchsmuster mit Sperrspannungen bis 2000 V und Stromdichten um  $500 \text{ A/cm}^2$  zeigen, daß der Siliziumgleichrichter noch längst nicht am Ende seiner Möglichkeiten ist.

Für hohe Leistungen wurden neuartige Bauformen geschaffen. Man lötet z. B. auf eine Molybdänscheibe ein Plättchen aus n-leitendem Germanium oder Silizium. Auf dieses Plättchen wieder wird mit Indium eine zweite Molybdänscheibe gelötet. Im Grenzgebiet Halbleiter-Indium entsteht die Sperrschicht, während die Molybdänscheiben vor allem für die notwendige Wärmeabfuhr sorgen.

Damit wären wir bei einem weiteren wichtigen Problem, das bei der Leistungserhöhung von Gleichrichtern auftaucht: Die Arbeitstemperatur darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Der Hauptgrund dafür ist die zunehmende Eigenleitung, die den Gleichrichtereffekt verschlechtert und schließlich zur Zerstörung des Gleichrichters führt. Germaniumgleichrichter bleiben nur bis zu  $80^\circ \text{C}$  betriebsfähig, während Siliziumgleichrichter bis  $125^\circ \text{C}$  und darüber eingesetzt werden können, weil die Bindungen zwischen Siliziumatomen nicht so leicht aufzutrennen sind wie die zwischen Germaniumatomen.

Erst bei größerer Erwärmung, d. h. bei erhöhter Energiezufuhr, werden im Silizium so viel Elektronen freigesetzt, daß die Eigenleitung stärker zunimmt.

Verschiedene Kühlmethoden wurden eingeführt, um die Wärme abzuleiten. Bei sehr kleinen elektrischen Leistungen, z. B. bei Gleichrichtern für Geräte der Nachrichtentechnik, genügt es, den Gleichrichter unmittelbar auf das Metallchassis zu schrauben. Es führt die Wärme gut ab. Reicht diese Art der Kühlung nicht aus, so versieht man den Gleichrichter mit großflächigen Kühlfahnen oder Kühlflügeln, die die Wärme an die Luft abgeben.

Bei Starkstromgleichrichtern beschleunigt man die Wärmeabfuhr durch einen kräftigen Luftstrom. Man bläst dazu den Gleichrichter



mit einem Ventilator an. Gleichrichter mit Wasserkühlung wurden ebenfalls erprobt.

Ein bedeutender Fortschritt wäre es, wenn die Temperaturgrenze für Gleichrichter weiter hinausgeschoben werden könnte. Dazu sind allerdings andere Halbleitermaterialien erforderlich. Bei Versuchen mit Titan- und Magnesiumverbindungen erreichte man immerhin schon Arbeitstemperaturen zwischen 200 °C und 400 °C.

## Alles schon einmal dagewesen?

### Alter Bekannter im neuen Rock

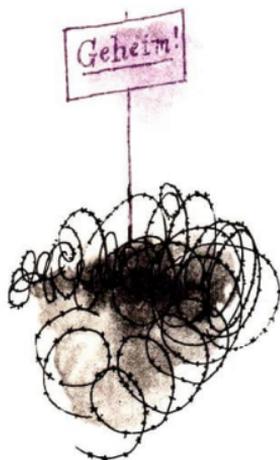
Die schnelle Entwicklung der Elektronenröhren und der Röhrenempfänger hatte den Kristalldetektor fast in Vergessenheit geraten lassen; nur in den Geschäften für Bastlerbedarf führte er ein bescheidenes und verstaubtes Dasein. Wo Hochfrequenzspannungen gleichzurichten waren, setzte man stets die zuverlässigeren Röhren ein.

Alles schien in schönster Ordnung – bis man daran ging, in der Funktechnik zu immer kürzeren Wellen vorzustoßen. Bei Versuchen mit Ultrakurzwellen, noch mehr aber auf Dezimeter- und später Zentimeterwellen stellte sich heraus, daß Elektronenröhren nur noch unbefriedigend arbeiteten. Als Hochfrequenzgleichrichter für Zentimeterwellen versagten sie völlig.

Man erinnerte sich des Kristalldetektors. Er war den Röhren in einem entscheidenden Punkt überlegen: Er richtete noch Spannungen höchster Frequenz gleich und schien daher für Dezimeter- und Zentimeterwellen gut geeignet zu sein. Vorher mußte man allerdings seiner Unzuverlässigkeit und seiner mechanischen Empfindlichkeit Herr werden. Das gelang, als man die bisher üblichen Detektormaterialien durch Silizium und bald danach auch durch Germaniumkristalle ersetzte, denen eine feine Wolframdrahtspitze mit einstellbarem Druck aufsaf. Die Silizium- und Germaniumdetektoren wurden als steck- oder einschraubbare Patronen ausgeführt und leisteten, was man von ihnen erwartete.

Wir wollen nicht verschweigen, daß diese Leistung keinem friedlichen Zweck diene: Silizium- und Germaniumdetektoren wurden im zweiten Weltkrieg zunächst ausschließlich für Radargeräte produziert. Hatte der Kristalldetektor wesentlich dazu beigetragen, den Rundfunk den Menschen vieler Länder zugänglich zu machen, so halfen seine „Enkel“ dabei, Menschenleben zu vernichten und Wohnstätten einzuäschern.

Schuld daran waren gewiß nicht die Silizium- und Germaniumdetektoren. Die Schuld trugen jene, die alle technischen Errungenschaften zuerst unter dem Aspekt der militärischen Brauchbarkeit betrachteten und zur Forcierung ihrer aggressiven Rüstung mißbrauchten. Sie zwangen ein so friedliebendes Land wie die Sowjet-



union, ihrerseits wertvolle Erkenntnisse zunächst in den Dienst der Landesverteidigung zu stellen. Die systematische Weiterentwicklung der Radar-Detektoren führte zur Germanium- und Siliziumspitzendiode, die nach Kriegsende auch Eingang in die „zivile“ Hochfrequenztechnik fand.

Der Aufbau einer Germaniumspitzendiode ist relativ einfach: Ein Germaniumplättchen wird auf eine Trägerplatte gelötet. Dem Germanium sitzt die S-förmig gebogene, feine Drahtspitze aus Wolfram, Molybdän, Phosphorbronze oder Gold auf.

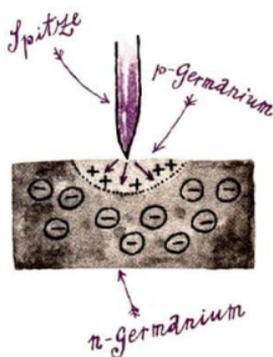
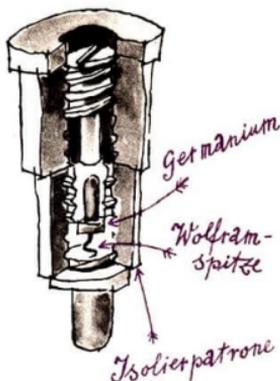
Durch einen kurzen Stromstoß wird die Spitzendiode „formiert“. Die Drahtspitze wird dabei gewissermaßen mit der Germaniumoberfläche verschweißt und kann auch bei mechanischer Erschütterung nicht mehr verrutschen. Gleichzeitig bildet sich – wenn als Ausgangsmaterial n-Germanium verwendet wurde – in unmittelbarer Spitzennähe eine p-leitende Schicht. Am Übergang zwischen p- und n-Germanium vollzieht sich die Gleichrichtung. Das Gleichrichterelement wird luft-, licht- und feuchtigkeitsdicht gekapselt.

Die „aktive Fläche“ eines solchen Gleichrichters ist sehr klein; er kann deswegen nur mit äußerst schwachen Strömen belastet werden. Das ist jedoch kaum ein Nachteil, denn die Hochfrequenzleistungen, die eine Spitzendiode zu verarbeiten hat, sind in der Praxis immer sehr gering.

Übrigens verdanken wir gerade der kleinen Gleichrichterfläche die Möglichkeit, Spitzendioden bei höchsten Frequenzen anzuwenden. Ein Flächengleichrichter arbeitet nämlich um so schlechter, je höher die Frequenz des gleichzurichtenden Stromes ist. Ströme sehr hoher Frequenz „überspringen“ die Sperrschicht – ein Effekt, der bei der Frequenz des Lichtnetzes noch unmerklich ist, bei hohen Funkfrequenzen dagegen die Wirkung des Gleichrichters zunichte machen würde. Der unerwünschte „Nebenschluß“ wird um so geringfügiger, je kleiner die aktive Gleichrichterfläche ist. Das erklärt die Überlegenheit der Spitzendiode bei der Gleichrichtung hoher Frequenzen.

Zur Hochfrequenzgleichrichtung haben sich Spitzendioden allgemein durchgesetzt. Wir sind hier Zeugen eines interessanten, durch die Entwicklung der Technik verursachten Wechselspiels: Wurde einst der Kristalldetektor durch die Elektronenröhre abgelöst, so ist heute die umgekehrte Entwicklung zu beobachten: Elektronenröhren als Hochfrequenzgleichrichter verschwinden immer mehr; an ihre Stelle treten Spitzendioden, die verbesserten Nachkommen des Kristalldetektors.

In modernen Rundfunk- und Fernsehempfängern sind mehrere Hochfrequenzgleichrichter erforderlich, sei es zur Gewinnung des Bildes, des Tones oder in selbsttätigen Regelschaltungen (beispielsweise bei der automatischen Schwundregelung in Rundfunkgeräten oder bei der selbsttätigen Kontrastregelung und Feinabstimmung von Fernsehempfängern). Würde man hier überall Röhren einsetzen, so machte sich der erhöhte Energiebedarf für die Röh-



renheizung schon unangenehm bemerkbar. Der Betrieb des Empfängers würde teuer, ein größerer Transformator wäre erforderlich. Auch der Raumbedarf der Gleichrichterröhren fiel schließlich ins Gewicht.

Anders die Halbleiterspitzendiode: Sie braucht nicht geheizt zu werden, sie erhöht weder Stromkosten noch Materialaufwand für den Transformator, und sie ist so klein, daß sich ohne weiteres mehr als ein Dutzend in einer Streichholzschachtel verpacken ließen.

Auch eine andere „Gefahr“ wird durch die Halbleiterdiode gebannt: Überall in Empfängern der Radiotechnik muß sorgsam darauf geachtet werden, daß die Frequenz des Netzwechselstromes nicht in den Verstärker eindringt; sonst ist ein sehr unangenehmes Brummen des Lautsprechers die unausbleibliche Folge.

Der Hochfrequenzgleichrichter ist besonders „brummempfindlich“. Nimmt er „Brumm“ auf, so wird dieser von allen folgenden Röhren verstärkt; das Ergebnis ist ohrenbetäubend. Da eine Spitzendiode nicht geheizt wird, kommt sie überhaupt nicht unmittelbar mit Netzwechselstrom in Berührung. Man kann sie überdies wegen ihrer geringen Abmessungen so unterbringen, daß auch von außen her kein Brummen eingestrent wird. Gerade für die hochempfindlichen, modernen Empfänger ist das ein unschätzbare Vorteil.

### Diode – auf den Kopf gestellt

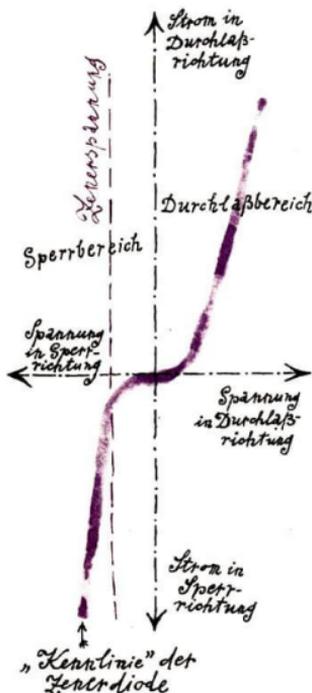
Eine Diode arbeitet in senkrechter Stellung ebensogut wie in waagerechter, „auf dem Kopf stehend“ ebenso wie „richtig herum“. Mit der Überschrift ist also etwas anderes als die geometrische Lage einer Halbleiterdiode gemeint.

Bei einem Halbleitergleichrichter interessiert vor allem, welchen Strom er in der Durchlaßrichtung passieren läßt. Von der umgekehrten, der Sperrichtung, wird lediglich verlangt, daß der unvermeidbare Sperrstrom so gering wie nur möglich bleibt und daß außerdem jedes Gleichrichterelement mit einer hohen Sperrspannung beansprucht werden kann. Beide Bedingungen werden vor allem von Siliziumflächendioden gut erfüllt.

Legt man eine über der maximalen Sperrspannung liegende Spannung an eine Diode, so wird, wie wir bereits wissen, der Gleichrichter zerstört.

Weit harmloser ist ein anderer Effekt, der an Siliziumflächendioden zu beobachten ist. Steigert man die in Sperrichtung angelegte Spannung allmählich, so fällt bei einer ganz bestimmten Spannung, der „Zenerspannung“, der normalerweise in Sperrichtung sehr große Widerstand der Diode stark ab; sie wird „niederohmig“. Gleichzeitig wächst der Sperrstrom an. Senkt man die angelegte Spannung wieder, so gehen Widerstand und Sperrstrom auf ihre ursprünglichen Werte zurück.

Wie ist dieser „Zenereffekt“ – so benannt nach seinem Entdecker,



der ihn vor rund dreißig Jahren bei der Untersuchung anderer Stoffe fand – zu erklären?

Im Halbleitermaterial treten elektrische Kräfte auf, deren Größe von der anliegenden Spannung abhängt. Diese Kräfte „zerren“ an den Bindungen zwischen den Siliziumatomen und beschleunigen die vorhandenen Ladungsträger. Bei einer bestimmten kritischen Spannung – eben der Zenerspannung – reißen sie Elektronen aus den Bindungen oder beschleunigen bereits vorhandene Elektronen so sehr, daß diese weitere Elektronen aus ihren Bindungen schlagen. Beides bewirkt eine rasche Zunahme der Zahl der Ladungsträger im pn-Übergangsbereich und damit ein Anwachsen der Leitfähigkeit.

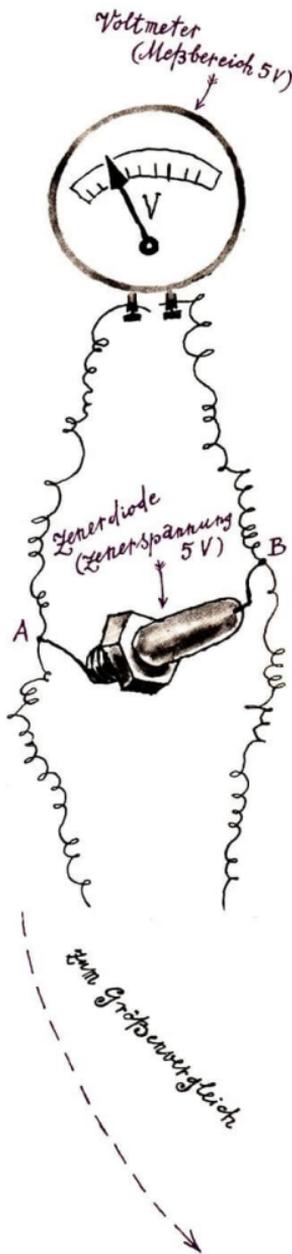
In den letzten Jahren wurden spezielle „Zenerdioden“ entwickelt, bei denen dieser Effekt besonders deutlich ausgeprägt ist. Für sie haben sich inzwischen zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten ergeben. Sehen wir uns eine kleine Auswahl davon an.

In Betrieben, Werkstätten und Laboratorien werden immer wieder elektrische Spannungsmesser benötigt. Damit sie möglichst vielseitig einsetzbar sind, besitzen sie häufig mehrere Meßbereiche. Man kann z. B. mit ihnen Spannungen bis 0,5 V, 5 V, 50 V und 500 V messen. Wird aus Versehen ein falscher Meßbereich eingeschaltet, beispielsweise an den 5-V-Bereich die Netzspannung von 220 V gelegt, ist es meistens um das Meßinstrument geschehen; mindestens aber ist eine Reparatur notwendig. Das Gerät fällt dann für längere Zeit aus.

Mit Zenerdioden kann man derartige Pannen vermeiden. Es ist dazu nur nötig, eine Zenerdiode mit entsprechenden elektrischen Daten parallel zum Meßinstrument zu schalten. Nehmen wir an, der Meßbereich des Voltmeters und die Zenerspannung der Diode betragen 5 V. Bei Spannungen unter 5 V läßt die Zenerdiode so gut wie keinen Strom durch. Der bei A zufließende und bei B abfließende Strom muß das Meßinstrument in voller Stärke passieren. Wird eine Spannung zwischen A und B angelegt, die 5 V überschreitet, so sinkt der Widerstand der Zenerdiode. Der größte Teil des nunmehr für das Instrument gefährlich hohen Stromes wählt den bequemeren Weg über die Zenerdiode; das Meßinstrument bleibt vor der Überlastung bewahrt.

Mit unwesentlichen Änderungen läßt sich diese Anordnung für die verschiedenartigsten Spannungen und Ströme verwenden. Da viele Zenerdioden nicht einmal so groß wie eine Erbse sind, lassen sie sich als „Sicherheitsventile“ leicht im Gehäuse eines Meßinstruments mit unterbringen.

Sehr oft ist in der Elektrotechnik nicht der ganze, auf der Skala eines Instruments verzeichnete Meßbereich wichtig. Bei einem Instrument, mit dem die Spannung des Lichtnetzes kontrolliert werden soll, interessiert vor allem der Bereich um 220 V, vielleicht von 180 V bis 250 V. Die Spannungen von 0 V bis 180 V dagegen, die gleichfalls angezeigt würden, kommen kaum vor. Mit Zenerdioden



kann man einen besonders wichtigen Spannungsbereich auf der Skala auseinanderziehen, die anderen dagegen zusammendrücken. Zenerdioden wirken dann wie eine Lupe, mit der ein wichtiger Spannungsbereich besonders genau betrachtet werden kann. Zahlreiche elektrische Geräte arbeiten nur dann einwandfrei, wenn ihre Betriebsspannung möglichst wenig schwankt. Leider sind Spannungsschwankungen im Stromversorgungsnetz nicht völlig zu vermeiden. Sie machen sich bereits beim Fernseh- und Rundfunkempfang unangenehm bemerkbar und können die Arbeitsweise elektrischer Präzisionsgeräte so stören, daß diese nicht mehr funktionieren. Es wurden daher zahlreiche Anordnungen zur Spannungsstabilisierung erdacht. Ihr technischer Aufwand ist um so höher, je schärfer die Anforderungen an die Stabilität der Spannung sind.

Mit Zenerdioden kann man sehr einfache und Platz sparende Stabilisierungseinrichtungen aufbauen. Obwohl sie oft nur einen Bruchteil des Rauminhalts herkömmlicher Stabilisierungseinrichtungen erfordern, lassen sich Spannungen ohne weiteres bis auf eine Genauigkeit von  $0,1\%$  konstant halten.



## AUS LICHT WIRD STROM



### Löcher, Licht und Elektronen

#### Widerstand zwischen hell und dunkel

Eine Rolltreppe setzt sich in Bewegung, sobald ein Lichtstrahl an ihrem Fußende unterbrochen wird. Die verschiedenartigsten „lichtelektrischen“ Geräte haben sich in Industriebetrieben, im Verkehrswesen und im täglichen Leben bewährt. Weniger bekannt ist, daß in vielen dieser Geräte Halbleiterbauelemente die entscheidende Rolle spielen. Oft sind es sogar unmittelbare Nachkommen der Selenwiderstände, deren Lichtempfindlichkeit einst den Telegrafeningenieuren Smith und May Sorgen bereitet hatte.

Bauelemente, die den elektrischen Strom, unabhängig von seiner Richtung, um so ungehinderter hindurchfließen lassen, je hellerem Licht sie ausgesetzt sind, heißen Fotowiderstände. Sie bestehen aus Halbleitermaterial.

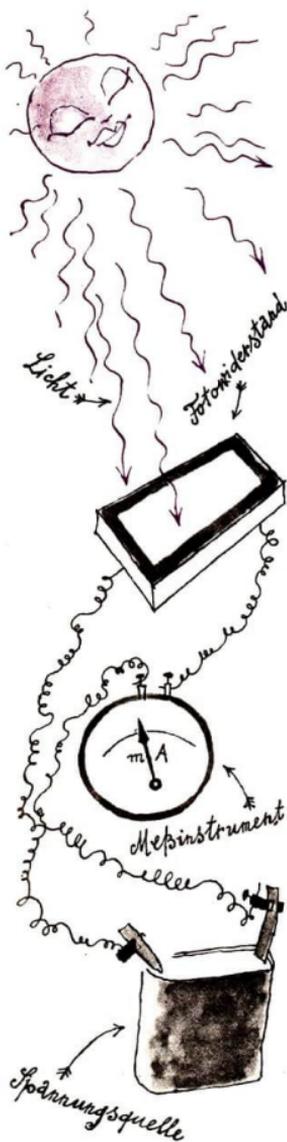
Damit der Widerstand eines Halbleiters sinkt oder, was dasselbe ist, damit seine Leitfähigkeit zunimmt, muß die Zahl der Ladungsträger in seinem Inneren vermehrt werden. Beim Thermistor wurden zusätzliche Ladungsträger durch Zufuhr von Wärmeenergie frei; bei der Zenerdiode waren es elektrische Kräfte, die Elektronen aus ihren Bindungen rissen und zu Leitungselektronen werden ließen. Bei Fotowiderständen und bei allen übrigen lichtelektrischen Bauelementen dient die Strahlungsenergie des Lichts dazu, Bindungen zwischen den Kristallatomen aufzutrennen und neue Ladungsträger zu schaffen.

Dabei entstehen, wie auch in anderen Halbleitern, Leitungselektronen und Löcher; doch sind am „inneren“ lichtelektrischen Effekt vor allem die beweglicheren Elektronen beteiligt.<sup>1</sup>

Je intensiver das einfallende Licht ist, desto größer wird die Leitfähigkeit eines Fotowiderstandes. Der Leitfähigkeitsunterschied zwischen Dunkelheit und heller Beleuchtung kann das Verhältnis 1 : 1000 weit überschreiten.

Für die Herstellung von Fotowiderständen stehen zahlreiche Aus-

<sup>1</sup> Es gibt auch einen „äußeren“ lichtelektrischen Effekt, bei dem die Elektronen aus manchen Stoffen unter Lichteinwirkung „herausgeschlagen“ werden. Dieser Effekt ist die Grundlage der „Fotозelle“. Sie wird für ähnliche Aufgaben eingesetzt wie der Fotowiderstand, hat aber mit unserem Thema nichts zu tun.



gangsstoffe zur Verfügung. Sie unterscheiden sich nicht nur in ihrer Lichtempfindlichkeit, sondern auch darin, daß sie auf bestimmte Teile des optischen Spektrums besonders gut reagieren. So sind Kadmiumsulfid-Fotowiderstände gut für jenen Teil des Spektrums geeignet, den das menschliche Auge als Licht empfindet. Fotowiderstände aus bestimmten Bleiverbindungen sind besonders empfänglich für ultrarote Strahlung, also für Strahlung, die sich der Wellenlänge nach an das „rote Ende“ des sichtbaren Spektrums anschließt und vom Auge nicht wahrgenommen wird. Andere Fotowiderstände sprechen besonders gut auf grünes, blaues oder violettes Licht an. Fotowiderstände existieren in den verschiedensten Größen, Formen und Ausführungen. Man fertigt sie entweder aus dünnen Plättchen des Halbleitermaterials an oder dampft eine dünne Halbleiterschicht auf eine isolierende Grundplatte auf. Nachdem der Fotowiderstand mit Anschlußelektroden versehen worden ist, schließt man ihn in ein Schutzgehäuse aus Glas oder aus Plastikmaterial ein.

Die Grundschialtung eines fotoelektrischen Steuerkreises ist an Einfachheit kaum zu überbieten. Trotzdem stammen von ihr sämtliche Steuer- und Regeleinrichtungen ab, die mit Fotowiderständen bestückt sind.

Die Taschenlampenbatterie (Spannungsquelle), der Fotowiderstand und ein empfindliches Strommeßinstrument sind zu einem Stromkreis zusammengeschaltet. Solange kein Licht auf den Fotowiderstand fällt, ist seine elektrische Leitfähigkeit verschwindend gering. Infolgedessen kann die Spannungsquelle keinen merklichen Strom durch das Meßinstrument treiben; der Zeiger bleibt am Skalenanfang stehen. Sobald der Fotowiderstand vom Licht getroffen wird, nimmt sein elektrisches Leitvermögen zu. Nunmehr reicht die Batteriespannung aus, einen leicht meßbaren Strom durch Fotowiderstand und Instrument zu drücken. Der Instrumentenzeiger schlägt aus; die Größe des Ausschlages ist ein Maß für die Leitfähigkeit des Fotowiderstandes und damit für die Intensität des einfallenden Lichts.

### Nur ein Belichtungsmesser . . .

„Ihre Bilder werden besser – mit Astra, dem Belichtungsmesser.“ Diese Zeilen, vor dem zweiten Weltkrieg den Fotofreunden von farbenfreudigen Plakaten entgegenleuchtend, übertrieben nicht. Die Einführung des elektrischen – besser des fotoelektrischen – Belichtungsmessers war für die Fototechnik ein Meilenstein des Fortschritts. Belichtungszeiten und Blendenzahlen, die bisher Tabellen entnommen werden mußten oder mit optischen Belichtungsmessern nur grob bestimmt werden konnten, ließen sich jetzt schnell und exakt ablesen. Man brauchte nicht mehr „über den Daumen zu peilen“, über- oder unterbelichtete Aufnahmen wurden selten.

Wie sieht das „Innenleben“ eines fotoelektrischen Belichtungsmessers aus? Würden wir ihn auseinandernehmen – ein Vergnügen, das wir uns allerdings versagen sollten –, so entdeckten wir ein elektrisches Meßwerk, dessen Zeiger vor der Skala des Belichtungsmessers spielt. Außerdem fänden wir ein unscheinbares, graues Plättchen, dessen Oberfläche durch eine transparente Deckscheibe geschützt wird. Drähte verbinden es mit dem Meßinstrument. Offenbar ist dieses Plättchen das entscheidende Bauelement des Belichtungsmessers, denn es ist vor der Lichteintrittsöffnung angebracht. Haben wir es mit einem Fotowiderstand zu tun? Dann müßte noch eine Batterie vorhanden sein, die den Strom durch den Fotowiderstand treibt. Diese Spannungsquelle suchen wir vergebens. Der Belichtungsmesser braucht sie nicht; denn er erzeugt seine Spannung selbst.

Das graue Plättchen ist kein Fotowiderstand, sondern ein Fotoelement. In ihm ruft die Energie einfallenden Lichts keine Widerstandsänderung, sondern eine elektrische Spannung hervor.

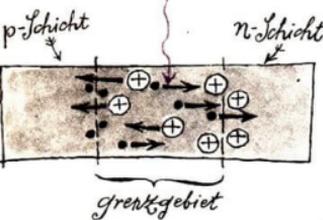
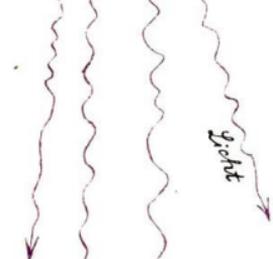
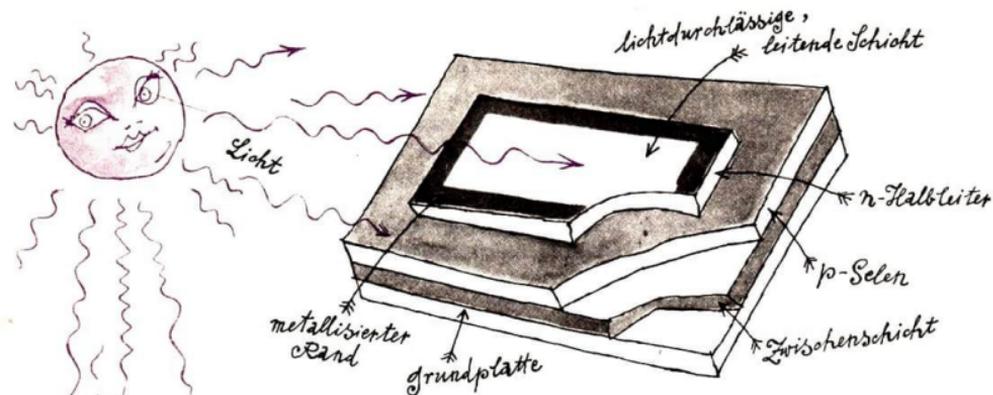
Ein lichtelektrisches Bauelement, das auf eine Spannungsquelle verzichtet, kann man nicht nur für Belichtungsmesser gut gebrauchen. Es ist nämlich manchmal recht hinderlich, daß Fotowiderstände eine Spannungsquelle benötigen. Werden fotoelektrische Meß- und Kontrollgeräte von einer Batterie versorgt, muß man überdies in Kauf nehmen, daß ihre Meßwerte durch das allmähliche Nachlassen der Batteriespannung verfälscht werden.

Beim Fotoelement entfallen diese Mängel. Allerdings liefern die herkömmlichen Ausführungen nur eine sehr geringe elektrische Leistung. Man muß daher dem Fotoelement häufig einen Verstärker nachschalten, wenn es in der Steuer- und Regeltechnik Verwendung finden soll. Das ist einer der Hauptgründe dafür, daß das Fotoelement dem Fotowiderstand keine Konkurrenz macht, sondern sich vor allem die Anwendungsgebiete eroberte, auf denen Fotowiderstände weniger gut geeignet wären.

Wir haben im Bild ein Fotoelement aufgeschnitten, um seinen Aufbau zu zeigen (die Dicke der einzelnen Schichten wurde stark übertrieben gezeichnet). Eine Grundplatte aus Eisen oder Aluminium trägt eine Schicht p-leitenden Selen. Damit keine an dieser Stelle unerwünschte Sperrschicht entsteht, sind Grundplatte und Selen durch eine Zwischenschicht getrennt. Woraus diese besteht, richtet sich nach dem Material der Grundplatte (bei Eisen wählt man meistens Nickel, bei Aluminium Wismut als Zwischenschicht).

Die dem Licht zugewandte Fläche des Selen trägt eine „Haut“ aus n-leitendem Halbleiterstoff, z. B. aus Kadmiumselenid. Diese Haut ist so dünn, daß Licht nahezu ungehindert zum darunterliegenden p-Selen gelangen kann. Das Kadmiumselenid wird durch eine elektrisch leitende, gleichfalls lichtdurchlässige Schicht abgedeckt. Sie ist an den Rändern verstärkt und mit Metall überzogen und dient, ebenso wie die Metallgrundplatte, zur Stromabnahme. Die Oberfläche wird mit Schutzlack überzogen oder das ganze Fotoelement





• = Elektron  
 ⊕ = Loch

in eine luft- und feuchtigkeitsdichte Kapsel eingeschlossen. Was im Fotoelement vorgeht, erklären wir an einer vereinfachten, schematischen Darstellung:

Wo das p-leitende Selen und das n-leitende Kadmiumselenid zusammenstoßen, entstehen wieder wie bei der Flächendiode elektrische Raumladungen: Im Selen sammeln sich an der Grenze Elektronen, im Kadmiumselenid Löcher. Dringen Lichtstrahlen in das Grenzgebiet ein, dann trennt ihre Energie Elektronen von den Atomen ab und erzeugt so zahlreiche Ladungsträgerpaare. Dabei bleibt den Elektronen nur der Weg in das n-leitende Kadmiumselenid offen; die andere Seite wird ihnen durch die dort vorhandene Raumladung versperrt. Die Löcher dagegen können nur zum p-Selen wandern; denn beim Eintritt ins Kadmiumselenid müßten sie erst den „Zaun“ der positiven Raumladung überklettern. Die durch das Licht freigesetzten Ladungsträger werden also sortiert: Die Elektronen sammeln sich im Kadmiumselenid, die Löcher im p-Selen. Es entsteht eine elektrische Spannung, die sich über das Grenzgebiet hinweg nicht ausgleichen kann, die aber einen Strom zum Fließen bringt, sobald wir die beiden Anschlüsse des Fotoelements durch einen Draht verbinden. Die Größe der Spannung hängt von der Beleuchtungsstärke ab. Bei hellem Licht erreicht sie etwa 0,5 V.

Das Selenelement verdient die Bezeichnung „elektrisches Auge“ mehr als die anderen fotoelektrischen Bauelemente: Ebenso wie das menschliche Auge ist es besonders für gelbgrünes Licht empfindlich, und auch die „spektralen Empfindlichkeitskurven“ des Auges und des Selenelementes ähneln sich in ihrem Verlauf. Diese Eigenschaften machen das Selenfotoelement besonders für die Verwendung bei Tageslicht geeignet.

Fotoelemente müssen nicht Selen und Selenverbindungen zur Grundlage haben. Man stellte sie auch aus Kupfer und Kupfer-

oxydul her. In jüngster Zeit ist dem Selenfotoelement ein sehr enger Konkurrent im Siliziumfotoelement erwachsen. Wir werden an anderer Stelle noch mehr darüber hören.

### Diode - Widerstand und Element

Bei Fotoelementen freute man sich über jeden Lichtstrahl, der zum pn-Grenzgebiet gelangte. Von Halbleiterdioden dagegen mußte man jeden Lichtstrahl sorgfältig fernhalten, wenn nicht unerfreuliche Nebenerscheinungen wie das Anwachsen des Sperrstroms auftreten sollten.

Doch mußten diese Nebenerscheinungen immer unerfreulich sein? Konnte man sie nicht nutzen, um ein weiteres fotoelektrisches Bauelement, um eine „Fotodiode“ zu konstruieren?

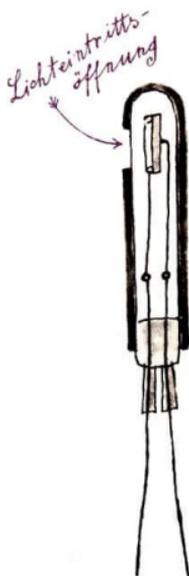
Derartige Fotodioden gibt es seit mehreren Jahren. Sie unterscheiden sich im prinzipiellen Aufbau nicht von Halbleitergleichrichtern; nur interessiert bei Fotodioden der Gleichrichtereffekt wenig, sondern ausschließlich das, was bei Lichteinfall in der Grenzschicht geschieht.

Wir schalten eine Fotodiode in Sperrichtung mit einer elektrischen Spannungsquelle zusammen. Sobald Licht in das Grenzgebiet der Diode vordringt, werden zusätzliche Ladungsträger erzeugt. Die „Verarmung“ des Grenzgebietes an Ladungsträgern – wir lernten sie beim Gleichrichter kennen – wird teilweise aufgehoben, die elektrische Leitfähigkeit der Diode nimmt zu.

Eine in Sperrichtung an eine Spannungsquelle angeschlossene Fotodiode verhält sich demnach wie ein Fotowiderstand. Nur eine Einschränkung gibt es: Beim „richtigen“ Fotowiderstand ist es gleichgültig, wie er angeschlossen wird. Die Fotodiode dagegen muß, wenn sie als Fotowiderstand arbeiten soll, stets in Sperrichtung betrieben werden.

Das ist zwar eine kleine Einschränkung, doch dafür kann die Fotodiode, was kein Fotowiderstand fertigbringt: Wird sie ohne äußere Spannungsquelle betrieben, arbeitet sie als Fotoelement. Die Spannung entsteht dabei auf die gleiche Weise wie beim Selenfotoelement.

Über den Aufbau der Fotodioden brauchen wir nicht viele Worte zu verlieren; denn es begegnen uns die gleichen Diodenarten, die auch als Gleichrichter benutzt werden. Bei den Spitzenfotodioden sitzt dem Kristall eine Drahtspitze aus Wolfram oder Gold auf, in deren unmittelbarer Nähe sich der lichtempfindliche pn-Übergang bildet. Von den Flächendioden haben vor allem diejenigen weite Verbreitung gefunden, bei denen der pn-Übergang an die Halbleiterkristall-Oberfläche verlegt wurde. Man erreicht das, wie bei Gleichrichtern, durch Einlagieren einer Indiumpille in n-Germanium. Das Licht fällt durch ein Fensterchen auf die Sperrschicht der Fotodioden. Meistens ist in dieses Fensterchen eine kleine Sammellinse eingesetzt, die das Licht auf die Sperrschicht konzentriert.





Bis heute liefert vor allem Germanium den Ausgangsstoff für Fotodioden. Es werden aber bereits Silizium-Fotodioden produziert, während sich Fotodioden auf der Grundlage anderer Halbleitermaterialien im Versuchsstadium befinden.

An Fotodioden fallen besonders ihre geringen Abmessungen und ihr niedriges Gewicht auf: ein „Bleistiftstummel“ von 1,5 cm Länge, länger und dicker ist eine Fotodiode fast nie. Sofern es notwendig ist, kann man ihre Maße noch erheblich herabsetzen. Wollten wir „1 Kilo“ Fotodioden kaufen, so erhielten wir über tausend Stück.

Fotodioden sind weit lichtempfindlicher als die anderen fotoelektrischen Bauelemente. Sie werden nur vom sogenannten Fototransistor übertroffen, den wir erst später kennenlernen werden. Ihre größte Empfindlichkeit läßt sich in das Gebiet des sichtbaren Lichts, aber auch ins Ultraviolette oder Ultrarote verlegen. Fotodioden sind daher dort am Platze, wo sehr schwache Lichtstrahlung nachzuweisen oder zu messen ist.

Ein weiterer Vorteil der Fotodioden ist ihre geringe „Trägheit“. Sollen nämlich sehr schnelle Lichtschwankungen, wie sie z. B. beim Abtasten eines Fernsehbildes auftreten, registriert werden, versagen Fotowiderstand und Fotoelement. Die Fotodiode hingegen kann derart schnellen Schwankungen noch folgen. Für verschiedene Aufgaben der Meßtechnik und der wissenschaftlichen Forschung ist gerade diese Eigenschaft sehr wertvoll.

## Der Lichtstrahl steuert

### Flammen unter Kontrolle

Schon zum drittenmal hielt Frau Schmidt den Finger unter den Strahl. Nichts zu machen – das Wasser blieb kalt. Sie ging hinüber ins Badezimmer. Obwohl der Warmwasserhahn weit aufgedreht war, brannten die Flammen des Gasboilers nicht. Aus irgendeinem Grunde, vielleicht durch eine plötzliche Druckschwankung im Gasnetz, war die Zündflamme verlöscht und konnte das zischend ausströmende Gas nicht in Brand setzen.

Frau Schmidt stellte das Wasser und damit die Gaszufuhr ab, rieb ein Streichholz an und näherte es dem Rohr der Zündflamme. Es knallte! Eine dicke Schmutzwolke stob aus dem Boiler; Frau Schmidt konnte von Glück reden, daß nicht mehr passiert war.

Wie konnte es überhaupt zu einer Explosion kommen? Als der Warmwasserhahn noch aufgedreht war, hatte sich ausströmendes Gas im Boiler gesammelt und mit Luft ein explosives Gemisch gebildet. Hätte Frau Schmidt kurze Zeit gewartet, so wäre das Gas abgezogen gewesen; es hätte nicht „geknallt“.

Was hier harmlos verlief, könnte an anderer Stelle sehr ernste Folgen haben, z. B. bei Öl-, Gas- oder Kohlenstaubfeuerungen in Betrieben. Deshalb achten bei ihnen „Flammenwächter“ darauf,



daß die Flammen vor den Brennstoffdüsen ordnungsgemäß brennen. Bei jeder Unregelmäßigkeit werden Warnsignale ausgelöst.

Als Flammenwächter kann die in der Skizze auf Seite 54 gezeigte Schaltung Verwendung finden. Der Fotowiderstand wird so angebracht, daß ihn das Licht der Brennerflamme trifft. Verlischt die Flamme, so geht der Zeiger des Meßinstruments zurück. Allerdings ist es besser, das Meßinstrument durch ein Relais zu ersetzen, das eine Warnlampe, eine Klingel oder einen Summer einschaltet.

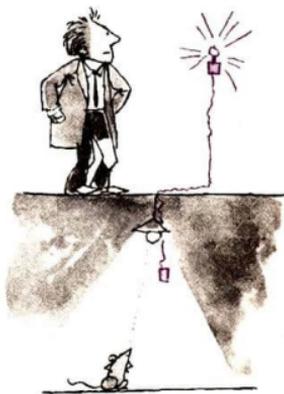
In größeren Feuerungsanlagen, z. B. in Wärmekraftwerken, faßt man die Signallampen sämtlicher Flammenwächter auf einem Lampenfeld im Kesselleitstand zusammen; ein Blick genügt, um das ordnungsgemäße Arbeiten aller Brennerdüsen zu kontrollieren.

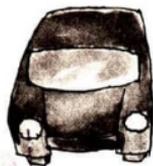
Man hat sich nicht damit zufriedengegeben, einen Flammenausfall zu signalisieren. In Ölheizungsanlagen z. B. löst der Flammenwächter eine ganze Kette von Schalt- und Steuervorgängen aus: Sobald der Brenner, etwa durch eine Unregelmäßigkeit in der Brennstoffzufuhr, verlöscht, schaltet der Flammenwächter die Brennstoffförderung ab. Es verstreicht eine kurze Zeitspanne, damit unverbranntes Brennstoff-Luft-Gemisch abziehen kann. Nach dieser Sicherheitspause wird selbsttätig das elektrische Zündgerät eingeschaltet und, sobald vor der Brennerdüse Zündfunken überspringen, die Brennstoffpumpe wieder angestellt. Bildet sich eine Flamme, so läuft die Anlage normal weiter. Schlägt der Zündversuch fehl, so setzt der Flammenwächter die Anlage endgültig außer Betrieb. Gleichzeitig wird ein Alarmsignal gegeben und die Zündanlage blockiert, damit niemand die Heizung „von Hand“ zünden kann, ehe die Ursache des Versagens festgestellt und beseitigt wurde.

Auf ähnliche Weise kann man kontrollieren, ob die Glühlampen einer Beleuchtungsanlage brennen oder nicht. In Ihrer Wohnung könnten Sie z. B. mit einem Fotowiderstand, einer Batterie und einem Meßinstrument jederzeit feststellen, ob Sie versehentlich im Keller das Licht brennen ließen. Möchten Sie die Batterie sparen, können Sie ein Fotoelement oder eine Fotodiode benutzen, müssen sich dann allerdings für ein recht empfindliches Meßgerät entscheiden. Wichtiger sind allerdings solche Kontrollen an anderer Stelle, z. B. in Tresorräumen, an Verladestraßen oder auf Baustellen.

Nützlich scheint auch zu sein, was ein großes Kraftfahrzeugwerk ausprobierte. Damit die Fahrer von Lastzügen jederzeit feststellen können, ob die Rücklichter brennen, baute man in die Rücklichtleuchten Fotowiderstände ein. Sie bringen, sobald ein Rücklichter verlöscht oder durch einen „Wackelkontakt“ flackert, Signallämpchen am Armaturenbrett zum Aufleuchten.

Wann ist es Zeit, die Straßenbeleuchtung oder die Lampen in einer Werkhalle einzuschalten? Wie viele Menschen wir auch





fragten – die Antworten fielen niemals gleich aus. Jeder hat ein anderes Helligkeitsempfinden. Besser ist es schon, solche Aufgaben dem unbestechlichen Fotowiderstand (oder einem anderen lichtelektrischen Bauelement) zu übertragen. Er schaltet das Licht ein, wenn die Helligkeit einen bestimmten Wert unterschreitet, und er schaltet es ebenso zuverlässig wieder aus, wenn die Dunkelheit weicht. Dabei berücksichtigt er sogar, ob der Himmel wolkenlos oder bedeckt ist.

Geräte, in denen ein lichtelektrisches Bauelement das Aus- und Einschalten von Lichtquellen übernimmt, heißen Dämmerungsschalter. Sie können nicht nur die Straßenbeleuchtung steuern, sondern ebensogut die Lampen in Werkhöfen, Schaufensterbeleuchtungen, Signalanlagen auf Bahnhöfen, Leuchtbojen und Leuchttürmen oder die Warnleuchten in der Nähe von Flugplätzen.

In Kraftwagen finden wir Dämmerungsschalter, die selbsttätig das Parklicht ein- und ausschalten. Manchem vergeßlichen Kraftfahrer wurde dadurch schon ein „Denkzettel“ erspart.

Vielleicht löst eine Abart des Dämmerungsschalters bald auch ein anderes Problem des Straßenverkehrs. Eine englische Firma entwickelte ein Gerät, das selbsttätig die Scheinwerfer abblendet, sobald sich ein entgegenkommendes Fahrzeug nähert. Die Anlage ist leicht und klein und wird hinter dem Armaturenbrett angebracht. Mit Gummisaugnäpfen werden zwei lichtempfindliche „Beobachtungsköpfe“ an der Windschutzscheibe befestigt. Sie sind so eingerichtet und mit der Schaltung verbunden, daß der eine Kopf das entgegenkommende Fahrzeug wahrnimmt und das Abblenden veranlaßt, während der andere beim Vorbeifahren des Wagens anspricht und die Scheinwerfer wieder aufblendet.

Selbstverständlich kann ein Flammenwächter auch „andersherum“ arbeiten und Signale auslösen, wenn Licht aufleuchtet. Er wird damit zum „Brandwächter“, der ein ausbrechendes Feuer meldet. Oft kombiniert man das Gerät mit einem temperaturempfindlichen Thermistor, da nicht immer sofort eine so helle Flamme leuchtet, daß ein Fotoelement oder ein Fotowiderstand anspricht. Solche Brandwächter können außer der Alarmanlage auch Löscheinrichtungen sofort in Betrieb setzen.

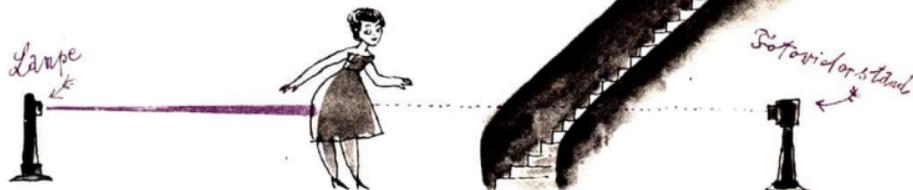
### Der stumme Wächter

Sicherlich ist uns inzwischen klargeworden, wie die Steuerung einer Rolltreppe funktioniert: Auf der einen Seite ist in der Verkleidung des Treppengeländers ein Fotowiderstand, ein Fotoelement oder eine Fotodiode verborgen; gegenüber, auf der anderen Seite der Treppe, sitzt ein Lämpchen, das einen Lichtstrahl auf den Fotowiderstand wirft. Ein Relais hält seinen Anker fest, solange der Fotowiderstand vom Lichtstrahl getroffen wird und den elektrischen Strom gut leitet. Unterbricht ein Passant den Lichtstrahl, federt der Anker zurück und schaltet den Antriebs-



motor der Treppe ein. Dieser läuft solange, wie man braucht, um die Treppe hochzufahren. Wird inzwischen der Lichtstrahl erneut unterbrochen, weil ein zweiter Passant die Treppe betritt, läuft der Motor weiter, bis auch dieser Treppenbenutzer oben angekommen ist.

Die Rolltreppensteuerung unterscheidet sich in einem wichtigen Punkt vom Flammenwächter: Diesmal reagiert der Fotowiderstand nur auf einen eng begrenzten Lichtstrahl, nicht auf eine allgemeine Helligkeitsänderung. Der Lichtstrahl ist eine Art Schranke, deren



eines Ende durch die Lichtquelle und deren anderes Ende durch den Fotowiderstand gebildet wird. Für derartige „Lichtschranken“, in die auch andere lichtelektrische Bauelemente eingesetzt werden können, fand man Hunderte von Anwendungen.

Noch immer gibt es Restaurants oder Speiseräume, in denen das Bedienungspersonal mit den vollen Tablettts eine Tür – und sei es nur eine Schwingtür – passieren muß. Dazu gehört oft beinahe akrobatische Geschicklichkeit. Unangenehm ist auch, wenn in Betrieben Werkstücke durch Türen von einem Raum in einen anderen zu transportieren sind: Der Transportkarren muß anhalten, die Tür geöffnet, festgemacht und dann wieder geschlossen werden. Das bedeutet auf die Dauer nicht nur erhebliche Zeitverluste, sondern durch das verhältnismäßig lange Offenstehen der Türen gelangt auch jedesmal ein Schwall warmer oder kalter Luft in die Räume.

Setzt man fotoelektrische Türöffner ein, fallen diese Nachteile weg: Der Kellner braucht seinen Schritt nicht zu hemmen, der beladene Elektrokarren nähert sich der Tür in voller Fahrt. Wie von Geisterhänden bewegt, schwingen die Türflügel zur Seite und schließen sich wieder selbsttätig, sobald der Durchgang frei ist.

Auch diesmal sind Lichtschranken Steuerelemente. Die Einrichtung ist etwas komplizierter als die Lichtschranke einer Rolltreppe. Meistens soll sich die Tür bei Annäherung von beiden Seiten öffnen. Es ist daher vor oder hinter der Tür je eine Lichtschranke anzubringen. Sperrmechanismen müssen die Tür offenhalten, wenn sich in dichtem Abstand mehrere Fahrzeuge oder Personen nähern. Die Schließvorrichtung muß blockiert werden, wenn sich eine Person oder ein Gegenstand längere Zeit zwischen den beiden Lichtschranken befindet, und endlich muß die Tür jederzeit von Hand zu öffnen und zu schließen sein. Diese Forderungen können

jedoch verhältnismäßig leicht erfüllt werden; die Zahl der fotoelektrischen Türöffner nimmt daher rasch zu.

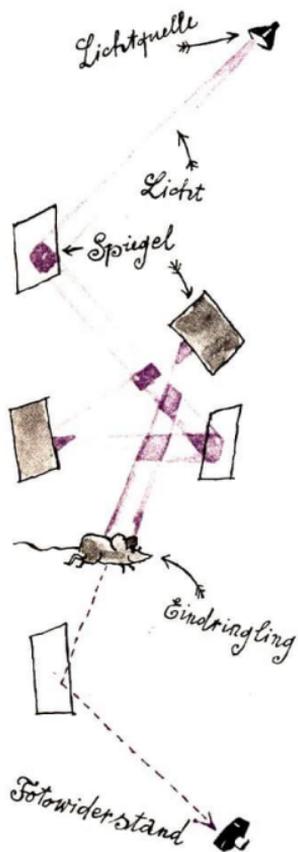
Noch größere Bedeutung erlangte die Lichtschranke als Schutzvorrichtung an Maschinen. Viele Werkstoffe, die geschnitten, gesägt, gebohrt, gepreßt, gefräst oder gehobelt werden sollen, müssen noch immer von Hand in die Maschinen eingeführt werden. Dadurch entsteht eine Gefahrenquelle, die auch durch mechanische Schutzvorrichtungen nicht völlig beseitigt werden kann. Durch Lichtschranken lassen sich die Gefahren auf ein Mindestmaß herabsetzen. Solange sich die Hände des Einlegers in der Nähe des Werkzeugs befinden, unterbrechen sie einen oder mehrere Lichtstrahlen. Die zugehörigen Fotowiderstände bleiben unbeleuchtet und blockieren über einen Steuermechanismus den Antrieb des Werkzeugs. Er wird erst freigegeben, wenn die Lichtstrahlen wieder voll auf die Fotowiderstände fallen, wenn sich die Hände also nicht mehr im Gefahrenbereich befinden. Derartige Schutzvorrichtungen stehen heute als standardisierte Bausteine zur Verfügung. Sie sind so konstruiert, daß sie sich auch nachträglich leicht an Maschinen anbringen lassen.

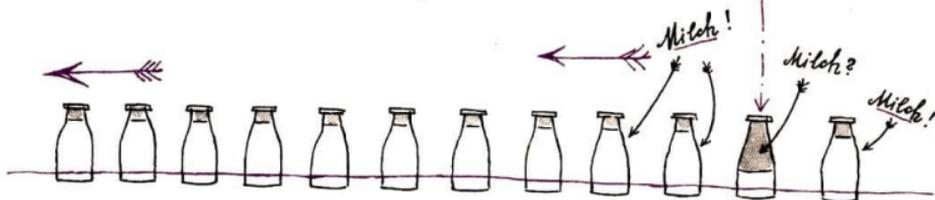
Man setzt Lichtschranken auch in Tür- oder Fensterfüllungen ein, um Räume vor unerwünschten Eindringlingen zu schützen. Damit sich niemand unter oder über ihnen durchzwängen kann, führt man den Lichtstrahl mit Umlenkspiegeln mehrfach hin und her oder montiert mehrere Lichtschranken in bestimmten senkrechten Abständen.

Bei sehr genauen Geschwindigkeitsmessungen verläßt man sich heute lieber auf eine Lichtschranke als auf das Auge eines Beobachters. Am Anfang und am Ende der Meßstrecke wird je eine Lichtschranke quer über die Straße „gelegt“. In dem Augenblick, in dem das in voller Geschwindigkeit herankommende Fahrzeug die erste Lichtschranke durchbricht, läuft eine elektrische Stoppuhr an. Sie wird ausgeschaltet, sobald am Ende der Meßstrecke die zweite Lichtschranke anspricht. Aus der gemessenen Zeit und der bekannten Strecke kann die Geschwindigkeit sofort ermittelt werden. Auch bei Sportwettkämpfen werden nicht selten Lichtschranken zur genauen Zeitermittlung benutzt.

### Fotoelemente sorgen für Qualität

Milchflasche um Milchflasche verläßt die Abfüllmaschine, gleitet zwischen Metallschienen und wird weitertransportiert, bis flinke Hände am Ende der Apparatur die vollen Flaschen in Kästen stellen. Bleiben wir einen Augenblick neben der Abfüllmaschine stehen: acht ... neun ... zehn ... Da, die elfte Flasche wird unversehens von einem Greifer erfaßt, aus den Schienen gehoben und zur Seite geschwenkt. Zwischen den Transportschienen ziehen weitere Flaschen an uns vorbei: ... achtzehn ... neunzehn ... zwanzig. Die Bewegung verhält für wenige Sekunden, gerade als





ein Milchkasten voll ist und ein leerer Kasten an das Ende der Transportschienen geschoben wird.

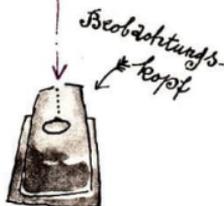
Das selbsttätige Arbeiten der Maschine, das noch vor drei Generationen größte Bewunderung erregt hätte, beeindruckt uns, die wir im Zeitalter der automatischen Taktstraßen und der Raumschiffe leben, sicher nicht allzusehr. Trotzdem! Woher „wusste“ die Abfüllmaschine, daß die elfte Flasche nicht richtig gefüllt war? Warum verzählte sie sich nicht, obwohl der normale Arbeitsrhythmus durch das Entfernen einer Flasche gestört worden war?

Des Rätsels Lösung heißt „Lichtschranke“. Sie ist sogar zweimal vertreten: Eine Lichtquelle und der zugehörige Fotowiderstand sind unmittelbar hinter der Austrittsöffnung der Abfüllmaschine angebracht und so justiert, daß der Lichtstrahl nur unterbrochen wird, wenn eine Flasche bis zur vorgeschriebenen Höhe gefüllt ist. Passiert dagegen eine Flasche mit niedrigerem Flüssigkeitsspiegel die Lichtschranke, so fällt Licht auf den Fotowiderstand; der Greifmechanismus wird eingeschaltet und stellt die Flasche beiseite. Eine Sperrvorrichtung läßt die Lichtschranke immer nur dann wirksam werden, wenn eine Flasche vorbeigeleitet. Der Greifmechanismus würde sonst auch durch die Lücken zwischen den Flaschen in Tätigkeit gesetzt. Die zweite Lichtschranke befindet sich kurz vor dem Ende der Transportschienen. Sie liefert einen elektrischen „Zählimpuls“, wenn ihr Lichtstrahl durch eine Flasche unterbrochen wird. Ein elektronischer Zähler setzt jeweils nach dem zwanzigsten Impuls die Transportvorrichtung für einige Sekunden still. Außerdem steuern die Impulse ein Zählwerk, an dem jederzeit abzulesen ist, wieviel gefüllte Flaschen insgesamt die Maschine verließen und von der Kontroll-Lichtschranke für einwandfrei befunden wurden.

Die Flaschenabfüllmaschine ist nur eine von vielen Stellen, an denen eine Lichtschranke als Gütekontrolleur oder als Zähler auftritt. In der Industrie sind die verschiedenartigsten Produkte zu zählen, seien es Konservenbüchsen, Nägel, Maschinen- oder Plastikteile, seien es Tabletten, Ampullen, Druckerzeugnisse, Ziegelsteine oder Zigaretten. Fast immer kann dabei die Lichtschranke einspringen. Sie zählt zuverlässiger und, wenn nötig, hundertfach schneller, als Menschen es fertigbrächten; sie zählt, mit entsprechenden Geräten verbunden, jede nur gewünschte Menge ab und steuert sogar Verpackungsmaschinen.

Das Prinzip der Füllhöhenmessung, das wir eben kennenlernten,

Lichtschranke



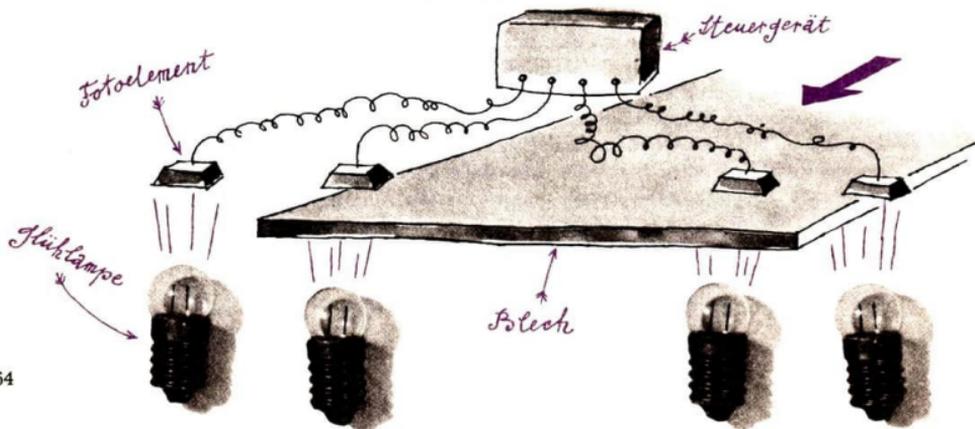
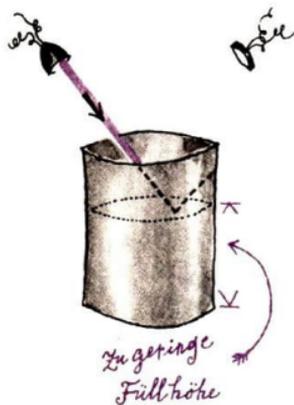


läßt sich ohne weiteres ausbauen. Brächte man beispielsweise an der Abfüllmaschine zwei Lichtschranken in entsprechendem Abstand übereinander an, so könnte man auch sämtliche „vollen“ Flaschen ausscheiden. Ähnliche Einrichtungen prüfen den Füllstand von Konservengläsern, Ampullen, Flaschen mit bestimmten Chemikalienmengen usw. Sogar in undurchsichtigen Gefäßen läßt sich der Füllstand kontrollieren, sofern man, wie in der Skizze gezeigt, mit dem von der Flüssigkeitsoberfläche reflektierten Licht arbeiten kann.

Beim Walzen von Blechen muß ständig die Blechbreite überwacht werden. Früher konnten Abweichungen erst nachträglich festgestellt werden. Korrekturen waren infolgedessen nur mit erheblicher Verzögerung möglich. Lichtschranken können die Blechbreite ständig und noch während des Fertigungsablaufs überwachen. Abweichungen werden sofort erkannt.

Solange sich die Blechbreite innerhalb der festgelegten Toleranz hält, sind von den vier Fotoelementen der Skizze die beiden äußeren beleuchtet, die beiden inneren unbeleuchtet. Wird das Blech breiter, so empfängt das zugehörige äußere Fotoelement weniger Licht; wird das Blech zu schmal, fällt Licht auf einen oder auf beide inneren Fotoelemente. In diesen Fällen lösen die Fotoelemente entsprechende Signale aus oder veranlassen selbst über Steuergeräte die notwendigen Korrekturen. Die Breite anderer bandförmiger Erzeugnisse, beispielsweise die Breite von Papierbahnen, kann man auf gleiche Weise überwachen und konstant halten.

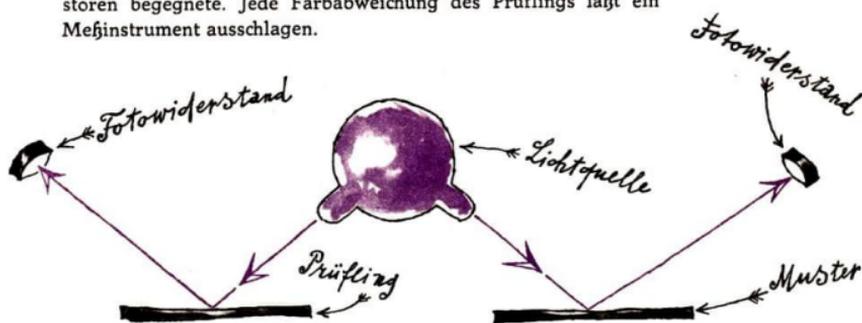
Werden Papierbahnen fortlaufend bedruckt und anschließend geschnitten, muß der Druck immer in der gleichen Stellung zum Schnitt stehen. Wäre das nicht der Fall, so würde z. B. die Aufschrift von Einkaufstüten und -beuteln einmal zu weit oben, ein andermal zu weit unten erscheinen. Wird das Schnittmesser durch eine Lichtschranke gesteuert, läßt sich eine große Schneidgenauigkeit erzielen. Am Rande der Papierbahn werden im Schnittabstand dunkle Marken aufgedruckt. Über dem Rand der Papierbahn sind eine Lichtquelle und ein Fotowiderstand so installiert, daß dieser von dem Licht getroffen wird, das die Papierbahn reflektiert.



Jedesmal, wenn eine Marke unter dieser Einrichtung vorbeiläuft, sinkt die Stärke des reflektierten Lichts für einen Augenblick. Entsprechend schwankt die Stromstärke im Stromkreis des Fotowiderstandes. Dieses Schwanken ist der Steuerimpuls für das Schnittmesser.

Ähnlichen fotoelektrischen Kontroll- und Steuereinrichtungen verdanken wir, daß das Ende von Tuben in der richtigen Stellung zur Schrift breitgedrückt und verschlossen wird, daß Etiketten nicht schief auf Flaschen und Gläsern kleben und daß Zigaretten stets „richtigherum“ in ihren Schachteln liegen.

Die Kontrolle von Farben mutet man oft nicht mehr dem leicht ermüdenden Auge zu. Soll überprüft werden, ob eine einfarbige Papierbahn ihre Tönung beibehält oder nicht, braucht man zwei Fotowiderstände. Sie werden von einer gemeinsamen Lichtquelle angestrahlt. Der eine Fotowiderstand fängt das vom Prüfling zurückgeworfene Licht auf, während der andere auf das Licht anspricht, das ein Muster in der „Sollfarbe“ reflektiert. Beide Fotowiderstände sind in einer Brückenschaltung miteinander verbunden, wie sie uns bereits einmal bei der Anwendung von Thermostoren begegnete. Jede Farbabweichung des Prüflings läßt ein Meßinstrument ausschlagen.



Sollen durchsichtige Erzeugnisse, z. B. farbige Gläser, kontrolliert werden, gelangen Prüfling und Muster zwischen Lichtquelle und Fotowiderstände. Diesmal liefert das durch Muster und Prüfling scheinende Licht die Meßwerte.

Als man – so entnehmen wir dem westdeutschen technischen Magazin „hobby“ – feststellte, daß die New Yorker Hausfrauen weiße Eier bevorzugten, während die Gunst ihrer Bostoner Geschlechtsgenossinnen sich mehr braunen Eiern zuneigte, entwickelte man flugs eine fotoelektrisch gesteuerte Maschine, die die Eier säuberlich nach der Farbe sortiert. Bei höchster Arbeitsgeschwindigkeit werden angeblich 1000 Eier je Sekunde sortiert. Wie man bei diesem Tempo das Entstehen von „Rührei“ verhindert, wurde nicht angegeben.

Mit fotoelektrischen Geräten kann auch die Trübung von Flüssigkeiten und Dämpfen gemessen werden. Mit Hilfe von Licht-

schranken bestimmt man nicht nur die Breite, sondern auch die Länge und Dicke von Werkstoffen. Bereits eine bloße Aufzählung aller fotoelektrischen Kontroll- und Prüfeinrichtungen würde viele Buchseiten füllen.

Ein sowjetischer Autor berichtet von einem Spielzeughund, der immer dann laut bellend auf seinen „Herrn“ zuläuft, wenn dieser ihn mit einer Taschenlampe anleuchtet; ja, der dem Licht sogar folgt, wenn sich der Träger der Lampe bewegt. Zwei Fotowiderstände sind die „Augen“ des Hundes. Sie steuern in Abhängigkeit vom Lichteinfall Fußrollen, die die Bewegungen des Hundes lenken. Kommt mehr Licht von rechts, wendet sich der Hund nach rechts; wird das linke Auge stärker beleuchtet, bewegt er sich nach links. Bei gleichem Lichteinfall auf beide Augen läuft er geradeaus. Das Bellen besorgt ein kleines Tonbandgerät, das durch das Licht eingeschaltet wird.

Das Spielzeug hat eine durchaus ernsthafte Bedeutung: Es gibt heute fotoelektrische Einrichtungen, die bereits auf winzige Richtungsänderungen einer Lichtquelle reagieren. Man kann sie benutzen, um astronomische Geräte selbsttätig einem Stern nachzuführen oder einen Satelliten ständig in einer bestimmten Richtung zur Sonne zu halten. Man kann sogar Navigationsgeräte konstruieren, mit deren Hilfe ein Fahrzeug oder Flugzeug selbsttätig eine Lichtquelle ansteuert.

### Intermezzo in Infrarot

Haben Sie einmal gelesen, wie vor Jahrzehnten die ersten Nachtaufnahmen von Tieren in freier Wildbahn entstanden? Damals wurde die Kamera sorgfältig getarnt an der Tränke oder am Futterplatz aufgebaut. Eine dünne Schnur oder ein Draht führte so über den Wechsel, daß die leiseste Berührung den Mechanismus auslöste, der das Blitzlichtpulver entflammete. Nach Einbruch der Dunkelheit wurde der Verschluss des Apparates geöffnet, und dann hieß es warten, bis ein Tier den Draht streifte. Nicht immer gelangen die Aufnahmen; denn die mechanische Auslösvorrichtung war keinesfalls zuverlässig. Oft kam es sogar vor, daß durch den Draht die ganze Anlage umgerissen wurde.



Heute gibt es für den gleichen Zweck eine viel bessere Lösung: Der Draht wird durch eine Lichtschranke ersetzt. Sie betätigt ein Elektronenblitzgerät und den Kameraverschluß; außerdem kann sie den Mechanismus einschalten, der nach jeder Aufnahme den Filmtransport übernimmt. Es sind daher auch aufeinanderfolgende Aufnahmen möglich, ohne daß sich zwischendurch jemand dem Apparat nähern müßte. Da der Kameraverschluß im Gegensatz zur alten Methode nur für die Dauer der Aufnahme geöffnet wird, ist der Einsatz der Anlage nicht auf die Nachtstunden beschränkt.

Aber wird ein Tier nicht durch die Lichtquelle erschreckt? Das ist nicht der Fall; es merkt überhaupt nichts von dem Lichtstrahl, den es unterbricht. Die Lichtschranke arbeitet mit unsichtbarem, mit ultrarotem Licht. Fotodioden und Fotowiderstände aber „sehen“, wie wir erfahren, nicht nur ultrarotes Licht, sondern man kann sie dafür sogar besonders empfindlich machen. Eine solche Fotodiode ist das wichtigste Bauelement der Ultrarot-Lichtschranke. Ihrer Lichtquelle, auf deren Unsichtbarmachen es vor allem ankommt, wird ein Ultrarotfilter vorgesetzt, das alle sichtbaren Lichtstrahlen zurückhält. Durch ein gleiches Filter kann man der Fotodiode auch das Tageslicht fernhalten. Die Lichtschranke funktioniert daher unabhängig von der Tageszeit.

Eine Ultrarot-Lichtschranke ist überall dort das Richtige, wo die Lichtschranke verborgen bleiben soll. Das gilt auch für Raumschutzanlagen. Ein Dieb, der in einen durch Lichtschranken geschützten Raum eindringt, würde vielleicht doch eine Möglichkeit herausfinden, ein Durchbrechen des Lichtstrahls zu vermeiden. Eine Ultrarot-Lichtschranke aber sieht er überhaupt nicht.

Aus anderen Gründen wird auch in lichtelektrischen Kontroll- und Steuereinrichtungen der Industrie häufig mit ultrarotem Licht gearbeitet. Damit ein fotoelektrisches Gerät einwandfrei funktioniert, muß gewährleistet sein, daß sein lichtempfindliches Element nur auf das ihm zuge dachte Licht reagiert. Eine Zählvorrichtung wäre z. B. nutzlos, wenn sie auch auf Lichtblitze anspräche, die von bewegten, blanken Metallteilen ausgehen. Da sich Störungen durch „Fremdlicht“ nicht völlig ausschließen lassen, wurden mehrere sinnreiche Verfahren entwickelt, die solche Störungen unmöglich machen. Eines der einfachsten besteht darin, ultrarotes Licht zu verwenden. Ist es sorgfältig gefiltert und ist auch der Fotowiderstand mit einem entsprechenden Filter ausgerüstet, lassen sich Beeinflussungen durch Fremdlicht mit Sicherheit vermeiden.

Vielen Lesern wird die Bezeichnung „infrarot“ vertrauter sein als „ultrarot“; denn der Ausdruck „infrarot“ spielt eine große Rolle in der Wärmetechnik. „Ultrarot“ und „infrarot“ bedeuten dasselbe: Ultrarote Strahlung ist, physikalisch gesehen, Wärmestrahlung, die in ihren Eigenschaften dem sichtbaren Licht um so ähnlicher ist, je weniger sie sich in der Wellenlänge von ihm unterscheidet. Heizen wir einen eisernen Ofen, so sendet er zunächst unsichtbare





Infrarot- oder Ultrarotstrahlung aus. Je heißer er wird, desto mehr verschiebt sich das „Strahlungsmaximum“ in Richtung zum sichtbaren Licht. Sobald wir die Ofenplatte dunkelrot, dann immer heller glühen sehen, wird neben intensiver Wärmestrahlung in zunehmendem Maße auch sichtbares Licht erzeugt.

Ein ultrarotempfindliches fotoelektrisches Bauelement kann also zum Nachweis von Wärmestrahlung benutzt werden. Deshalb kann man oft auf eine Lichtschranke verzichten, wenn heiße Gegenstände zu zählen oder zu prüfen sind. Man benötigt lediglich einen ultrarotempfindlichen Fotowiderstand oder eine Fotodiode. Die Werkstücke selbst sind die (Infrarot-)Lichtquelle.

Der Abstich von Schmelzöfen, die Arbeit einer Walzenstraße, noch nicht abgekühlte Schmiedeteile, Konservendbüchsen mit heißem Inhalt können leicht kontrolliert und gezählt werden. In „Heißläufer-suchgeräten“ stellen Infrarot-Fotowiderstände, die an Eisenbahngleisen angebracht sind, sogar fest, welche Achslager fahrender Züge sich heißgelaufen haben.

Man hat die Infrarotempfindlichkeit von Fotowiderständen und -dioden durch systematische Entwicklungsarbeiten sehr erheblich steigern können. Mit Spezialausführungen läßt sich die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers auf mehrere hundert Meter nachweisen. Die Wärme von Flugzeugmotoren, Raketentriebwerken, Schiffsmaschinen und Kraftfahrzeugmotoren kann mit „Infrarotdetektoren“ auf Entfernungen von vielen Kilometern festgestellt werden.

Bereits vor vierzig Jahren dachte man daran, die Infrarotstrahlung in Warngeräten zu benutzen, die Schiffskollisionen oder Zusammenstöße mit Eisbergen verhindern sollten. Da noch keine genügend empfindlichen Infrarotdetektoren zur Verfügung standen, verliefen die Versuche wenig erfolgreich. Sie wurden zunächst wieder aufgegeben.

Zur Zeit der Naziherrschaft „interessierten“ sich vor allem Rüstungs-betriebe und militärische Dienststellen für Infrarotgeräte, während jede Entwicklung für friedliche Zwecke unterbunden wurde. Es entstanden Geräte, mit denen man Fahrzeuge bei Nacht ausmachen konnte, und „Zielsuchköpfe“ für Flakgranaten und Torpedos, die das Geschöß in Zielnähe zur Explosion brachten oder an das Ziel heranführten. Auch heute werden derartige Zielsuchköpfe zur Selbstlenkung von Raketen und wahrscheinlich auch zur Raketenbekämpfung angewandt. Daneben gibt es Infrarot-Nachtsichtgeräte, Infrarot-Zielfernrohre und „Lichtspracheräte“, in denen die infrarote Strahlung als „Nachrichtenträger“ für Telefonverbindungen dient.

In jüngster Zeit wurden Infrarot-Kollisionsschutzgeräte entwickelt, die die Radaranlagen ergänzen sollen. So baute man in die Tragflächenenden, in den Bug und in das Heck von Flugzeugen Infrarotdetektoren ein, die in der Nähe befindliche Maschinen bis auf Entfernungen von 15 km melden. Die gesamte Anlage wiegt nur

Spezial-  
gerät

15 kp. Ob derartige Geräte sich durchsetzen oder ob – nicht zuletzt durch die Fortschritte der Halbleitertechnik und der Miniaturisierung – neuartige, verbesserte Radaranlagen sie überflüssig machen werden, wird sich in den kommenden Jahren entscheiden.

## Kraftwerk im Sonnenlicht

### 40 m Eis im Jahr

Produktion, Verkehrswesen, unser täglicher Komfort in seiner Vielfalt setzen voraus, daß genügend Energie zur Verfügung steht. Das gilt für heute, und das wird mehr noch für morgen gelten. Der Energiebedarf der Menschheit wächst von Jahr zu Jahr schneller; schon heute ist seine Deckung beinahe das „Problem Nr. 1“ jeder Volkswirtschaft.

Ehe es Atomkraftwerke gab, entstammte alle Energie, die auf der Erde genutzt wurde, der Sonne. Gleich, ob sich Segel blähen, ob Wasserräder oder Turbinen laufen, ob Kohle oder Erdöl verbrannt werden: Letztlich sind es immer „verwandelte Sonnenstrahlen“, die uns helfen; denn die Sonnenwärme setzt den Kreislauf des Wassers und die Luftmassen in Bewegung, läßt Pflanzen wachsen und erhält das tierische und menschliche Leben.

Die Energiemenge, die die Sonne der Erde zustrahlt, überschreitet fast unser Vorstellungsvermögen. In jedem Jahr könnten wir mit ihr einen beinahe 40 m dicken Eisanspanzer von der Erdkugel tauen. Täglich erhält die Erde von der Sonne eine größere Energiemenge, als die Menschheit bisher während ihrer ganzen Geschichte „verbraucht“ hat.

Es gäbe auf der Welt heute und würde auch zukünftig keine Energiesorgen geben, wenn man den von der Sonne zur Erde fließenden Energiestrom überall und in beliebigem Umfang anzapfen könnte. Doch das ist nicht möglich. Aus geographischen und technischen Gründen kann nur ein geringer Teil der in Flußläufen enthaltenen Energie genutzt werden; obwohl ständig neue Kohle- und Erdöllagerstätten entdeckt werden, wird ihr Vorrat eines Tages zur Neige gehen; der Wind endlich ist ein ungebärdiger Geselle, dessen Zähmung für eine Energiegewinnung im großen wohl kaum gelingen dürfte.

Aber auch dort, wo man gut an die natürlichen Energiequellen „herankommt“, sind Umwege nicht zu vermeiden. Ehe aus Sonnenwärme Elektrizität, die vielseitigste Energieform, zu gewinnen ist, muß Kohle entstehen, gefördert und verbrannt werden, muß die freiwerdende Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt werden, aus der man dann endlich durch nochmalige Verwandlung Elektroenergie erzeugt.

Lassen sich solche Umwege nicht vermeiden? Kann man die Zwischenstufen nicht weglassen und die Sonnenenergie unmittel-



bar ausnutzen? Der Gedanke daran ist keineswegs neu; immer wieder haben geistvolle Köpfe, Forscher, Techniker, aber auch Uhrmacher und Mechaniker, versucht, ihn in die Tat umzusetzen. Im Zeitalter der Dampfmaschine bemühte man sich, Dampf mit Hilfe der Sonnenwärme zu erzeugen. Die Experimente glückten zwar, doch um die Wirtschaftlichkeit ausgeführter Anlagen war es trotz des hohen technischen Aufwandes sehr schlecht bestellt. Deshalb konnten sich Sonnenkraft-Dampferzeuger nicht in größerem Umfange durchsetzen.

Heute, im Zeitalter der Elektrotechnik, will man die Sonnenenergie unmittelbar in Elektrizität umwandeln, ohne Dampf oder einen anderen „Energieträger“ zwischenschalten zu müssen.

Ist nicht jede Fotodiode, jedes Fotoelement ein kleines „Sonnenkraftwerk“? Wenn die Leistungsfähigkeit des Selenplättchens im Belichtungsmesser ausreicht, Spule und Zeiger des Meßinstruments zu drehen, müßte dann ein größeres Fotoelement nicht einen Elektromotor treiben können?

Tatsächlich arbeiten fast alle ausgeführten und projektierten Sonnenkraftanlagen mit Fotoelementen, der bis heute einzig bekannte Möglichkeit, Lichtenergie unmittelbar in Elektrizität umzuwandeln.

Das Selenfotoelement wäre für diese Energiegewinnung allerdings selbst dann nicht geeignet, wenn man nur kleine Energiemengen benötigte. Sein Wirkungsgrad ist zu niedrig: Nur 0,5 bis höchstens 1 % der Lichtenergie würden als Elektroenergie nutzbar.

Daß der Wirkungsgrad eine so entscheidende Schranke errichtet, erscheint auf den ersten Blick verwunderlich. Der „Rohstoff Licht“ wird ja in beliebiger Menge und außerdem kostenlos geliefert; also brauchte man doch, um den schlechten Wirkungsgrad auszugleichen, nur eine entsprechend große Menge des Rohstoffes Licht zur Energiegewinnung heranzuziehen?

Unsere Rechnung ginge nicht auf. Die Sonne selbst trägt die Schuld daran. Die Strahlungsleistung, die sie der Erde zukommen läßt, ist zwar gewaltig, doch sie verteilt sich auf eine sehr große Fläche. Im günstigsten Fall, bei senkrechtem Strahleneinfall und einer atmosphärelos gedachten Erde, kämen auf einen Quadratmeter Erdoberfläche etwa 1,4 kW. Die tatsächlichen Werte liegen im allgemeinen weit darunter. Selbst unter sehr günstigen atmosphärischen Bedingungen und bei höchstem Sonnenstand wird eine Leistung von 1 kW/m<sup>2</sup> kaum überschritten. Bezieht man bewölkte Tage und die Nachtstunden in die Leistungsbilanz ein, so sinken die Zahlen für weite Gebiete der Erde rapide ab: In Mitteleuropa schätzt man den Jahresdurchschnitt (über Tag und Nacht genommen) der Sonnenleistung auf nur etwa 15 W/m<sup>2</sup>.

Das Selenfotoelement aber nutzt im Höchstfall 1 % dieser Leistung aus. Selbst in ausgesprochen sonnigen Gebieten, etwa in Zentralasien, erbrächte der Quadratmeter Selenelementfläche bestenfalls eine Leistung von 10 W. Um einen Ventilator anzutreiben, be-

notigte man bereits eine Elementfläche von 3 bis 5 m<sup>2</sup>, für einen Handmixer 8 m<sup>2</sup>. So wertvoll das Selenfotoelement für die Steuer- und Regeltechnik auch ist, als Energiequelle kommt es nicht in Frage.

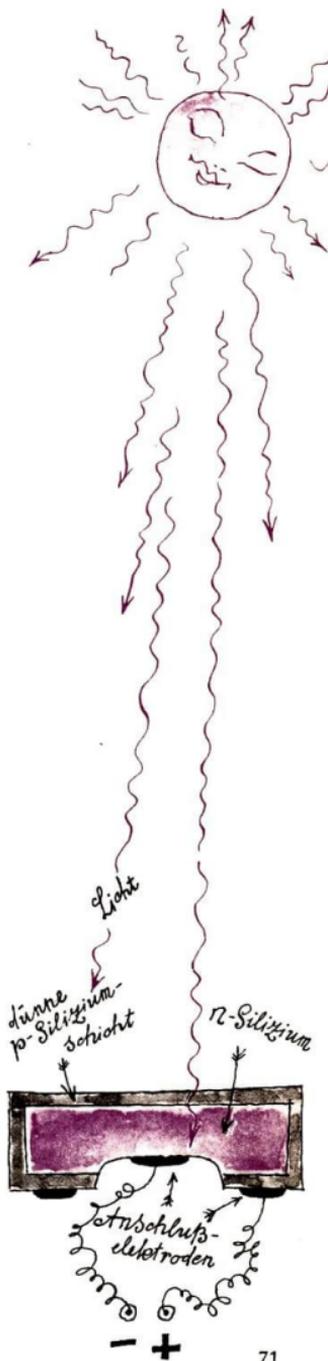
An der eingestrahelten Energiemenge können wir nichts ändern. Wie sich die Technik auch weiterentwickeln mag, niemals ließe sich von einem Quadratmeter Erdoberfläche eine Leistung gewinnen, die dem Wert der auf einen Quadratmeter Erdoberfläche eingestrahelten Leistung gleichkommt oder ihn überschreitet. Es blieb daher nichts anderes übrig, als sich nach Fotoelementen höheren Wirkungsgrades umzusehen. Man fand sie in den Siliziumfotoelementen. Ihr Wirkungsgrad kann 20% erreichen; die serienmäßig hergestellten „Sonnenzellen“ weisen einen Wirkungsgrad von 12% auf. Das ist schon etwas anderes als der bescheidene Wirkungsgrad des Selenfotoelements! Während sich aus 1 m<sup>2</sup> Selenfotoelementen 10 W „herausholen“ lassen, sind es bei einer gleichgroßen Fläche von Siliziumfotoelementen bereits 120 W (beziehungsweise 200 W bei einem Wirkungsgrad von 20%). Der Ventilator brauchte nur eine Elementenfläche von 25 bis 40 dm<sup>2</sup>, und das wäre schon eher technisch zu realisieren.

Die Wirkungsweise eines Siliziumfotoelements entspricht der eines Selenfotoelements. Wir brauchen daher nur kurz auf seinen Aufbau einzugehen.

Aus einem n-leitenden Siliziumkristall werden dünne Plättchen geschnitten. Zusammen mit geringen Bormengen erhitzt man die Scheiben für eine genau festgelegte Zeit auf eine Temperatur von 1000 °C und mehr. Dabei dringen Atome des dreiwertigen Bors in die Siliziumoberfläche ein. Die oberste Siliziumschicht wandelt sich in p-Silizium um. Die p-Schicht, die das ganze Plättchen einhüllt, ist nur etwa 2 µm stark. Zwischen dem p- und dem n-Silizium entsteht die für die Funktion des Elements notwendige Sperrschicht. Haben sich die Scheiben abgekühlt, so wird aus einem Teil ihrer Rückseite die p-Schicht wieder ausgeschliffen oder ausgeätzt. Dadurch ist das n-leitende Silizium wieder zugänglich. p- und n-Gebiet werden mit Anschlußelektroden versehen. Das Fotoelement erhält einen Schutzlacküberzug. Es hat ungefähr die Größe einer Briefmarke oder einer Rasierklinge.

Auch Siliziumfotoelemente erzeugen nur eine Spannung, die niedriger als 1 V ist. Für höhere Spannungen müssen entsprechend viele Siliziumfotoelemente hintereinandergeschaltet werden.

Die Stromstärke, die Siliziumfotoelementen entnommen werden kann, hängt vor allem von der Elementenfläche ab. Elemente mit sehr großen Flächen lassen sich bis heute noch nicht herstellen. Man hilft sich, indem man zahlreiche Elemente normaler Größe parallel schaltet. Meistens werden Hintereinander- und Parallelschaltungen gleichzeitig angewandt, um die „Sonnenbatterie“ – so nennt man die zusammengeschalteten Sonnenzellen – dem jeweiligen Stromverbraucher anzupassen.



Bei der Weiterentwicklung der Solarzellen legt man vor allem Wert auf die Erhöhung des Wirkungsgrades, denn seine Verbesserung würde eine Verkleinerung der Elementenflächen beziehungsweise eine Leistungssteigerung zur Folge haben. Daneben untersucht man auch andere Halbleiterstoffe auf ihre Eignung für Solarzellen. Man weiß z. B., daß Indiumphosphid und Galliumarsenid dem Silizium in Solarbatterien überlegen wären. Technologische Schwierigkeiten haben jedoch bisher die Herstellung solcher Fotoelemente verhindert.

### Noch sind sie teuer . . .

Siliziumfotoelemente sind nicht billig. Sie sind – gleiche Leistungsfähigkeit vorausgesetzt – um ein Vielfaches teurer als Trockenelemente und Taschenlampenbatterien. Berechnungen aus westlichen Ländern besagen, daß man ein Gerät kleinen Leistungsbedarfs, beispielsweise einen Taschenempfänger, für den Preis einer Solarbatterie fast zehn Jahre aus Trockenelementen speisen könnte. Doch diese Berechnungen sind auch dann noch unreal, wenn wir annehmen, sie seien ohne die Mitwirkung besorgter Fabrikanten von Trockenelementen zustande gekommen.

Daß Siliziumfotoelemente teuer sind, liegt vor allem daran, daß ihre Herstellung so kompliziert ist; bereits der Weg bis zum Einkristall ist ja alles andere als kurz und bequem. Außerdem werden Solarzellen zur Zeit noch in verhältnismäßig kleinen Serien produziert. Das wird nicht immer so bleiben. Die ersten Glühlampen, die ersten Radioröhren, die ersten Fotoplatten waren gleichfalls Kostbarkeiten; ihr Preis sank in dem Maße, wie es gelang, von der Stück-um-Stück-Fertigung zur Massenproduktion überzugehen. In der Sowjetunion, wo die Solarzelle kein ungebetener Konkurrent anderer Spannungsquellen ist, existieren bereits mechanisierte Fließstraßen zur Herstellung von Siliziumfotoelementen. Zweifellos wird eines Tages der Preis einer Solarbatterie ihrer Verwendung nicht mehr im Wege stehen.

Schon jetzt gibt es zahlreiche technische Aufgaben, bei denen man den hohen Preis von Siliziumfotoelementen gern in Kauf nehmen kann. Kaum geringer ist auch die Zahl der Aufgaben, bei deren Lösung man auf Solarbatterien zurückgreifen muß, weil andere Spannungsquellen nicht eingesetzt werden können.

Eine ihrer ersten und inzwischen weit verbreiteten Anwendungen hat die Solarbatterie in automatischen Wetterbeobachtungsstationen gefunden. Sie übermitteln selbsttätig meteorologische Beobachtungsdaten aus abgelegenen Gebieten – aus der Arktis oder aus Wüsten – und ergänzen dadurch das Netz der Wetterstationen. Ihre Tätigkeit ist besonders wertvoll, weil diese Gegenden oft ausgesprochene Wetterküchen sind.

Im Aufbau und in der Wirkungsweise ähneln die Wetterroboter den bekannten Radiosonden. Im Gegensatz zu diesen sollen sie



jedoch nicht nur einige Stunden, sondern Monate oder gar Jahre ununterbrochen in Betrieb bleiben. Woher aber nimmt eine derartige Anlage ihren Strom? Diese Frage war bis vor kurzem nicht einfach zu beantworten; denn ein Anschluß an das Energieversorgungsnetz ist nicht möglich, und ein Auswechseln von Batterien würde lange Reisen oder kostspielige Flüge erfordern. In günstig gelegenen Gegenden der Erde hat sich durch den Einsatz von Sonnenbatterien ein Ausweg eröffnet. Die Wetterstationen werden mit Siliziumsonnenbatterien ausgerüstet, die den Funksender und die Meßgeräte speisen. Da die benötigte Leistung selten einige Watt überschreitet, genügen Sonnenbatterien bescheidener Abmessungen.

Fernsprech- und Fernschreibleitungen führen häufig durch wenig besiedelte oder unwegsame Gebiete. Eine einwandfreie Verständigung über solche Leitungen setzt voraus, daß in gewissen Abständen Verstärker in die Strecke geschaltet werden.

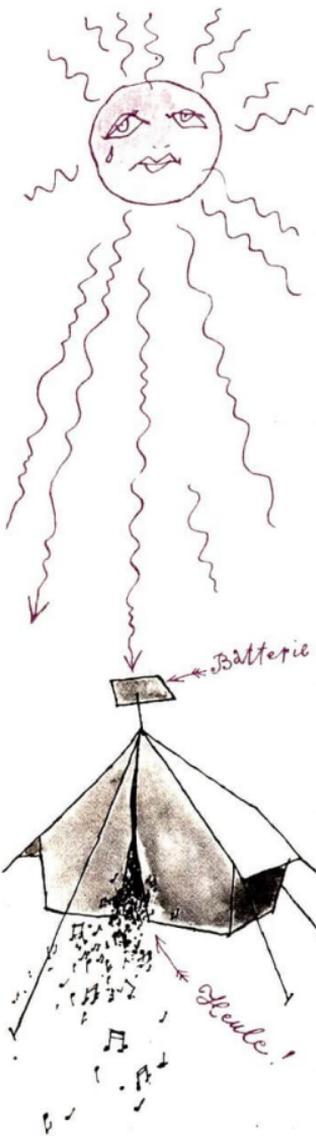
Verstärker, die mit Transistoren bestückt sind, verbrauchen nur sehr wenig elektrische Energie. Man kann sie ohne weiteres Sonnenbatterien entnehmen. Diese werden häufig unmittelbar auf dem „Deckel“ des Verstärkers angebracht, der an die Leitungsmasten geschraubt wird. Die Sonnenbatterie braucht nicht viel größer als eine Schokoladentafel zu sein. Auch in Vielfach-Fernsprechverbindungen haben Sonnenbatterien bereits ihre Bewährungsprobe bestanden, z. B. in einem nordamerikanischen Fernsprechnet, dessen Stromversorgung von 432 Sonnenzellen übernommen wird. Selbsttätige Waldbrandmeldeanlagen werden hier und da gleichfalls aus Siliziumsonnenbatterien gespeist.

An Hafeneinfahrten und auf Binnenwasserstraßen der Sowjetunion kann man Leuchtbojen beobachten, die auf der Oberseite ihres Schwimmkörpers außer der Lampe ein flaches, schüsselähnliches Gebilde tragen. Es ist eine Sonnenbatterie, die den Strom für die Lichtquelle der Leuchtboje und für den dazugehörigen Schaltmechanismus liefert.

Wie kann eine Leuchtboje nachts in Tätigkeit sein, wenn ihr „Kraftwerk“ nur tagsüber arbeitet? Was nützen die Sonnenbatterien von Wetterstationen, Fernsprechverstärkern und Waldbrandmeldern, wenn die Sonne nicht scheint? Sie hätten tatsächlich wenig Sinn, wenn die Nachtstunden und sonnenlose Zeiten nicht überbrückt werden könnten.

Man hilft sich mit dem sogenannten Pufferbetrieb. Außer der Sonnenbatterie ist noch ein Akkumulator vorhanden. Er wird mit der Sonnenbatterie und mit dem zu speisenden Gerät verbunden. Die Sonnenbatterie liefert nicht nur Strom an das Gerät, sondern lädt gleichzeitig den Akkumulator auf. In der Nacht oder bei trübem Wetter übernimmt er die Stromversorgung. Die Sonnenbatterie muß deshalb immer leistungsfähiger sein, als für das Gerät allein erforderlich wäre. Wie groß ihr Leistungsüberschuß zu sein hat, hängt vor allem von der durchschnittlichen Sonnenschein-





dauer am Standort der Anlage ab. Ist sie lang, so braucht der Akkumulator nur eine verhältnismäßig geringe Energiereserve bereitzustellen; ist sie kurz, so müssen der Akkumulator und gleichermaßen auch die Sonnenbatterie, die ihn während der wenigen „hellen“ Stunden auflädt, leistungsfähiger sein. Notfalls kann man auf diese Weise auch längere Schlechtwetterperioden überbrücken. Allerdings sind dann die Anschaffungskosten für die Sonnenbatterie sehr hoch.

Die ersten Berichte über Sonnenbatterien ließen die Besitzer und Freunde von Kofferempfängern aufhorchen. Sonnenschein, Camping und Wochenende sind untrennbare Begriffe; ein Radio, das durch Sonnenschein „angetrieben“ wird, scheint die ideale Ergänzung zu sein. So fehlte es denn bald nicht an murrenden Stimmen, die meinten: „Wann gibt es endlich Sonnen-Kofferempfänger? Wann werden die schweren und auch nicht billigen Batterien für unsere ‚Kofferheule‘ überflüssig?“ Nun, das Murren ist verständlich; doch überlegen wir uns einmal in Ruhe, wie es bei uns um sonnengespeiste Empfänger stünde.

„Ständiger Sonnenschein“ für Stunden oder Tage ist in Mitteleuropa nicht allzu häufig. Außerdem – was nützte uns die schönste Sonnenbatterie, wenn wir abends oder bei trübem Wetter im Zelt Radio hören wollten? Auch hier könnte die Lösung nur heißen: Pufferbetrieb. Der Kofferempfänger müßte außer seiner Sonnenbatterie mindestens einen Akkumulator enthalten, der in sonnenlosen Stunden für die „Musikberieselung“ sorgt. Wenn aber schon ein Akkumulator nötig ist – warum soll man ihn mit der teuren Sonnenbatterie laden und nicht, wie heute allgemein üblich, das Aufladen durch das Lichtnetz besorgen lassen?

Welche Vorteile bringt uns die Sonnenbatterie, wenn die Empfänger weder fühlbar leichter noch billiger werden? Offensichtlich keine. Aus diesen Gründen hat die Industrie der Länder in mittleren geographischen Breiten bisher darauf verzichten müssen, sonnengespeiste Koffergeräte in größeren Mengen zu produzieren und auf den Markt zu bringen.

Ganz anders liegen die Dinge, wenn jemand Radio hören möchte, der sein Gerät nicht an eine Steckdose anschließen oder im nächsten Fachgeschäft Batterien kaufen kann. Seien es Forscher, seien es Jäger, seien es die ersten Siedler in Neulandgebieten – sie alle würden gern den höheren Preis eines sonnengespeisten Empfängers in Kauf nehmen. Hier liegt, wenigstens solange Sonnenbatterien noch nicht zu billigen Massenartikeln geworden sind, die große Bedeutung des Empfangsgerätes mit Sonnenbatterie und Pufferakkumulator.

In der Sowjetunion hat man das frühzeitig erkannt. Empfänger mit Sonnenbatterien gehören seit einigen Jahren zum Produktionsprogramm der Radioindustrie. Neben Koffergeräten wie dem „Sputnik“ oder dem „Solnetschny“ gibt es auch Heimempfänger für sonnenreiche, noch nicht elektrifizierte Gegenden. Bei diesen

Geräten wird die Batterie vom Empfänger getrennt angebracht, etwa vor dem Fenster, während das Empfangsgerät im Inneren des Hauses oder Zeltes aufgestellt werden kann.

### Sonnenbatterien statt Turbogenerator ?

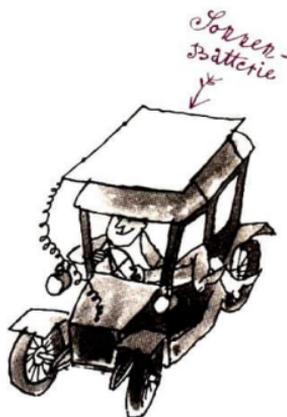
„Autoveteranen“ erfreuen sich seit einigen Jahren wieder großer Beliebtheit. Technisch interessierte Menschen vieler Länder, die sich bislang an PS-Zahlen, Geschwindigkeiten und den zahllosen Raffinessen der Kraftfahrzeugtechnik begeisterten, entdeckten auf einmal ihre Liebe zu den Benzinkutschen der Zeit um die Jahrhundertwende und machten mit viel Mühe archaische Kraftfahrzeuge wieder fahrfertig, um sie einem staunenden Publikum vorzuführen.

Ein besonders merkwürdiges Gefährt rollte 1960 über englische Landstraßen. Es war ein überholter und frisch lackierter „Baker Electric“, der im Jahre 1912 mit einem Elektromotor und einer Akkumulatorenbatterie den allerdings vergeblichen Versuch unternommen hatte, die knatternden Benzinautomobile von den Straßen zu verdrängen.

Das Neue am Baker Electric von 1960 war das Dach. Es trug eine Platte, auf deren Oberfläche mehrere tausend Solarzellen befestigt waren. Diese Batterie lud die Akkumulatoren des Baker Electric und machte ihn damit zum „Sonnenauto“. Es konnte bei voll aufgeladenen Akkumulatoren 80 km mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h zurücklegen. Anschließend war erst einmal „große Pause“; denn die Sonnenbatterie lieferte selbst bei ununterbrochenem Sonnenschein nicht soviel Strom nach, wie zum Antrieb des Elektromotors verbraucht wurde. So mußte man also den Baker Electric erst einmal für einige Stunden in der Sonne parken, ehe die Fahrt weitergehen konnte. Bei bedecktem Himmel blieb das Sonnenauto in der Garage.

Trotzdem war der „Baker Electric 1960“ mehr als bloße Reklame für die „International Rectifier Corporation“, die ihn mit Siliziumfotoelementen vom Typ „Sonnenkönig“ ausgestattet hatte. Er demonstrierte auf amüsante Weise, daß Sonnenbatterien durchaus größere elektrische Leistungen abgeben können. Von dieser Feststellung ist es nicht weit bis zu Projekten für Sonnenenergie-Großkraftwerke, die ganze Länder oder Industriezentren mit Strom versorgen sollen.

Die Vorzüge eines Sonnenenergie-Großkraftwerkes sind bestechend. Welche Vereinfachung für Planung und Betrieb eines Großkraftwerkes würde es bedeuten, wenn der gesamte Brennstofftransport wegfiel! Keine Kohlenzüge, keine Erdölleitungen, kein Wasserweg oder Gleisanschluß zum Kraftwerk! Es gäbe weder Asche noch Flugstaub oder Rauchgase. Man könnte auf die kostspieligen Turbinen und Generatoren und ihre Fundamente verzichten. Auch die in Atomkraftwerken notwendigen Vorrichtungen zum



Strahlenschutz wären überflüssig. Die Anlagen wären einfach und könnten in Freiluftbauweise ohne Hallen errichtet werden. Bauzeit und Baukosten blieben niedrig; der Betrieb, von Wartungs- und Reparaturkosten abgesehen, kostete nichts.

Um die Frage zu beantworten, warum es bei derart günstigen Eigenschaften nicht längst Sonnenenergie-Großkraftwerke gibt, müssen wir neben den Vorteilen auch die Nachteile untersuchen; sie sind leider beträchtlich.

Nur in wenigen Gegenden der Erde wäre ein Sonnenenergie-Großkraftwerk überhaupt sinnvoll; denn in allen anderen kann man bestenfalls mit einer durchschnittlichen Sonnenscheindauer von wenigen Stunden am Tage rechnen. Selbst im sonnigsten Gebiet aber wäre ein Sonnenkraftwerk nachts zur Untätigkeit verurteilt. Diese Mängel fielen nicht so sehr ins Gewicht, wenn man auch für Großkraftwerke den Pufferbetrieb anwenden könnte. Doch das ist unmöglich. Hunderttausende und Millionen Kilowattstunden lassen sich nach unseren derzeitigen technischen Erkenntnissen nicht als Elektrizität speichern. Es gibt keine Akkumulatoren, die eine Großstadt eine ganze Nacht hindurch mit Elektroenergie versorgen könnten. Die Elektroenergie, die in Großkraftwerken gewonnen wird, muß – ganz gleich, um was für ein Kraftwerk es sich handelt – so verbraucht werden, wie sie erzeugt wird.

Aus diesem Grunde scheiden Sonnenkraftwerke gegenwärtig als Basis eines großen Energieversorgungssystems aus; es geht nicht an, ein Land sozusagen nur tagsüber zu elektrifizieren. Nicht einmal als Spitzenkraftwerk, zum Ausgleich der in den Morgen- und Abendstunden auftretenden erhöhten Energieanforderungen, wäre ein Sonnenkraftwerk geeignet. Gerade in dieser Zeit arbeitet es nicht.

Trotzdem gibt es Wissenschaftler und Techniker, die Sonnenenergie-Großkraftwerken eine Zukunft prophezeien. Manche von ihnen glauben sogar, daß die Sonnenenergie als Kraftquelle eines Tages wichtiger als die Atomkernenergie sein könnte. In einem weltumspannenden Energieversorgungsnetz würden sich, so argumentieren sie, die Unterschiede zwischen Tag und Nacht ausgleichen lassen; auch die klimatischen Bedingungen fielen nicht mehr so störend ins Gewicht. Man spricht sogar von der Möglichkeit, große Teile der Mondoberfläche zu einer Riesensonnenbatterie umzugestalten, deren Energie drahtlos zur Erde übertragen werden müßte. Das sind Pläne, die heute zwar phantastisch klingen, die aber bei friedlicher internationaler Zusammenarbeit vielleicht in wenigen Jahrzehnten verwirklicht werden könnten.

Aber es muß ja nicht immer gleich ein Großkraftwerk sein! Für zahlreiche örtlich begrenzte Aufgaben wird nur wenig Elektroenergie benötigt. Oft wäre es wirtschaftlich nicht vertretbar, diese Energie über große Entfernungen an den Verbrauchsort zu führen. In diesen Fällen, in denen auch wieder Pufferbetrieb möglich ist, hat das Sonnenkraftwerk eine große Chance.



Eine abgelegene Farm, eine Viehzuchtstation oder eine Oase brauchen Elektroenergie, vielleicht wenige Kilowatt; aber diese sind unentbehrlich, und sei es nur, um Wasser aus Tiefbrunnen zu pumpen. Soll man dafür eine vielleicht hundert oder mehr Kilometer lange Kraftleitung aufbauen? Soll man teure Transformatoren aufstellen, oder soll man Dieselaggregate einsetzen, deren Brennstoff gleichfalls herangeschafft werden müßte?

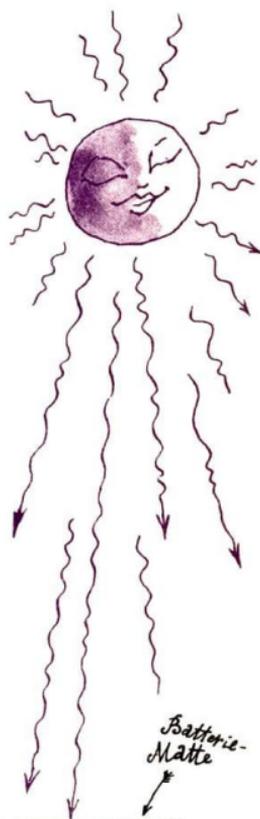
In Zukunft wird man sich dort, wo Sonnenschein keine „Mangelware“ ist, nicht mehr mit solchen Überlegungen abgeben müssen. Eine Sonnenbatterie, auf einem Dach montiert, und eine speichernde Akkumulatorenbatterie sind das Kraftwerk. Nicht einmal die bewährten „Windmotoren“ kommen hier mit. Sie enthalten zahlreiche bewegte, sich verschleifende Teile und müssen ständig gewartet werden. Die Lebensdauer der Sonnenbatterie dagegen ist beinahe unbegrenzt. Akkumulatoren sind ebenfalls sehr robust, und bewegte Teile gibt es beim Sonnenkraftwerk überhaupt nicht.

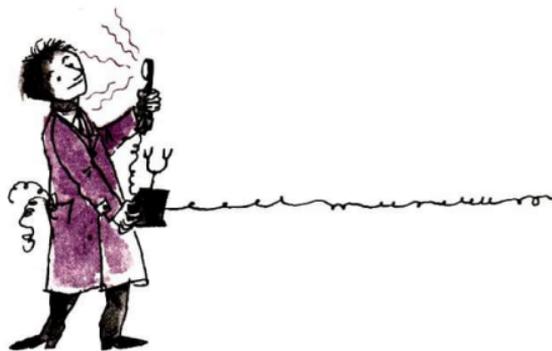
Besondere Bedeutung mißt man derartigen Anlagen in der Sowjetunion zu. Man hat errechnet, daß sich die Energiebilanz der mittelasiatischen Sowjetrepubliken durch Einsatz zahlreicher kleiner Sonnenkraftwerke bedeutend verbessern ließe. Man hat es aber nicht beim Rechnen bewenden lassen. Es gibt bereits Sonnenkraftwerke für Kolchosen und Sowchosen. Sie leisten immerhin einige Kilowatt.

Fachleute aus den jungen afrikanischen Staaten verfolgen diese Entwicklungen mit größtem Interesse; denn auch für weite Gebiete Afrikas wären derartige Kraftanlagen eine große Hilfe. Daß die sowjetischen Techniker ihre Erfahrungen und Erfindungen den afrikanischen Kollegen gern zur Verfügung stellen, bedarf keiner Erörterung.

Übrigens hat die Sowjetunion bereits transportable Kleinst-Sonnenkraftwerke geschaffen. Sie können in einer halben Stunde aufgestellt und wieder abgebaut werden. Die Anlagen liefern Strom für Expeditionen, für die Stützpunkte geologischer Suchtrupps, für Lagerplätze von Jägern, Holzfällern und Bergsteigern.

Was würden Sie wohl sagen, wenn Sie sähen, wie jemand ein zusammengerolltes Kraftwerk aus dem Rucksack zieht, ausbreitet und ein Funkgerät daran anschließt? Sowjetische Techniker haben auf einer Matte von 1 m<sup>2</sup> Fläche sechseckige Siliziumsonnenzellen wabenähnlich befestigt. Die Matte wird bei Sonnenschein ausgelegt. Man kann ihr bis zu 100 W Leistung „abzapfen“. Braucht man das „Kraftwerk“ nicht mehr, wird es wieder zusammengerollt.







### Was im Transistor vorgeht

#### Kleine Spannungen vergrößert

Ein Ferngespräch gehört heute zu den alltäglichsten Dingen. Doch wir sind verärgert, wenn sich Störungen in eine Unterhaltung einschleichen, deren Partner vielleicht Hunderte von Kilometern von uns entfernt ist.

Da hätten Sie einmal vor sechzig Jahren telefonieren sollen! Wenn es damals bei Ferngesprächen nicht krachte und knatterte, glaubte man fast, es sei etwas nicht in Ordnung. Die Stimmen aber, auf die allein es schließlich ankam, wurden um so leiser, auf je größere Entfernung man telefonierte; eine Verständigung von einem Ende eines Kontinents zum anderen war unmöglich.

Die Gründe dafür kann auch verstehen, wer nicht vom Fach ist. Die elektrische Leistung, die ein Mikrophon an eine Fernsprechleitung abgibt, ist sehr gering. Auf kürzere Entfernungen bereitete das keine Schwierigkeiten. Anders war es bei sehr weiten Strecken: Auf jedem Meter Leitungslänge ging ein wenig von der ursprünglichen Leistung verloren, und schließlich reichte der Rest nicht mehr aus, einen Telefonhörer ansprechen zu lassen.

Die Fernsprechtechniker waren deshalb ein wenig neidisch auf ihre Kollegen von der Telegrafie. Diese hatten das Problem des Leistungsverlustes gelöst, indem sie Relais in ihre Leitungen einschalteten, in denen die ankommenden schwachen Ströme im Rhythmus der Morsezeichen kräftige Ströme für den nächsten Leitungsabschnitt steuerten. War nach einer gewissen Leitungsstrecke der Strom im zweiten Abschnitt erheblich geschwächt, fügte man ein weiteres Relais ein. Das konnte man fast beliebig oft wiederholen, so daß Telegrafieverbindungen auch über größte Entfernungen einwandfrei funktionierten.

Ein „Telefonrelais“ ließ sich jedoch nicht auf elektromechanischer Grundlage konstruieren; denn beim Telefonieren ging es nicht nur darum, einen Strom im Rhythmus von Morsezeichen ein- und auszuschalten. Das Mikrophon lieferte Wechsellspannungen verschiedener Größe und mit Frequenzen bis zu mehreren Tausenden von Hertz. Mit diesem Tempo und mit den stetigen Änderungen der Mikrophonströme konnten Elektromagneten und Kontaktfedern

nicht Schritt halten. Ja, wenn es so etwas wie ein „trägheitsloses“ Relais gegeben hätte!

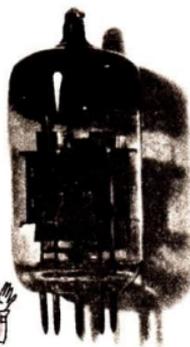
Nach einem solchen Relais suchte man auch an anderer Stelle. Man hatte festgestellt, daß an vielen Naturvorgängen, z. B. an biologischen Erscheinungen, elektrische Spannungen und Ströme beteiligt sind. Wollte man mehr über diese Zusammenhänge erfahren, mußte man die Spannungen messen und, da sie sich häufig in schnellem Wechsel änderten, möglichst mit selbstschreibenden Meßgeräten registrieren. Im allgemeinen waren die Spannungen jedoch viel zu niedrig, um Registriergeräte ansprechen zu lassen. Auch hier brauchte man ein Relais, das auf schnellste Spannungs- und Stromänderungen reagierte.

Vor der gleichen Schwierigkeit standen die Spezialisten, die sich der drahtlosen Telegrafie verschrieben hatten. Wichtigste Bestandteile der damaligen Funkempfänger waren der „Kohärer“ und später der Kristalldetektor. Doch sowohl Kohärer als auch Detektor konnten die hochfrequenten Wechselströme nur nachweisen; mehr nicht. Gelangten die Funkwellen mit so geringer Intensität zum Empfänger, daß der Kohärer oder das ihm nachgeschaltete Schreibgerät nicht mehr ansprach, so kam keine Funkverbindung zustande. Auch hier hieß es: Die schwachen Empfangsströme müssen verstärkt werden, damit sich mit ihnen „etwas anfangen“ läßt.

Das trägheitslose Relais entstand, als man alle Versuche auf elektromechanischer Grundlage aufgab und statt dessen Elektronen als „Kontaktfedern“ benutzte. Am Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wurden die ersten Verstärkerröhren zusammengesetzt und erprobt. Als Elektronenröhren, Radioröhren oder wie immer sie genannt werden, sind sie seitdem zu einem der wichtigsten Bauelemente der Elektronik geworden.

Die Elektronenröhre ist wirklich eine „Wunderlampe“: Sie hat den Rundfunk, das Fernsehen und den Tonfilm ermöglicht. Sie hilft uns telefonieren, ohne daß es noch eine Reichweitenbegrenzung gäbe. Sie unterstützt den Arzt, den Biologen, den Astronomen, den Geographen und den Geologen. In Betriebe und in das Verkehrswesen hat sie Eingang gefunden; sie kontrolliert, regelt und mißt. Richtige Techniker aber sind niemals selbstzufrieden. Gewiß, die Elektronenröhre hatte zahllose neue technische Möglichkeiten eröffnet; doch gab es nicht noch bessere Lösungen?

Die verstärkenden Elektronenröhren waren aus Röhren hervorgegangen, mit denen man Wechselspannungen gleichrichten konnte. Sollte man den Kristalldetektor, der sich als Gleichrichter für Hochfrequenzspannungen bewährt hatte, nicht ebenfalls zu einem „Kristallverstärker“ weiterentwickeln können? Man versuchte es, doch die Experimente mußten anfangs fehlschlagen, weil man keine richtige Vorstellung von den Vorgängen im Detektor hatte. Erst 1948 wurde der Kristallverstärker geboren. Als „Transistor“ hat er sich seitdem große Gebiete erobert, die vorher ausschließlich der Elektronenröhre vorbehalten waren.



## Drei Schichten – drei Anschlüsse

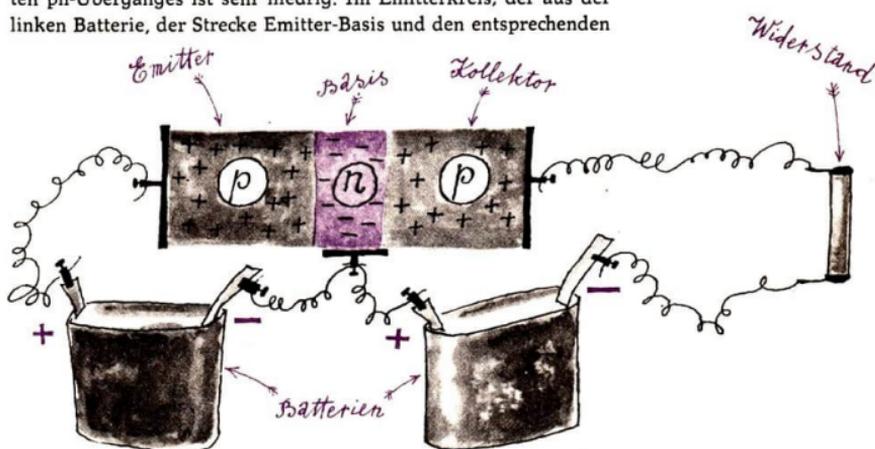
Fast alle Halbleiterbauelemente haben eines gemeinsam: Das Prinzip ihres Aufbaus ist an Einfachheit kaum zu überbieten; seine technische Verwirklichung dagegen ist kompliziert. Auch beim Transistor, genauer beim „Flächentransistor“, tritt das zutage. Ein Germanium- oder Siliziumkristall mit drei scharf gegeneinander abgegrenzten Bereichen verschiedener Leitfähigkeit, entweder in der Reihenfolge p-n-p oder in der Reihenfolge n-p-n, drei Anschlußelektroden, von denen jeweils eine mit einem Leitfähigkeitsbereich verbunden wird – das ist zunächst alles.

Der Transistor, für dessen Erfindung John Bardeen (geb. 1908), Walter Brattain (geb. 1902) und William Shockley (geb. 1910) im Jahre 1956 den Nobelpreis erhielten, war allerdings anders aufgebaut. Doch davon später. Nehmen wir uns zunächst den einfacheren Flächentransistor vor.

In der Skizze haben wir den pnp-Kristall nicht nur vergrößert dargestellt, sondern auch in den Proportionen grob verzerrt. In Wirklichkeit ist das n-Mittelstück nicht einmal  $50 \mu\text{m}$  stark.

Was im Transistor vor sich geht, können wir leichter verstehen, wenn wir uns vorstellen, daß er aus zwei Halbleitgleichrichtern entstand, die mit ihren n-Gebieten zusammengeschoben und vereinigt wurden. Der Pluspol der linken Batterie steht in Verbindung mit dem linken p-Gebiet, ihr Minuspol liegt an der n-leitenden „Basis“ des Transistors. Vergleichen wir die linke Hälfte der Skizze mit dem Bild auf Seite 34, so können wir sagen: Die linke „Diode“ ist auf Durchlaß geschaltet. Der positive Batteriepol drückt die positiven Löcher in das Kristallinnere, so daß sie in das n-Gebiet, in die Basis, gelangen.

Da die linke p-Seite Löcher in das n-Gebiet „emittiert“, nennt man sie „Emitter“. Der Widerstand des linken, auf Durchlaß geschalteten pn-Überganges ist sehr niedrig. Im Emitterkreis, der aus der linken Batterie, der Strecke Emitter-Basis und den entsprechenden



Anschlüssen gebildet wird, fließt Strom. Man nennt ihn Emitterstrom. Bereits bei geringfügigen Spannungsschwankungen der Batterie ändert er seine Stärke erheblich.

Die rechte „Diode“ ist in Sperrichtung geschaltet; denn diesmal liegt der Minuspol der (rechten) Batterie am p-Gebiet, der Pluspol an der Basis. In dem aus der rechten Diode und der zugehörigen Batterie gebildeten Stromkreis fließt daher nur ein sehr schwacher Sperrstrom, der uns auch bei Gleichrichtern begegnete.

Es scheint, als gingen sich die beiden Stromkreise überhaupt nichts an. Das wäre der Fall, wenn wir es wirklich nur mit aneinandergeschobenen Dioden zu tun hätten. Doch wir müssen diese Vorstellung jetzt aufgeben. Die vom Emitter in die Basis gedrückten Löcher wandern nämlich keineswegs, wie zunächst zu erwarten wäre, sämtlich über die Basis, um sich mit Elektronen aus der linken Batterie aufzufüllen.

Einige Löcher rekombinieren bereits in der Basis mit den dort vorhandenen Elektronen und scheiden damit für alle weiteren Vorgänge aus. Sehr viele sind es nicht; denn einmal ist das Volumen der Basis gering, zum anderen sorgt man durch entsprechende Dotierung dafür, daß die Dichte der Störstellen und damit der „Fallgruben“ für Löcher in der Basis gering bleibt.

Da die Basis sehr dünn ist, gelangen die meisten der eingedrungenen Löcher bis an die rechte Grenze des Basisgebietes. Sie treiben, driften gewissermaßen durch die Basis. Sobald die Löcher das rechte p-Gebiet erreicht haben, geraten sie unter den Einfluß des negativen Pols der rechten Batterie. Sie werden von der rechten Transistorelektrode angezogen, „aufgesammelt“, und fließen über die Batterie ab. Deswegen nennt man das rechte p-Gebiet „Kollektor“.

Die durch die Basis driftenden Löcher verstärken den Strom im Kollektorkreis (dieser wird aus der rechten Batterie, dem rechten pn-Übergang und dem Widerstand gebildet). Trotzdem bleibt aber der Kollektorstrom stets kleiner als der Strom im Emitterkreis; denn immer gehen in der Basis Löcher verloren.

Bei einem Kristall mit der Schichtenfolge n-p-n treten ähnliche Erscheinungen auf. Allerdings driften dann keine Löcher, sondern Elektronen durch die Basis. Außerdem müssen die Batterieanschlüsse vertauscht werden.

### **Zwischen Emitter und Kollektor**

Wir suchten nach einem trägheitslosen Relais, suchten nach einer Möglichkeit, Ströme oder Spannungen zu verstärken, suchten – kurz gesagt – nach einem Halbleiterbauelement, das genausoviel oder noch mehr kann als die Elektronenröhre. Sind wir diesem Ziel nähergekommen?

Charakteristisch für jedes Relais und für jede Elektronenröhre sind Wechselwirkungen zwischen zwei Stromkreisen. Beim Relais

steuert der schwache Strom, der durch die Relaiswicklung fließt, die Kontakte eines Stromkreises mit größerer Stromstärke; in der Elektronenröhre werden geringe Spannungsänderungen in große Spannungsänderungen verwandelt.

Eine solche Wechselwirkung zwischen zwei Stromkreisen finden wir auch beim Transistor. Wächst der Strom im Emitterkreis, so wird eine größere Anzahl von Löchern in die Basis gedrückt. Infolgedessen dringen mehr Löcher in das rechte p-Gebiet ein, d. h., nimmt der Strom im Emitterkreis zu, so steigt auch der Strom im Kollektorkreis. Nimmt der Emitterstrom ab, so sinkt der Kollektorstrom ebenfalls. Da die Zeitspanne, die die Löcher zum Durchqueren der Basis brauchen, außerordentlich gering ist, folgt der Kollektorstrom jeder Änderung des Emitterstromes unverzüglich. Erst bei hohen Frequenzen, wie sie für viele Aufgaben der Hochfrequenztechnik benutzt werden, macht sich die Laufzeit der Löcher durch die Basis unangenehm bemerkbar.

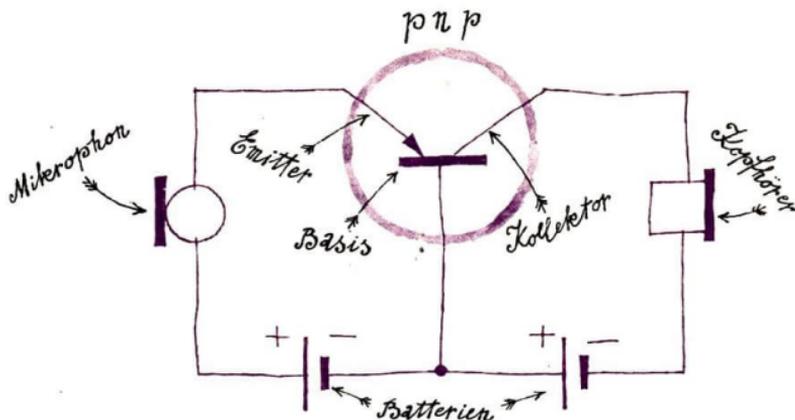
Der Emitterkreis steuert also den Kollektorkreis. Doch wir verlangen nicht nur eine Steuerung, sondern vor allem eine Verstärkung. Betrachten wir Emitter- und Kollektorstrom, so ist von einer Verstärkung nichts zu merken; denn die Stromstärke im Kollektorkreis erreicht nicht einmal die Stärke des Emitterstromes.

Wie sieht es aber mit den Spannungen aus? Wir wissen bereits, daß eine kleine Spannungsschwankung im Emitterkreis ein kräftiges Schwanken des Emitterstromes verursacht, das sich auf den Strom im Kollektorkreis überträgt. Der Kollektorstrom muß aber den Widerstand durchfließen. Dazu wird eine bestimmte Spannung benötigt, ähnlich wie ein gewisser Druckunterschied zwischen dem Ende und dem Anfang eines Rohres herrschen muß, durch das ein kräftiger Luftstrom fließen soll. Diese Spannung läßt sich mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes errechnen. Sie wird um so größer, je höher der Ohmwert des Widerstandes und je stärker der hindurchfließende Strom ist.

Und damit sind wir fast am Ziel: Macht man den Widerstand gehörig groß, gibt man ihm einen Wert von einigen tausend Ohm, so genügt bereits eine kleine Spannungsschwankung im Emitterkreis, um mit Vermittlung des Emitter- und Kollektorstromes am Widerstand eine große Spannungsänderung hervorzurufen. Die Spannungsänderung des Emitterkreises wurde „verstärkt“, die Transistorschaltung arbeitet als Spannungsverstärker.

Für das, was jetzt kommt, erbitten wir die Nachsicht der Leser: Spannungsverstärkerstufen sind für die Halbleitertechnik von so entscheidender Bedeutung und werden so häufig angewandt, daß wir wohl oder übel eine vollständige Transistorverstärkerstufe beschreiben müssen. Mehr noch: Wenn unsere bildliche Darstellung nicht unübersichtlich werden soll, müssen wir uns zur Beschreibung eines Schaltbildes bedienen, wie es in der Elektrotechnik und Elektronik allgemein üblich ist. Sinn solcher Schaltbilder ist es, häufig wiederkehrende Bauelemente nicht in ihrer wirklichen





Gestalt, sondern in Form genormter, international verständlicher Symbole darzustellen. Sie sind für den Elektrofachmann das, was Buchstaben und Formelzeichen für Mathematiker und Chemiker bedeuten.

Wir erkennen, daß der Emitterkreis eine Erweiterung erfahren hat. Zwischen Batterie und Emitter wurde ein Mikrophon geschaltet, z. B. ein Kohlemikrophon, wie es in den meisten Fernsprechern zu finden ist. Wird das Mikrophon besprochen, so ändert sich sein Widerstand im Rhythmus der Sprachschwingungen. Diese Widerstandsänderungen lassen den Emitterstrom, der durch das Mikrophon fließt, im gleichen Rhythmus schwanken. Die Schwankungen des Emitterstromes übertragen sich auf den Kollektorstrom. Das letzte Glied der Kette ist der Kopfhörer im Kollektorkreis. Er setzt dem Strom einen großen Widerstand entgegen. Die Änderungen des Kollektorstromes rufen deshalb am Kopfhörer Spannungsschwankungen hervor, die die Membran hin- und herschwingen lassen. In der Luft vor und hinter der Kopfhörermembran entstehen dadurch wieder Schallwellen. Sie sind, wenn wir von gewissen Verzerrungen einmal absehen, ein getreues Bild der Schallschwingungen, die das Mikrophon trafen. Allerdings stellen sie keine bloße Kopie, sondern eine „Vergrößerung“ dar; denn sie sind dank der verstärkenden Wirkung des Transistors viel kräftiger als die Schallschwingungen, die wir erhielten, wenn wir Mikrophon und Kopfhörer unmittelbar miteinander verbänden. Der Kopfhörer spricht laut an. Reicht die Verstärkung nicht aus, so kann man der ersten eine zweite oder dritte Verstärkerstufe folgen lassen.

Das also wäre, so vereinfacht wie möglich dargestellt, das Prinzip eines Transistorverstärkers. Es ist im Grunde völlig nebensächlich, daß wir die Spannung eines Mikrophons verstärkten. Wir könnten eine beliebige andere Wechselspannung zum Steuern des Transistors benutzen, etwa die Spannung, die eine Antenne an einen Rundfunkempfänger abgibt, die Spannung eines Tonabnehmers

oder auch Spannungsschwankungen, die von einem Fotowiderstand oder einer Fotodiode hervorgerufen werden.

Auf die vielen Schaltungsvarianten, die im Laufe der Zeit entstanden, können wir nicht eingehen. Sie interessieren vor allem den Fachmann.

Die Elektronenröhre kann Wechselspannungen und -ströme nicht nur verstärken, sondern auch erzeugen. In fast allen Sendern wird von dieser Tatsache Gebrauch gemacht. Auch der Transistor ist, in entsprechender Schaltung, ein „Wechselspannungserzeuger“. Damit erschließen sich ihm weitere große Anwendungsgebiete, z. B. der Einsatz in der Sendetechnik, in Meßapparaturen und in der Steuer- und Regeltechnik.

## Wie sie entstehen, was sie leisten

### Gezogen . . .

Als man sich anschickte, die Labormuster der ersten Transistoren in die industrielle Fertigung zu überführen, tauchten solche Schwierigkeiten auf, daß selbst Optimisten manchmal geneigt waren, das „Unternehmen Transistor“ wieder aufzugeben. Die neuartige, komplizierte Technologie, die unerhört scharfen Anforderungen an die Reinheit des Materials und an die Sauberkeit bei seiner Verarbeitung schienen unüberwindliche Hemmnisse zu sein.

Allerdings hatte man keine sehr günstige Startposition. Die Transistortechnik ging nicht vom Flächentransistor, sondern vom Spitzentransistor aus. Dieser ist, wenigstens vom Aufbau her, ein unmittelbarer Nachfahre des Kristalldetektors und der Spitzendiode.

Einem Plättchen aus n-leitendem Germanium sitzen im Abstand von wenigen Hundertstel eines Millimeters zwei feine Spitzen aus Platin- oder Phosphorbronzedraht auf. Sie werden wie bei der Spitzendiode durch einen Stromstoß mit der Basis „verschweift“. Gleichzeitig bilden sich dabei zwei Mulden mit p-Leitung. So entsteht die Folge p-n-p.

Es ist sehr schwer, große Serien von Spitzentransistoren mit annähernd gleichen elektrischen Daten herzustellen; diese Datentreue muß aber vorausgesetzt werden, wenn Bauelemente bei der Massenfertigung von Geräten Verwendung finden sollen. Wegen der kleinflächigen Kontaktstellen kann man einem Spitzentransistor nur geringe Stromstärken zumuten; endlich macht sich in elektronischen Geräten, die mit Spitzentransistoren bestückt sind, oft ein störendes Rauschen bemerkbar.

Deshalb hat der Spitzentransistor nur noch historische Bedeutung, während sich die Transistorproduktion seit Jahren ausschließlich dem Flächentransistor zuwandte. Bereits 1956 waren unter mehr als 160 Transistortypen, die in den USA hergestellt wurden, nur



noch 19 Spitzentransistoren. Inzwischen hat sich auf der Welt das Verhältnis viel weiter zugunsten des Flächentransistors verschoben.

Der Transistor, dessen Schema wir zur Erklärung der Verstärkung benutzen, entspricht einem „gezogenen“ Transistor. Der Name weist darauf hin, daß die Schichtenfolge bereits beim Ziehen des Einkristalls gewonnen wird.

Erinnern wir uns, wie man einen pn-Übergang in einem Einkristall erzielt: Der Germanium- beziehungsweise Siliziumschmelze werden anfänglich fünfwertige Atome zugesetzt; dadurch wird das aus der Schmelze gezogene Einkristallstück n-leitend. Nach einer bestimmten Zeit setzt man so viel dreiwertiges Material zu, daß nicht nur die n-Leitung kompensiert wird, sondern daß darüber hinaus ein Umschlagen in p-Leitfähigkeit erfolgt.

Gibt man, nachdem sich die np-Grenzfläche ein Stückchen von der Schmelze entfernt hat, wiederum im Überschuf fünfwertige Atome zu, so kann man einen nochmaligen Umschlag in n-Germanium herbeiführen. Das ist das Herstellungsprinzip gezogener Transistoren. Wie dick die mittlere Schicht, die Basis des Transistors, ist, hängt von der Ziehgeschwindigkeit und von der Zeitspanne zwischen dem Zusetzen der verschiedenen Impfstoffe ab. Basisdicken von  $50 \mu\text{m}$  und weniger sind üblich.

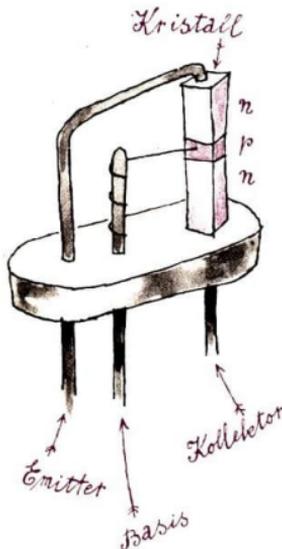
Der gezogene npn-Kristall wird parallel zur Ziehrichtung mehrfach zerteilt. Man erhält dadurch npn-Stücke, deren jedes einen Transistor liefert. Aus technologischen Gründen sind gegenwärtig fast alle gezogenen Transistoren vom npn-Typ.

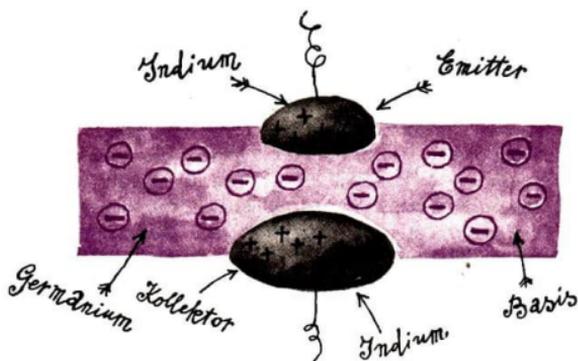
Beim Anbringen der Kontaktstellen für Kollektor, Basis und Emitter bereitet vor allem der Basisanschluß Schwierigkeiten, da die Basis sehr schmal ist und dem Kristall nicht „anzusehen“ ist, wo sie sich befindet. Deshalb überläßt man die Suche nach der Basis meistens automatischen Vorrichtungen. Sie führen einen dünnen Draht über den Kristall und „verschweißen“ ihn selbsttätig mit der Basis, sobald diese aufgespürt wurde.

### ... legiert

Weit häufiger als der gezogene Transistor wird ein anderer Transistortyp hergestellt und benutzt. Es ist der „Legierungstransistor“. Bei seiner Beschreibung kommt uns zugute, daß wir ausführlich über die Herstellung von Germanium- und Siliziumgleichrichtern gesprochen haben; denn die ersten Fertigungsschritte von Halbleitergleichrichtern und Transistoren unterscheiden sich kaum. Alles, was wir über die Gewinnung des Rohmaterials, über seine Reinigung, über das Zonenschmelzen, über das Ziehen von Einkristallen gesagt haben, gilt in vollem Umfange auch für die Transistorfertigung.

Ausgangspunkt unserer Beschreibung sind daher n-leitende Germaniumplättchen, die durch Zerteilen eines Einkristalls erhalten





wurden. Bevor die weitere Verarbeitung beginnt, werden sie auf die vorgeschriebene Stärke geätzt. Die so vorbereiteten Germaniumplättchen sind etwa 0,3 mm stark, ihre Kanten 1 mm bis 5 mm lang. Wir sollten diese Maße ruhig im Gedächtnis behalten; denn nur zu leicht vergiftet man, daß die Halbleitertechnik eine „Technik der kleinen Dimensionen“ ist, in der Pinzette, Lupe und Mikroskop unentbehrliches Handwerkszeug darstellen.

Aus diesen winzigen Plättchen also entstehen Transistoren. Es beginnt damit, daß dem Plättchen die Indium-Emitterpille aufgesetzt wird. Um sie einzulegieren, werden Plättchen und Pille in einem Ofen, der von Schutzgas durchströmt wird, auf eine Temperatur um 700 °C erhitzt. Dabei entsteht um die einlegierte Pille herum eine p-leitende Mulde.

Als nächstes wird die etwas größere Kollektorpille – gleichfalls Indium – aufgesetzt und in einem weiteren Ofen einlegiert. Damit ist die Schichtenfolge p-n-p erreicht.

Die elektrischen Eigenschaften eines Transistors, ja, seine Funktionsfähigkeit hängen weitgehend davon ab, wie der Legierungsvorgang abließ, wie die „Legierungsfronten“, also die Grenzen der p-Mulden, in das Kristallinnere vordringen und wie sie geformt sind. Nur höchste Genauigkeit bei den verschiedenen Arbeitsgängen, exaktes Einhalten der Legierungstemperaturen und der Legierungszeiten führen zu einwandfreien Transistoren.

Das pnp-Element wird mit dem sogenannten Basisblech verlötet. Dieses Blech dient nicht nur als Stromzuführung zur Basis, sondern soll vor allem die im Transistor entstehende Wärme möglichst rasch abführen. Die Anschlüsse für Emitter und Kollektor werden häufig schon während des Legierungsprozesses mit angebracht. Die Materialien für die Anschlüsse muß man so auswählen, daß nicht etwa an der falschen Stelle eine Art Sperrschicht entsteht; der Transistor wäre sonst unbrauchbar.

Für den Einbau des Transistorelements sind verschiedene Verfahren gebräuchlich, je nachdem, ob es durch eine Glas- oder Metallkappe geschützt werden soll. Das Gehäuse muß den Transistor für immer und sicher vor Licht, Feuchtigkeit und Gasen



bewahren. Auf keinen Fall dürfen im Laufe der Zeit „Kriechwege“ entstehen, auf denen Spuren von Wasser, Chemikalien oder feuchter Luft zum Transistor vordringen können.

Die Produktion von Siliziumtransistoren verläuft ähnlich.

Die Herstellung von Transistoren ist vielleicht die „sauberste“ Produktion, die wir auf der Welt kennen. Nur für manche Zweige der pharmazeutischen Industrie, für biologische Forschungsstätten und in Operationssälen gelten ähnlich strenge Forderungen an die Sauberkeit. Ursache dafür sind selbstverständlich die Eigenschaften des Halbleitermaterials. Geringste Verunreinigungen der Kristalloberflächen, mikroskopisch kleine Staubteilchen oder Feuchtigkeitsspuren wirken sich auf die entstehenden Bauelemente aus und können Qualitätsminderungen, Abweichungen von den festgelegten elektrischen Daten oder Ausfälle verursachen. Sogar die Luftfeuchtigkeit schadet den Halbleiterbauelementen. Bei Versuchsreihen stellte es sich heraus, daß Transistoren, die an schwülen Sommertagen hergestellt worden waren, eine viel höhere Fehlerquote aufwiesen als solche, die an Wintertagen bei geringerer Luftfeuchtigkeit montiert worden waren.

Deshalb wird in der Halbleitertechnik an so vielen Stellen des Fertigungsablaufs mit einer Schutzatmosphäre oder in einem „künstlichen Klima“ gearbeitet, deshalb werden die Bauelemente zwischen den Bearbeitungsgängen immer wieder geätzt, mit destilliertem Wasser gespült und in entstaubter Luft getrocknet.

Transistoren werden in abgeschlossenen Schutzkästen montiert, in denen ein von der Außenwelt unabhängiges, genau einzuhaltendes Klima (beziehungsweise eine Schutzatmosphäre) herrscht. Nur mittels einstülpbarer, luftdicht mit den Kästen verbundener Handschuhe kann in ihnen gearbeitet werden.

Da immer wieder Prüfungen und Kontrollmessungen zwischen den Arbeitsgängen vorgenommen werden, kann man fehlerhafte Stücke rechtzeitig erkennen. Abweichungen im technologischen Prozeß werden frühzeitig aufgedeckt, ehe sie größeren Schaden anrichten können.

Fast immer sind die Produktionsräume mit wirksamen Klimaanlagen ausgestattet. Besonders sorgfältig ist man darauf bedacht, die Luft möglichst staubfrei zu halten. Für das Betreten der Räume, für die Pflicht zum Tragen von Schutzkitteln gelten ähnlich „strenge Sitten“ wie für Operationssäle. An die Stelle einfacher Türen treten meistens Eingangsschleusen, die den Staub fernhalten. Saugvorrichtungen, ja sogar Schuhputzmaschinen entstauben jeden Besucher. Bewährt hat es sich, in den Fertigungsräumen für einen geringen, nicht spürbaren und unschädlichen Überdruck zu sorgen. Wird eine Tür geöffnet, so „zieht“ es stets nach draußen; es kann kein Staub in den Raum geweht werden. Daß die Fenster der „kritischen“ Räume nicht zu öffnen sind, versteht sich von selbst. Wände und Fußböden sind mit Kunststoff ausgelegt. Ritzen und Fugen, in denen sich im Laufe der Zeit Staub sammeln könnte,



werden sorgfältig vermieden. Meß- und Kontrollgeräte überwachen ständig die klimatischen Bedingungen im Raum und signalisieren jede Abweichung.

Keine dieser Vorsichtsmaßnahmen ist überflüssig. Zahlreiche Mißerfolge aus den Anfangsjahren der Halbleitertechnik waren darauf zurückzuführen, daß man noch nicht wußte, welche „Saubereitensfanatiker“ Halbleiter sind und wie leicht sie durch Staub, Chemikalien und Feuchtigkeit verdorben werden. Wie empfindlich Transistoren auch gegen Einflüsse sind, die für andere Industriezweige überhaupt keine Bedeutung haben, zeigt ein Bericht der Zeitschrift „Electronics“: Halbleiterbauelemente wurden bereits dadurch zerstört, daß sich der Körper des Montierenden durch Hin- und Herlaufen und Rutschen auf dem Stuhl elektrisch aufgeladen und über den Halbleiter entladen hatte.

Unter diesen Fertigungsbedingungen war zunächst nicht an eine automatisierte Produktion von Transistoren zu denken. Inzwischen werden Halbleiterbauelemente schon vorwiegend auf Taktstraßen produziert; allmählich beginnt die Automatisierung, sich auch in der Halbleitertechnik durchzusetzen.

In der Fachliteratur lesen wir z. B. von einem Automaten, der Flächentransistoren aus vorgefertigten Teilen völlig selbsttätig zusammensetzt. Der Automat enthält unter anderem Legierungsöfen, Vorrichtungen zum Anbringen der Kontakte und eine Schweißeinrichtung zum Verschließen der fertigen Bauelemente. Jeder Transistor wird in einem Hohlzylinder zusammengesetzt, der während des ganzen Fertigungsprozesses als Transportbehälter dient. Nach jedem Arbeitsgang prüft der Automat den entstehenden Transistor. Fehlerhafte Stücke werden sofort ausgeschieden. Wenn ein Transistor den Automaten verläßt, hat er beinahe fünfzig Prüfungen hinter sich.



### Höhere Frequenzen . . .

Als die Elektronenröhre ihren Siegeszug antrat, arbeitete man in der Nachrichten- und Hochfrequenztechnik noch mit verhältnismäßig niedrigen Frequenzen. Sie in Röhren zu verstärken oder zu erzeugen, bereitete kaum Schwierigkeiten. Der Übergang zu höheren Frequenzen, wie sie beispielsweise für Ultrakurzwellenrundfunk und Fernsehen benötigt wurden, vollzog sich Schritt für Schritt mit der Entwicklung neuer Röhren.

Ganz anders war die Situation beim Transistor. Ultrakurzwellen- und Fernsehtechnik gab es bereits. Radargeräte benutzten den Dezimeter- und Zentimeterwellenbereich; Steuer-, Regel- und Rechentechnik wurden „schneller“ und arbeiteten mit immer höheren Frequenzen. Sie zu bewältigen, gelang allerdings mit dem Transistor vorerst noch nicht. So blieben ihm anfänglich zahlreiche Anwendungsgebiete verschlossen.

Ein zweiter Mangel zeigte sich: Die elektrischen Leistungen, die

(Ausschüß!) ↓

ein Transistor steuern oder als Verstärker abgeben konnte, waren im Anfang sehr bescheiden. Sie erreichten nur Bruchteile eines Watt, während man mit Elektronenröhren bereits Leistungen von 300 kW und darüber beherrschte.

Sobald daher die grundsätzlichen Probleme der Herstellung von Halbleiterbauelementen gelöst waren, standen Forschung und Technik vor zwei neuen, wichtigen Aufgaben: Die Frequenz- und Leistungsgrenzen der Transistoren mußten weiter hinausgeschoben werden.

In einer Elektronenröhre werden die Elektronen von elektrischen Kräften „getrieben“ und legen ihren Weg im luftleeren Raum in beinahe unmeßbar kurzer Zeit zurück. Im Transistor dagegen werden die Elektronen und Defektelektronen auf dem entscheidenden Teil ihres Weges nicht beschleunigt. Sie „driften“ durch den Basisraum, prallen häufig auf Atome des Basismaterials und bewegen sich deshalb in unregelmäßigen Zickzackbahnen. Nicht alle Ladungsträger erreichen daher den Kollektor nach der gleichen Laufzeit; Geschwindigkeit und Reisedauer streuen um einen Mittelwert.

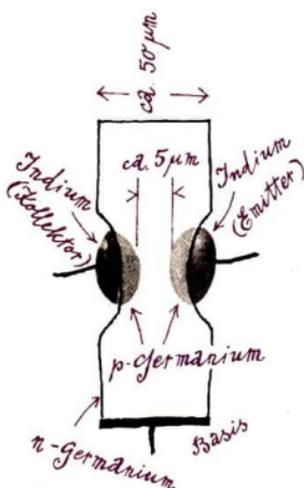
Das stört wenig, solange ein Transistor nur niedrige Frequenzen verarbeiten soll. Ist aber die Frequenz der Wechsellspannung so hoch, daß bereits eine halbe, eine ganze oder mehrere Spannungswellen während der Zeitspanne ablaufen, die Ladungsträger zum Passieren der Basis brauchen, so „hinkt“ der Kollektorkreis nach. Ein Verstärker kann dann nicht mehr einwandfrei arbeiten und versagt bei weiter ansteigenden Frequenzen völlig. Leider ist das schon bei Frequenzen der Fall, wie sie in der Funktechnik üblich sind.

Eine Erklärung dieser Vorgänge müssen wir uns versagen. Ihre Wirkung können wir uns vergleichsweise veranschaulichen, wenn wir uns überlegen, wie unangenehm ein Hahn wäre, der einen Wasser- oder Gasstrom stets erst mit einer Verspätung von einigen Minuten freigäbe oder unterbräche.

Man braucht kein Fachmann zu sein, um ein Mittel angeben zu können, wie sich die „Trägheit“ des Transistors verringern ließe: Die Laufzeit der Elektronen beziehungsweise Löcher durch die Basis ist zu verkürzen.

Je dünner die Basisschicht eines Transistors, desto weniger Zeit ist nötig, sie zu durchlaufen. Man hat sich daher bemüht, durch sorgfältige Führung des technologischen Prozesses die „Mulden“ beim Legierungstransistor einander möglichst nahekommen zu lassen. Trotzdem erreicht man mit solchen Transistoren nur Frequenzen um 10 MHz. Man kann mit ihnen z. B. keine Kurzwellen- und Ultrakurzwellengeräte ausrüsten.

Dem Legierungstransistor nahe verwandt ist der „Randschichttransistor“, der bis in den Frequenzbereich um 200 MHz zu verwenden ist. Seine Basisschicht ist nur 2,5 µm bis 5 µm „dick“. Man erreicht das durch ein ausgeklügeltes Herstellungsverfahren: Auf



ein Plättchen aus n-Germanium werden von beiden Seiten haarfeine Strahlen einer Indiumsalzlösung gerichtet. Strahl und Germanium sind so mit einer elektrischen Spannungsquelle verbunden, daß durch elektrochemische Vorgänge an der Aufschlagstelle der Strahlen Germanium *abgetragen* wird. Es werden dadurch zwei sehr regelmäßig geformte Mulden ausgearbeitet. Haben sie die vorgeschriebene Tiefe erreicht, so werden die Anschlüsse der Spannungsquelle vertauscht. Dadurch wird nunmehr in den Mulden Indium *aufgetragen*. So entsteht die gewünschte Schichtenfolge p-n-p.

Ein Teil der Schwierigkeiten bei höheren Frequenzen rührt daher, daß die Frontseiten der Mulden nicht völlig eben sind. Die Ladungsträger treten nicht nur an der schmalsten Stelle in die Basis ein, sondern auch daneben, wo sie einen weiteren Weg zurückzulegen haben. Beim gezogenen Transistor dagegen wird die Basis durch zwei ebene Flächen begrenzt, deren Abstand überall gleich ist. Infolgedessen arbeiten gezogene Transistoren bis zu Frequenzen um 60 MHz.

Ein Transistor mit großen Zukunftsaussichten ist der Diffusions- transistor. Mit ihm lassen sich sogar Dezimeterwellen verstärken und erzeugen. Um ihn herzustellen, läßt man die Legierungsstoffe in Dampfform auf das Halbleitermaterial einwirken.



Setzt man ein n-leitendes Siliziumplättchen Antimon- und Aluminiumdämpfen aus, so dringen Atome dieser Stoffe in die Kristalloberfläche ein. Sie diffundieren in das n-Material. Dabei ist das Aluminium viel „schneller“ als das Antimon, die Aluminiumatome „überholen“ die Antimonatome. Wird der Diffusionsvorgang nach einer bestimmten Zeit abgebrochen, weist der Kristall drei Schichten auf: In der Tiefe, wohin keine Fremdatome gelangten, bleibt er n-leitend. Dieses Stück ist der Kollektor des entstehenden Transistors. Darüber liegt eine Schicht, in die zahlreiche dreiwertige Aluminiumatome eingebettet sind. Sie ist daher p-leitend und wird später zur Basis des Transistors. Es folgt der Emitter, eine Schicht, deren n-Leitfähigkeit durch die eingedrungenen fünfwertigen Antimonatome verursacht wird.

Das Siliziumplättchen ist also, wenn man es noch mit den nötigen Anschlüssen versieht, zu einem npn-Transistor geworden. Er zeichnet sich durch eine besonders dünne (etwa  $1 \mu\text{m}$  starke), aber gleichmäßige Basisschicht aus. Auf ähnliche Weise gelangt man auch zu pnp-Transistoren und zu Diffusionstransistoren, die Germanium als Ausgangsmaterial benutzen.

Bereits wegen der dünnen Basisschicht ist der Diffusionstransistor bis zu hohen Frequenzen arbeitsfähig. Man kann bei ihm aber einen weiteren Effekt ausnutzen, der die Frequenzgrenze nochmals nach oben verschiebt: Beschleunigt man die Ladungsträger in der Basis eines Transistors durch elektrische Kräfte, so sinkt die Laufzeit gleichfalls. Beschleunigungskräfte treten aber schon dann auf, wenn die Störstellen nicht gleichmäßig in der Basis verteilt sind. Nimmt ihre Dichte zum Kollektor hin ab, so „rollen“ die Ladungsträger in der Basis „bergab“ und erreichen den Kollektor eher als bei gleichmäßiger Verteilung der Störstellen.

Betrachten wir noch einmal die Skizze des Diffusionstransistors, so erkennen wir, daß bei ihm eine solche Störstellenanordnung leicht zu verwirklichen ist; denn selbstverständlich wird die Zahl der eindiffundierten Aluminiumatome um so geringer, je näher man dem Kollektor kommt. Unter bewußter Ausnutzung dieses Effektes gelang es, Frequenzen um 1000 MHz zu erreichen.



### ... größere Leistung

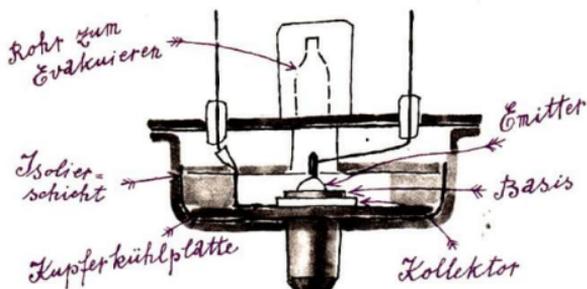
Wenden wir uns der zweiten wichtigen Aufgabe der Transistortechnik zu, der Leistungserhöhung. Die Industrie braucht nicht nur Transistoren, die kleine Spannungen vergrößern, sondern auch Transistoren, die große Leistungen verarbeiten können. Bei der Fertigung solcher „Leistungstransistoren“ treten Schwierigkeiten auf, die noch nicht endgültig überwunden sind.

Die Frage nach der Transistorleistung ist vor allem die Frage danach, wie man mit den beim Betrieb des Transistors auftretenden Temperaturen fertig werden kann. Durch jeden Transistor fließt Strom, und überall, wo Strom fließt, entsteht Wärme. Im Transistor tritt sie vor allem an der in Sperrichtung geschalteten Übergangsstelle Basis-Kollektor auf. Man gibt für jeden Transistor eine bestimmte „Sperrschichttemperatur“ an, die keinesfalls überschritten werden darf. Bereits in der Nähe der Sperrschichttemperatur verändern sich die Eigenschaften des Transistors zusehends.

Diese Veränderungen sind eine Folge der mit der Temperatur wachsenden Eigenleitfähigkeit des Germaniums und Siliziums.

Auch die an der Sperrschicht, d. h. zwischen Kollektor und Basis liegende Spannung wirkt sich aus. Sie darf – wie bei Halbleitertgleichrichtern – einen bestimmten Wert nicht überschreiten, wenn der Transistor nicht zerstört werden soll.

Ein wesentlicher Fortschritt wäre es bereits, wenn Halbleiter-



## Leistungs transistor

materialien zur Verfügung ständen, die hohe Temperaturen vertragen. Man ist ihnen zwar auf der Spur – wir werden an anderer Stelle noch darauf zurückkommen –, doch zur Zeit sind sie noch nicht einsatzreif. So ist man vorerst auf Germanium und Silizium angewiesen, die Arbeitstemperaturen von 70 °C beziehungsweise 125 °C aushalten. Schon diese beiden Zahlen machen verständlich, warum man für „Leistungs transistoren“ Silizium als Material bevorzugt.

Damit ein Leistungs transistor niemals die zulässige Temperaturgrenze überschreitet, muß man ihn kühlen. Man kann z. B. das Transistorelement mit der Kollektorseite auf einen massiven Metallbolzen löten, der mit dem Gerätechassis verbunden wird und die Wärme abführt. Verbreitet ist auch die Methode, die Wärme durch besondere Kühlbleche oder -rippen abzuleiten. Durch geschickte Ausführung der Transistoren läßt sich ebenfalls eine schnellere Wärmeabfuhr erreichen.

Leistungs transistoren stehen bis zu Leistungen um 1 kW zur Verfügung. Doch ist gerade diese Entwicklung noch in vollem Fluß. Zahlenangaben sind meistens bereits überholt, ehe sie sich in der Literatur wiederfinden.

Man setzt Leistungs transistoren ein, die durch ein Gebläse gekühlt werden; man experimentiert auch mit wassergekühlten Leistungs transistoren. Vielleicht wird uns in Kürze die Halbleitertechnik selbst ein sehr wirkungsvolles Kühlverfahren beschermen (siehe S. 173).



## Transistor? Röhre?

### Viele Vorzüge . . .

Der Transistor erblickte in einem kapitalistischen Land das Licht der Welt. Das zeitigte Folgen, die seine Väter wahrscheinlich nicht vorausgesehen hatten. Noch versagten vier von fünf versuchsweise hergestellten Transistoren, da berichteten auf Sensationen erpichte



Reporter ihren Lesern, das letzte Stündlein der Radoröhre habe geschlagen.

„Radoröhre museumsreif!“ „Transistor schlägt Verstärkerröhre!“ „Schon im nächsten Jahr Kristallradios auf dem Markt!“ – Das etwa war der Tenor zahlreicher Artikel in Tageszeitungen und Wochenendausgaben. Die Röhrenfirmen, die durch die Halbleiterforschung ohnehin in Alarmstimmung versetzt worden waren, erwiderten mit ebenso knalligen Schlagzeilen: „Kristallverstärker – Bluff des Jahrhunderts!“ „Transistor nur eine physikalische Kuriosität!“ Hunderttausende von Lesern, die von Halbleitern überhaupt erst auf diese Weise erfuhren, wurden durch den Presserummel verwirrt. Nur langsam wich er sachlicheren und gründlicheren Darstellungen.

Bei uns hat es keine durch Konkurrenzkampf und Profitsucht bedingte Sensationsmache gegeben. Trotzdem ist auch für uns die Frage sehr wichtig, ob und wann Halbleiterbauelemente die Elektronenröhren ablösen werden. Ihre Beantwortung beeinflusst die volkswirtschaftliche Planung, die Freigabe von Investitionsmitteln, das Produktionsprogramm der Röhrenwerke und nicht zuletzt die Ausbildung von Fachleuten. Die Entscheidung „Röhre oder Transistor“ kann daher nur von der technischen und ökonomischen Seite her unter Berücksichtigung der Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten beider Bauelemente beantwortet werden.

Die Abmessungen sind der auffallendste äußere Unterschied zwischen Röhre und Transistor. Zwar sind die Röhren in den vergangenen Jahren immer kleiner geworden, und für Spezialzwecke gibt es Röhren von den Abmessungen einer halben Zigarette; doch die in größeren Serien produzierten, billigen Röhren beanspruchen mindestens zehnmals soviel Raum wie ein für den gleichen Zweck geeigneter Transistor. Wie entscheidend das für viele Anwendungen ist, werden wir im Verlaufe unserer Lektüre immer wieder erfahren.

Zu berücksichtigen ist auch, daß der Transistor noch ein gutes Stück weiter „schrumpfen“ kann. Schon vor drei Jahren wurden für Sonderaufgaben Transistoren von 2,5 mm Durchmesser und 3,4 mm Länge angeboten. Inzwischen ist man bei der Größe eines Stecknadelkopfes angelangt.

Ähnliche Unterschiede wie für die Größen von Röhre und Transistor gelten auch für ihr Gewicht. Transistoren wiegen, abgesehen von den Leistungstransistoren, höchstens wenige Pond, oft weniger als ein Pond, während eine Röhre mindestens zehnmals schwerer ist. Daß Transistoren sehr robust sind und auch heftigen Schüttel- und Stoßbeanspruchungen widerstehen, scheint auf den ersten Blick nicht allzu wichtig. Röhren und Transistoren gibt es jedoch nicht nur in Funkempfängern, die schonend behandelt werden. Tatsächlich sind an vielen Stellen Elektronenröhren nur bedingt einzusetzen, weil es ihnen an mechanischer Widerstandsfähigkeit fehlt. Schon beim Kofferempfänger kann es vorkommen, daß eine Röhre



beschädigt oder zerstört wird, weil das Gerät einen heftigen Stoß erhielt. Wieviel größer ist diese Gefahr bei tragbaren Funkgeräten, bei Funksprechanlagen in Kraftwagen, Traktoren, Kränen oder Panzern! Auch die elektronischen Geräte in Luftfahrzeugen und vor allem in Raketen sind härtesten mechanischen Belastungen ausgesetzt.

Elektronische Geräte fanden nur langsam Eingang in die Steuer- und Regeleinrichtungen der Produktionsbetriebe. Zu einem gewissen Teil hatte man wenig Vertrauen zu den „zerbrechlichen“ Röhren. Es ging dabei nicht nur um die Zerstörung einer Röhre durch Schlag oder Stoß, sondern auch um die fortwährenden Erschütterungen und Vibrationen, denen sie ausgesetzt ist. Sie können dazu führen, daß sich die elektrischen Daten der Röhren ändern und elektronische Geräte versagen.

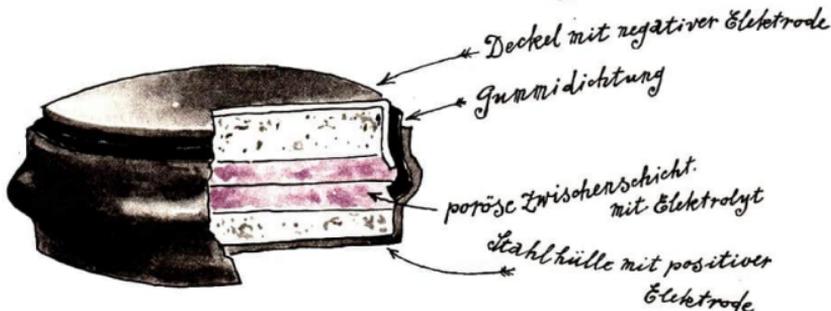
Zwar hat man für die industrielle Elektronik und für das Verkehrswesen stoß- und rüttelfeste Röhren entwickelt, doch der Transistor ist der Röhre in dieser Hinsicht weit überlegen. Man könnte Transistoren mit voller Wucht gegen die Wand werfen oder aus dem fünfzehnten Stockwerk fallen lassen, ohne daß sie zerstört würden. Die Rüttelfestigkeit ist gleichfalls groß; denn ein Transistor enthält keine Teile, die gegeneinander schwingen könnten.

Jede Elektronenröhre braucht zwei Spannungsquellen. Eine liefert den „Heizstrom“ von wenigen Volt Spannung, die andere die „Anodenspannung“, deren Größe je nach Röhren und Gerät etwa zwischen 50 V und 350 V (für Spezialröhren, etwa in Sendern, bei Tausenden von Volt) liegt. Diese Spannungsquellen sind eine unangenehme Beigabe der Röhrentechnik; denn bei zahlreichen elektronischen Geräten war der „Stromversorgungsteil“ fast so groß und schwer wie das eigentliche Gerät.

Ein Transistor benötigt keinen Heizstrom und demzufolge auch keine Heizspannungsquelle. Er begnügt sich mit *einer* Spannungsquelle, die nur kleine Spannungen und eine geringe Stromstärke hergeben muß. Dadurch wird viel Elektroenergie gespart; wir werden an anderer Stelle noch darüber lesen. Statt komplizierter Stromversorgungsgeräte können in vielen Fällen billige Batterien die Speisung „transistorisierter“ Anlagen übernehmen. Auch Span-



*natürliche  
größe*



nungsquellen, die für Röhrengeräte nicht leistungsfähig genug wären, können eingesetzt werden, z. B. Sonnenbatterien oder Thermoelemente. Dies ist, wie zahlreiche Beispiele beweisen, ein großer Vorzug der Transistortechnik.

Daß ein Transistor sparsam mit Elektroenergie umgeht, hat noch eine weitere angenehme Folge. In Röhren wird stets ein nicht unerheblicher Teil der Elektroenergie in Wärme umgesetzt. Schon in Rundfunkgeräten muß man mit Hilfe durchbrochener Rückwände eine Luftzirkulation herbeiführen, damit die Temperatur im Inneren nicht zu sehr ansteigt. In Anlagen, die mit vielen Elektronenröhren bestückt sind, ist es gar nicht einfach, die Wärme abzuführen. Außerdem erschwert die Röhrenwärme das Bestreben, Röhrengeräte weiter zu verkleinern oder staub- und feuchtigkeitsticht abzuschließen.

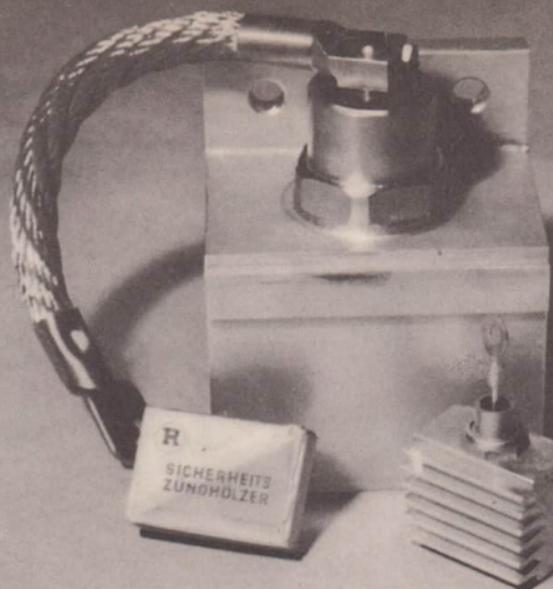
Demgegenüber ist der Wärmeumsatz im Transistor viel geringer. Im allgemeinen sind nur bei Leistungstransistoren besondere Kühlmaßnahmen erforderlich, während man bei Kleingeräten mit der Wärmeabfuhr keine Sorgen hat (schon im nächsten Kapitel wird es allerdings notwendig sein, das „Wärmeproblem“ auch von einer anderen Seite zu beleuchten).

Ein Transistor braucht nicht, wie Röhren, „warm zu werden“. Er ist stets sofort betriebsbereit. Bei vielen Anwendungen ist das äußerlich wichtig.

Fernsprechverstärker, Steuer- und Regelanlagen, Fernmeß-, Kontroll- und Warngeräte müssen ständig betriebsbereit sein, auch wenn sie nur manchmal und nur für kurze Zeit arbeiten, indem sie vielleicht ein Alarmzeichen auslösen oder einen Steuervorgang einleiten. Bestückt man solche Geräte mit Elektronenröhren, so muß man die Röhren ständig geheizt halten. Dabei wird nicht nur unnötig Elektroenergie verbraucht, sondern die Lebensdauer der Röhren sinkt; man muß sie öfter auswechseln. Das ist an sich ebenso widersinnig, als wenn wir den Motor eines Kraftfahrzeuges ständig laufen ließen, nur weil wir ein- oder zweimal täglich eine kurze Wegstrecke fahren wollen. Transistorgeräte hingegen verbrauchen im Bereitschaftszustand nur sehr wenig Energie.

Als die ersten Transistoren ihre praktische Brauchbarkeit erwiesen hatten, stellte man ihrer Lebensdauer sehr optimistische Prognosen. Das ist erklärlich; denn im Transistor gibt es keine Teile, die sich verschleifen oder erschöpfen. Während man einer Verstärkerröhre eine Lebensdauer von wenigen tausend Arbeitsstunden zubilligt, sprach man beim Transistor von hundert Jahren und mehr. Später wurde eine Korrektur dieser Zahlen notwendig. Es zeigte sich, daß es vor allem an der Oberfläche eines Transistors zu physikalisch-chemischen Erscheinungen kommt, die die Lebensdauer herabsetzen. Diesen Vorgängen, die noch nicht restlos geklärt sind, gilt gegenwärtig die besondere Aufmerksamkeit der Halbleiterforschung.

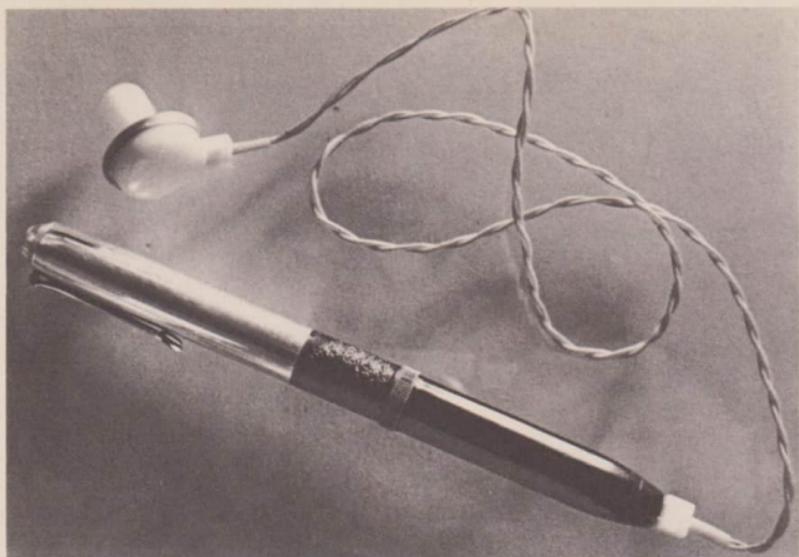




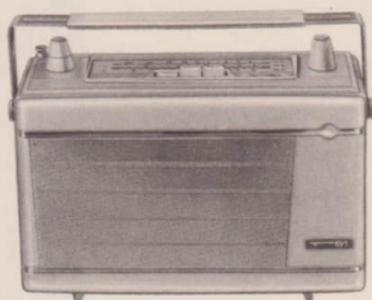
Ein 100-A-Gleichrichter für Elektroloks und die Elektrochemie und ein 10-A-Gleichrichter



Montierter Transistor (vergrößert)



Kleinstempfänger in einem Füllfederhalter mit Speisebatterie und Antenne



Transistoren-Empfänger für Urlaub und Heim



Wechselsprechanlagen erleichtern die Arbeit

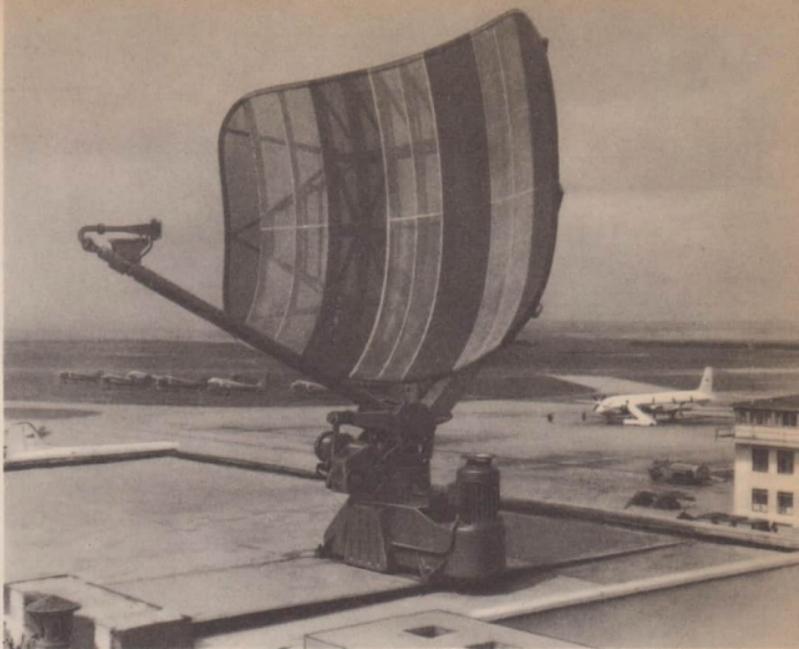
Türsprechanlage · Auch in Wohnstätten finden wir Halbleiter





Halbleiter prägen wesentliche Züge der Technik von heute; für die Technik von morgen werden sie von entscheidender Bedeutung sein





Radar-„Stellwerk“ eines Flughafens

Links Rundstrahlradar; rechts Präzisions-Landeanflug-Radar





Kleinstfunkgerät im Einsatz. Mit seiner Hilfe werden Krane und Bagger dirigiert

Drahtlose Personenrufanlage





Sprechfunk auf der Warnow-Werft



Radar ertappt Verkehrssünder

Erprobung eines Radargerätes durch die Verkehrspolizei



Wenn die Ursachen der „Oberflächeneffekte“ erst einmal bekannt sein werden, wird man ihnen auch beikommen können. Die Lebensdauerangabe „praktisch unbegrenzt“ dürfte dann nicht mehr übertrieben sein. Sehen wir von den für Spezialaufgaben geschaffenen „Langlebensdauerrohren“ ab, übertrifft die Lebensdauer des Transistors die der Röhre schon heute um ein Vielfaches. Häufig „leben“ Transistoren länger als die übrigen Bauelemente, mit denen sie in einem elektronischen Gerät vereint sind.

### ... aber auch Mängel

Wer bis hierher gelesen hat, könnte fast meinen, die Reporter hätten mit ihren ersten Berichten vom Transistor gar nicht so sehr übertrieben. Die Vorteile gegenüber der Elektronenröhre sind überzeugend. Unwillkürlich fragt man sich, wie es zu erklären ist, daß gegenwärtig auf der Welt jährlich zwar mehrere Milliarden Röhren, aber noch nicht einmal eine Milliarde Transistoren produziert werden.

Halbleiterwerke können nicht über Nacht aufgebaut werden. Im kapitalistischen Teil der Welt sind außerdem beim Einsatz der neuesten Technik vor allem Profitinteressen und kaum das Bedürfnis und der technische Nutzen für das Wechselspiel Transistor-Röhre maßgebend. Aber müßten dann nicht wenigstens im sozialistischen Teil der Welt – trotz der für Entwicklung und Ausbau der Halbleitertechnik notwendigen Zeit – schon viel mehr Röhren durch Transistoren verdrängt worden sein?

Das Zahlenverhältnis Röhre-Transistor sähe sicherlich ganz anders aus, wenn nicht auch dem Transistor noch Mängel anhafteten, die die Existenz der Elektronenröhre heute und wahrscheinlich auch in nächster Zukunft sichern.

Als Vorzug des Transistors haben wir herausgestellt, daß er nur wenig Wärme entwickelt. Das ist ein Glück, denn sonst wäre es um den Einsatz von Transistoren wahrscheinlich schlecht bestellt. Damit wären wir wieder beim Wärmeproblem. Transistoren sind, wie alle Halbleiterbauelemente, temperaturempfindlich. Ihre Eigenschaften und Betriebsdaten ändern sich bereits, wenn die Temperatur um wenige Grade schwankt.

Es ist dabei gleichgültig, ob die Temperaturänderungen durch die im Transistor frei werdende Wärme hervorgerufen werden oder ob der Transistor durch äußere Einflüsse erwärmt wird. Der Transistor ist schon gefährdet, wenn man ihn in der Nähe „heißer“ Bauelemente montiert. Er kann zerstört werden, wenn er beim Einlöten in die Schaltung überhitzt wird oder wenn er prallem Sonnenlicht ausgesetzt ist.

Für jeden Transistor ist also ein bestimmter, eng begrenzter Temperaturbereich vorgeschrieben. Kleine Temperaturschwankungen, die sich nicht vermeiden lassen, müssen durch besondere Schaltungskunstgriffe abgefangen werden.

Die Elektronenröhre ist längst nicht so temperaturempfindlich. Ihre Eigenerwärmung und ihre Umgebungstemperatur können in einem weiten Bereich schwanken, ohne daß sich die Eigenschaften der Röhre merklich verändern.

Leistungsmäßig ist die Röhre dem Transistor gleichfalls noch weit überlegen. Für die Höchstleistungen von Röhre und Transistor können wir gegenwärtig ein Verhältnis von ungefähr 1 : 1000 ansetzen. Der Transistor scheidet daher vorerst für alle Anwendungen noch aus, bei denen große Leistungen verstärkt oder erzeugt werden sollen. In leistungsstarken Sendern und bei der Hochfrequenzbehandlung von Werkstoffen ist man noch ausschließlich auf Elektronenröhren angewiesen.

Besonders deutlich werden die Leistungsunterschiede bei hohen Frequenzen. Mit Elektronenröhren lassen sich Funkwellen von den niedrigsten bis zu den höchsten Frequenzen verstärken und erzeugen. Bis hinab zu den Dezimeterwellen arbeiten Röhren, die sich von den üblichen Empfängerröhren nur durch die technische Ausführung unterscheiden. Für Dezimeter-, Zentimeter- und Millimeterwellen gibt es Spezialröhren, von denen wir nur das in der Radartechnik verbreitete Magnetron nennen wollen. Auch diese Röhren sind noch für Leistungen von vielen Kilowatt zu gebrauchen.

Beim Transistor war allein schon das Vordringen zu immer höheren Frequenzen mit großen Schwierigkeiten verknüpft. An leistungsstarke Höchstfrequenztransistoren war zunächst überhaupt nicht zu denken.

Das hat sich bis heute kaum geändert. Zwar kennt man Transistoren, die noch im Dezimeterwellenbereich funktionieren; Ausführungen, die bei noch höheren Frequenzen arbeitsfähig sind, befinden sich in der Entwicklung und Erprobung. Die Leistungen aber, die man mit solchen Transistoren beherrscht, sind noch sehr gering und erreichen häufig nicht einmal ein tausendstel Watt.

Die Halbleitertechnik befindet sich hier in einer Zwickmühle. Vergrößert man die Leistung von Transistoren, so sinkt ihre Frequenzgrenze; dringt man zu höheren Frequenzen vor, so nimmt die Transistorleistung ab. Deswegen gibt es zur Zeit nur Höchstfrequenztransistoren für sehr geringe Leistungen und Leistungstransistoren für niedrige Frequenzen. Die Frequenzgrenzen, die dem Transistor vorläufig gesetzt sind, stellen einen seiner schwerwiegendsten Mängel dar; denn in der Nachrichtentechnik geht man zu immer höheren Frequenzen über.

Wägen wir die Vorteile und Nachteile des Transistors sorgfältig gegeneinander ab, so erkennen wir, daß ein „Streit“ Transistor gegen Röhre sinnlos wäre. Jedes der beiden Bauelemente hat spezifische Eigenschaften und Merkmale; ein einfacher Austausch ist oft gar nicht möglich.

Es gibt Anwendungsgebiete, auf denen der Transistor der Röhre eindeutig überlegen ist. Das gilt, um einmal grob abzugrenzen,

überall da, wo Geräte klein, leicht, energiesparsam, langlebig und robust sein müssen.

Wir kennen ebenso Anwendungsgebiete, in denen wir gegenwärtig und wahrscheinlich auch in den kommenden Jahren der Röhre den Vortritt lassen müssen. Dazu zählt das Gebiet der Höchsthochfrequenzen, vertreten durch Radartechnik, Dezimeter- und Zentimeterwellensendeteknik; dazu rechnen auch jene Anwendungen, bei denen es um große und größte Leistungen geht. Dazu zählen Rundfunk- und Fernsehsender sowie Hochfrequenzanlagen der Industrie und Medizin.

Schließlich gibt es noch einen schmalen Grenzstreifen, in dem die Vorzüge und Mängel von Transistor und Röhre einander die Waage halten.

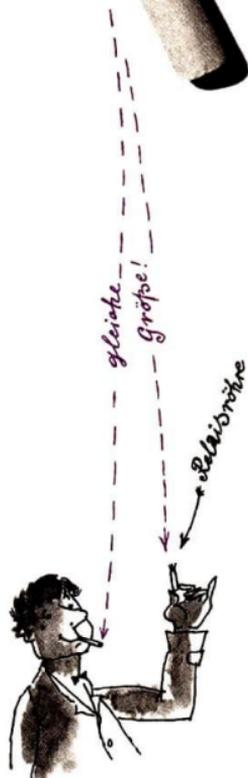
Die Röhrentechnik benötigte mehr als fünfzig Jahre, bis sie sich auf ihren heutigen Stand entwickelte. Die Halbleitertechnik dagegen ist jung; wir dürfen nicht vergessen, daß der erste Transistor vor fünfzehn Jahren zu arbeiten begann. Trotzdem haben die Halbleiterbauelemente bereits ein großes Stück des Vorsprunges aufgeholt, den die Röhren ursprünglich innehatten. Die Tatsachen beweisen, daß ihr Entwicklungstempo nicht nachläßt; eher beschleunigt es sich noch.

Zweifellos werden die noch vorhandenen Mängel der Transistoren eines Tages vergessen sein. Sie sind weniger prinzipieller Natur, sondern rühren vor allem von Lücken unserer Erkenntnisse und von technologischen Schwierigkeiten her. Forschung und Technik werden die Lücken füllen und die Schwierigkeiten meistern. Ob dies in drei, fünf oder zehn Jahren der Fall sein wird, kann heute noch niemand mit Bestimmtheit sagen.

### Die Röhre wehrt sich

Die Erfindung des Transistors hatte die Mängel der Verstärkeröhre besonders deutlich hervortreten lassen. Zwar war man ständig um eine Verbesserung der Elektronenröhre bemüht; doch vor der Erfindung des Transistors konnte man sich Zeit lassen. Es existierte kein Bauelement, das der Verstärkeröhre hätte „gefährlich“ werden können. Das Auftauchen der Halbleiterbauelemente war den Röhrenspezialisten Anlaß, etwas mehr „aufzudrehen“.

Für die industrielle Elektronik und für die Fernsprech- und Rechen-technik wurden die „Relaisröhren“ geschaffen. Ihr Glaskolben ist mit verdünntem Gas gefüllt, dessen elektrisch geladene Atome maßgebend an den Vorgängen in der Röhre beteiligt sind. Relaisröhren brauchen keinen Heizstrom und enthalten eine Katode, die auch in kaltem Zustand Elektronen abgeben kann, wenn die Röhre durch eine elektrische Spannung „gezündet“ wird. Der Stromverbrauch einer Relaisröhre ist sehr niedrig, und, was das Wichtigste ist, sie ist jederzeit betriebsbereit. Ihre Lebensdauer ist so groß, ihre Abmessungen sind so gering, daß man sie ohne Steckfassung



einfach in elektronische Geräte einlöten kann. Für Verstärker sind Relaisröhren jedoch nicht zu verwenden.

Bei den Verstärkerröhren versuchte man auf andere Weise, sich den Eigenschaften des Transistors zu nähern. Es entstanden Röhren, die eine Anodenspannung von nur 12 V benötigen. Da auch die Heizspannung 12 V beträgt, kann man Anoden- und Heizstrom aus einer Batterie beziehen. Das ist oft eine wesentliche Vereinfachung, z. B. für Empfänger in Kraftfahrzeugen. Sie benötigen keinen besonderen Stromversorgungsteil mehr, sondern werden unmittelbar aus der Wagenbatterie gespeist.

Die Glaskolben zahlreicher Verstärkerröhren enthalten zwei Röhrensysteme. Man versucht, mit dem Transistor Schritt zu halten, indem man diesen Weg des „Verdichtens“ weiterverfolgt. Die sogenannten Compactrons schließen drei oder vier eng zusammengedrückte Röhrensysteme ein. Sie kommen mit sehr geringem Heizstrom aus. Strom- und Raumeinsparung sind beträchtlich. Die in kleineren Radioempfängern benötigten fünf oder sechs Röhren lassen sich beispielsweise durch nur zwei Compactrons ersetzen.

Der Name eines weiteren Röhrentyps, des „Nuvistors“, entstand aus *nueva vista*; das bedeutet „neue Aussicht“. Ob der Nuvistor der Röhrentechnik wirklich auf die Dauer ganz neuartige Möglichkeiten eröffnen wird, bleibt vorerst abzuwarten. Jedenfalls steht fest, daß der Nuvistor in vielen Eigenschaften fast an den Transistor heranreicht und ihn in einigen Punkten sogar übertrifft.



Eine Nuvistorröhre ist kleiner als ein Fingerhut. Sie ist damit nur wenig größer als ein Transistor vergleichbarer elektrischer Daten. Der Nuvistor beansprucht nur  $\frac{1}{15}$  des Raums einer normalen Radioröhre gleicher Leistung. Sein Energieverbrauch ist viel geringer als der von Verstärkerröhren.

Wie der Transistor zeichnet sich der Nuvistor durch lange Lebensdauer und hohe Stoß- und Rüttelfestigkeit aus. Gegenüber dem Transistor ist er vor allem noch bis in den Dezimeterwellenbereich hinein zu verwenden, und er bleibt im Temperaturbereich zwischen  $-200^{\circ}\text{C}$  und  $+350^{\circ}\text{C}$  betriebsfähig.

Der Nuvistor verdankt seine guten Eigenschaften in erster Linie einem Aufbau, der von dem herkömmlicher Elektronenröhren stark abweicht. Dieser Aufbau bringt noch einen weiteren, nicht minder wichtigen Vorteil mit sich: Nuvistoren lassen sich ohne allzu kostspielige Anlagen völlig automatisch herstellen.

Nuvistorröhren werden seit drei Jahren produziert und in Nachrichtengeräten, Steuer-, Regel- und Rechenanlagen verwendet. Vielleicht werden sich Röhren- und Transistortechnik eines Tages sogar auf manchen Gebieten zusammenfinden. Man experimentiert zur Zeit mit Bauelementen, die eine Zwischenstellung zwischen Röhre und Transistor einnehmen und Vorteile von Transistor und Röhre miteinander vereinen. Sie sind ähnlich wie eine Verstärker- röhre aufgebaut; doch tritt an die Stelle der geheizten Katode ein stecknadelkopfgroßer Kristall aus Siliziumkarbid, der unter bestimmten Voraussetzungen Elektronen aussendet. Die Silizium- karbidkatode braucht nicht vorgeheizt zu werden; das Bauelement ist stets und ohne Verzögerung betriebsbereit. Wärmeentwicklung und Stromverbrauch sind sehr gering. Infolgedessen kann man diese neuartigen Bauelemente – sie haben noch nicht einmal einen endgültigen Namen bekommen – auf sehr kleinem Raum zusammen- drängen.

### Unser Weg

Die neuen Röhrenarten zeigen, daß der Wettbewerb Röhre- Tran- sistor weitergeht. Deshalb ist man vorsichtig und zurückhaltend mit Prognosen, wann die Produktionszahlen der Halbleiterbau- elemente die der Röhren überholen werden. Die meisten Angaben sprechen davon, daß Röhren- und Halbleiterproduktion einander zwischen 1965 und 1970 die Waage halten werden. Man nimmt weiter an, daß nach 1980 unter den gleichrichtenden und verstär- kenden Bauteilen der Elektronik 90% Halbleiterbauelemente und nur noch 10% Röhren sein werden.

Im kapitalistischen Teil der Welt ist heute sogar schon innerhalb des „Halbleiterlagers“ ein harter Konkurrenzkampf zu beobachten. Besonders scharf wird er seit einigen Jahren zwischen amerika- nischen und japanischen Firmen geführt. Es ist aber auch zu ärger- lich! Da produzieren doch diese Japaner, denen man jahrelang Transistoren und Dioden verkauft hatte, auf einmal selbst Halb- leiterbauelemente! Die japanischen Transistoren sind gut und vor allem auch billig; denn die Arbeiterinnen, die sie montieren, haben nicht nur geschickte Finger, sondern auch erbärmlich niedrige Löhne (sie liegen, wie ein Sprecher vor einem Kongreßausschuß in Washington erklärte, teilweise um 80% unter den entsprechenden amerikanischen Löhnen).

Die japanische Halbleiterproduktion steigt sprunghaft an. Erst sind es einige tausend Transistoren, die in jeder Woche auf den Markt kommen, wenig später schon Hunderttausende; 1961 aber werden Woche um Woche vier Millionen Transistoren in Japan produziert, und von Monat zu Monat wächst die Zahl der in den USA, in Eng- land und in anderen kapitalistischen Ländern verkauften Geräte, die mit Transistoren japanischer Herkunft bestückt sind.

Das kann sich kein amerikanischer oder englischer Halbleiterpro-

duzent gefallen lassen! Man fordert Einfuhrverbote, bestürmt die Regierungen um Schutzzölle, appelliert an den „Nationalstolz“ der eigenen Landsleute, die sich nicht „schämen“, ausländische Halbleiterbauelemente zu kaufen und zu verwenden. Man „bedauert“ sogar die ausgebeuteten japanischen Werk tätigen und versucht zu gleicher Zeit, in Japan eigene Zweigwerke zu gründen, um gleichfalls Nutzen aus den niedrigen japanischen Löhnen zu ziehen.

Auch auf andere Weise sind die Halbleiterfirmen bemüht, einander das Wasser abzugraben: Nach fünfzehn Jahren Halbleitertechnik werden auf der Welt weit mehr als 2000 verschiedene Transistortypen und über 6000 Diodentypen angeboten. Davon entfallen mehr als 90% auf die kapitalistischen Länder.

Die Frage, ob man so viele Typen wirklich braucht, ist mit einem glatten „Nein“ zu beantworten. Wir finden unter den 2000 Transistoren und 6000 Dioden zahlreiche Typen, die sich in ihren elektrischen Daten und Eigenschaften nur unwesentlich oder überhaupt nicht unterscheiden. Würde man die Zahl der Halbleiterbauelemente verringern und die Typen standardisieren, so würden Entwurf, Bau und Reparatur elektronischer Geräte um vieles einfacher werden. Könnten sich die Firmen über ihr Produktionsprogramm einigen, ließe sich der Preis der Bauelemente wegen der großen Serien erheblich senken. Viele Millionen Menschen, alle „Verbraucher“ von Halbleiterbauelementen, hätten davon Nutzen. Doch gerade das ist für die kapitalistische Wirtschaft „untragbar“; denn wenn ihre Vertreter von Nutzen sprechen, meinen sie Profit für wenige.

Sehen wir uns nun in unserer sozialistischen Welt um. Mancher Leser wird fragen, ob es nicht am zweckmäßigsten gewesen wäre, erst einmal abzuwarten, bis die Halbleitertechnik ihre Kinderkrankheiten hinter sich hat. Schärfere formuliert: Brauchen wir schon heute unbedingt Halbleiterbauelemente? Können wir es uns leisten, sowohl die Röhren- als auch die Halbleitertechnik gleichzeitig voranzutreiben?

Die Werk tätigen aller sozialistischen Länder ringen um die Erhöhung der Arbeitsproduktivität. Sie wollen schneller, besser und mit höherem Nutzeffekt produzieren. Voraussetzung dafür ist, daß die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse, die jüngsten technischen Errungenschaften schnell in der Produktion angewendet werden. Die Halbleiter sind ein Teil dieser jüngsten Technik – und einer ihrer wichtigsten dazu. Warum Halbleiter heute bereits für uns unentbehrlich sind, werden uns die folgenden Kapitel im einzelnen immer wieder vor Augen führen.

Wir haben den langen Weg verfolgt, der vom Rohstoff bis zum fertigen Halbleiterbauelement zurückzulegen ist. Wir könnten ihn mit den Worten charakterisieren: gründliches Nachdenken, hoher Arbeitsaufwand, wenig Material. Transistoren wiegen einige Pond, aber sie erfordern mehr Arbeit als manches tonnenschwere Werkstück. An der „Konstruktion“ eines Transistors sind mehr qualifiz-

zierte Fachkräfte beteiligt als an der Konstruktion mancher millionenfach größeren Anlage. Unsere Republik ist nicht reich an Rohstoffen, aber sie verfügt über leistungsfähige Forschungs- und Produktionsstätten und über qualifizierte Wissenschaftler, Techniker und Facharbeiter. Deshalb ist die intelligenz- und lohnintensive Halbleitertechnik für uns besonders wichtig. Bei der Entwicklung und Fertigung von Halbleiterbauelementen können wir einen wertvollen, unseren Möglichkeiten angemessenen Beitrag zur wirtschaftlichen Zusammenarbeit der sozialistischen Länder leisten.

In der Deutschen Demokratischen Republik begann man im Jahre 1953, sich intensiv mit Halbleitern zu beschäftigen. Es war kein leichtes Beginnen. In den theoretischen Grundlagen klappten weite Lücken; es fehlte an Erfahrungen, mit denen man sie notdürftig hätte überbrücken können. Technologische Verfahren für die Gewinnung und Reinigung von Germanium, Silizium, Indium, Selen und anderen Halbleitermaterialien mußten entwickelt und erprobt werden. Später baute ein volkseigenes Sondermaschinenwerk Legierungsöfen, Ziehapparaturen für Einkristalle und andere Einrichtungen für die Halbleiterfertigung.

Um die Forschung und Entwicklung schneller voranzubringen, wurde bei Berlin ein Institut geschaffen, das sich ausschließlich mit Fragen der Halbleiterforschung und -technik befaßt.

Die Herstellung von Halbleiterbauelementen unterscheidet sich so grundsätzlich von der Produktion anderer Bauelemente der Elektrotechnik und Elektronik, daß man sie nicht „nebenbei“ in einem eigentlich für andere Aufgaben bestimmten Werk vornehmen kann. Deshalb entschloß sich unsere Regierung, in Frankfurt (Oder) ein großes Halbleiterwerk aufbauen zu lassen. Ein kühnes Unternehmen! Man konnte an keine Tradition, an keine Erfahrungen anknüpfen, und es gab noch kaum Vorbilder auf der Welt, von denen man hätte lernen können.

Sechsendreißig Menschen begannen im Jahre 1958 in einer ehemaligen Berufsschule mit der Produktion von Halbleitern; zur Zeit zählt das Halbleiterwerk in Frankfurt (Oder) an die 2000 Beschäftigte. Allein die Produktion von Transistoren soll im Jahre 1963 bei 6 Millionen Stück liegen. Sie wird in der nächsten Zeit weiter steigen, während das Werk Schritt für Schritt nach den neuesten Erkenntnissen ausgebaut wird.

Und die Arbeitskräfte? Wo sollten Facharbeiter für einen Produktionszweig herkommen, an den zehn Jahre vorher überhaupt noch niemand gedacht hatte? Es blieb nichts anderes übrig, als einen neuen Weg zu beschreiten: Man bildete die notwendigen Fachkräfte selbst aus. Menschen aus vielen anderen Berufen – vor allem Mädchen und Frauen – lernten die Halbleitertechnik kennen, während sie selbst schon Halbleiterbauelemente produzierten. In den nächsten Jahren wird eine eigene Betriebsberufsschule dem Facharbeiternachwuchs die notwendigen Kenntnisse und Fertigkeiten vermitteln.



Auch in den anderen sozialistischen Ländern wird die Halbleitertechnik nicht gefördert, um die Röhre „auszustechen“, sondern um den Technikern möglichst bald Halbleiterbauelemente in genügender Menge in die Hände zu geben.

Von vornherein stimmt man die zu entwickelnden Typen in der Weise aufeinander ab, daß ihre Zahl so klein wie möglich bleibt, aber so groß wie notwendig ist. Die Sowjetunion verfügt bereits über ein ausgewogenes Sortiment an Transistoren, das für die meisten Anforderungen der Praxis ausreicht. Es wird ständig durch Neuentwicklungen ergänzt, während veraltete Typen allmählich ausgeschieden werden.

## HALBLEITER IN AKTION

### Hinter Lautsprecher und Bildschirm

#### Die Kleinen . . .

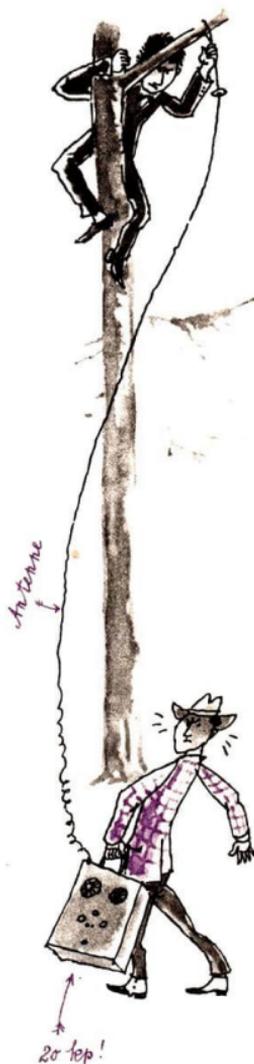
Bereits 1926 konnte man Kofferempfänger kaufen. Ihr Name war damals nur zu berechtigt; die ersten der „praktischen, leicht transportablen Empfänger“ – so schrieb man in Prospekten – wogen um 20 kp und waren fast so groß wie ein Nachtschränkchen. Die Betriebsstunde kostete rund einen Fünfinger, und wer im Freien Radio hören wollte, mußte erst auf einen möglichst hohen Baum klettern und die Antenne befestigen.

Hauptsächlich machten Akkumulator und „Anodenbatterie“ die Geräte schwer und unhandlich. Beide Spannungsquellen waren nötig; die eine, um die Röhren mit Heizstrom zu versorgen, die andere, um die „Anodenspannung“ von 90 oder 100 V bereitzustellen.

Die Techniker mühten sich redlich, die Mängel der Kofferempfänger zu beseitigen: Es wurden Spezialakkumulatoren und -batterien entwickelt, die viel leichter und kleiner waren als ihre Vorgänger. Man schuf Röhren, die mit einer sehr niedrigen Anodenspannung und daher mit leichten Anodenbatterien auskamen, und Röhren mit geringem Heizstrombedarf, damit sie aus den üblichen Trockenbatterien zu versorgen waren. Um Betriebskosten zu sparen, konstruierte man die Empfänger so, daß sie auch an eine Steckdose oder an die Kraftwagenbatterie angeschlossen werden konnten.

Gleichzeitig stiegen die Leistungen der Kofferempfänger. Mehrere Wellenbereiche, eine eingebaute oder ausziehbare Antenne wurden zur Selbstverständlichkeit. Nach dem zweiten Weltkrieg wurde ein reiches, vielleicht überreiches Sortiment an Kofferempfängern angeboten. „Spatz“, „Trabant“, „Ilona“ und wie die Koffergeräte alle heißen, haben vielen Tausenden auf Reisen, auf Zeltplätzen, im Boot und am Strand Freude, Entspannung, manchmal auch eine unerwünscht laute Geräuschkulisse gebracht.

Trotz allem war man mit dem Erreichten noch nicht zufrieden. Noch kleiner, noch leichter, noch sparsamer sollten die Empfänger werden. Die Techniker mußten sich eingestehen, daß diese Forderungen mit Röhren nicht zu erfüllen waren. Aber es gab ja inzwischen den Transistor, der auf die Bedingungen „klein, leicht, sparsam“ wie zugeschnitten ist. So stürzte sich die Rundfunkindustrie



aller Länder auf den Transistor-Kofferempfänger, während man in Heimempfängern nach wie vor Röhren einsetzte.

Die Röhren verschwanden jedoch nicht über Nacht aus den Kofferempfängern. Transistoren konnten im Empfänger zunächst nur die Röhren ersetzen, die verhältnismäßig niedrige Frequenzen, sogenannte Tonfrequenzen, zu verstärken hatten; für eine Hochfrequenzverstärkung war der Transistor noch nicht geeignet. Sollte man warten, bis es Hochfrequenztransistoren gab? Man entschloß sich zu einer Übergangslösung: für den Empfänger mit „gemischter“ Bestückung.

In einem Rundfunkempfänger sind gerade die Röhren die größten Stromverbraucher, die „Tonfrequenzen“ verarbeiten. Vor allem die Lautsprecherröhre ist ein arger „Energiefresser“. Ersetzt man diese Röhren durch Transistoren, so lassen sich Betriebskosten und Gewicht eines Koffergerätes bereits erheblich senken.

Allerdings brauchten die ersten Empfänger mit gemischter Bestückung noch immer zwei Spannungsquellen; denn ihre Röhren waren nach wie vor mit Heizstrom und verhältnismäßig hoher Anodenspannung zu versorgen. Die Halbleitertechnik zeigte auch hier einen Ausweg: Man vertauschte die Anodenbatterie mit einem „Transverter“.

Ein Transverter besteht im wesentlichen aus einem Transistor und einem kleinen Transformator und verwandelt die niedere Gleichspannung des Heizakkumulators in eine weit höhere Gleichspannung. Das Ergebnis ist: Auch ohne Anodenbatterie steht eine ausreichend hohe Anodenspannung für die Röhren zur Verfügung.

Transverter arbeiten billig, geräuschlos und besitzen keine Teile, die sich im Betrieb abnutzen. Sie werden daher nicht nur in Kofferempfängern zur „Gleichspannungswandlung“ herangezogen, sondern auch in Meßgeräten, Strahlendosismessern, Elektronenblitzern usw.

Ein Kofferempfänger mit gemischter Bestückung und Transverter ist beispielsweise das Gerät „Stern 1“ aus unserer volkseigenen Radioindustrie. Es enthält zwei Röhren und fünf Transistoren. Einzige Spannungsquelle für den Betrieb im Freien ist ein Nickel-Kadmium-Akkumulator; er speist den Transverter, die Röhren und die Transistoren. Für den Heimbetrieb kann der Empfänger an die Steckdose angeschlossen werden.

Der Akkumulator speichert Energie für etwa zehn Empfangsstunden; anschließend muß er wieder geladen werden. Dazu ist weiter nichts nötig, als den Empfänger an eine Steckdose anzuschließen und eine Taste zu drücken.

Mit dem Aufkommen von Hochfrequenztransistoren verschwanden die Geräte mit gemischter Bestückung. Ihren Platz nahmen Empfänger ein, die nur noch mit Transistoren ausgestattet waren. Bereits „Stern 2“ ist ein „volltransistorisiertes“ Gerät. Spannungsquelle seiner sieben Transistoren sind fünf hintereinandergeschaltete „Monozellen“ für Stabtaschenlampen. Sie liefern Strom für



150 bis 200 Betriebsstunden, so daß die Stunde nicht einmal mehr 2 Pfennig kostet. Im Empfänger aber konnten nicht nur Akkumulator, Ladevorrichtung und Transverter wegfallen; man durfte auch auf die Möglichkeit zum Netzanschluß verzichten, da ein Netzanschlußteil mit seinen zahlreichen Bauelementen sich bei dem geringen Stromverbrauch des Transistorgerätes kaum noch bezahlt macht.

Bei allen anderen Kofferempfängern verlief die Entwicklung ähnlich. Sie weist überall auf der Welt noch ein gemeinsames Merkmal auf: Bei Röhrengeräten fragte man vor allem nach Größe, Gewicht und Betriebskosten. Heute, da es diese Sorgen kaum noch gibt, verlangt man auch von Koffergeräten einen guten Teil des Komforts, der für Heimgeräte schon lange selbstverständlich ist. Drei oder vier Wellenbereiche, gute Tonwiedergabe, Drucktastenbedienung und Klangregelung haben auch in die Kofferempfänger Einzug gehalten. Ansprechende, farbenfrohe Gehäuse gehören mit dazu. Viele Geräte, z. B. „Stern 4“, können im Kraftwagen in eine besondere Halterung eingeschoben, aus der Wagenbatterie gespeist und an die Kraftwagenantenne angeschlossen werden. Es gibt Empfänger in tropenfester und arktischerer Ausführung sowie Koffergeräte, die speziell für Übersee-Empfang ausgelegt wurden.

### Die Kleinsten . . .

Ein junger Mann wärmt sich neben uns in den Strahlen der Frühlingssonne. Mag sein, daß ihm das auf die Dauer etwas langweilig wird; jedenfalls langt er nach einer Weile in seine Aktentasche und holt ein Plastikästchen heraus, das er neben sich auf die Bank stellt. Nachdem er eine Rändelscheibe gedreht hat, erklingt Musik. Das Kästchen ist so klein und leicht, daß wir es ohne Mühe in einer Hand halten können. Wir sehen eine Skala, das Fensterchen mit der Rändelscheibe eines Lautstärkereglers und ein Ziergitter, das eine Lautsprecheröffnung abdeckt. „Sternchen“ steht links oben und rechts unten: „Transistor Radio“. Fünf, sechs Sender sind lautstark und klangrein zu hören, als wir behutsam am Skalenknopf des Gerätes drehen.

Taschenempfänger sind Kinder der Halbleitertechnik. Zwar hat man des öfteren versucht, Miniaturempfänger mit Röhren zu konstruieren, doch sie waren für die Rocktasche zu schwer und zu groß. Lediglich findigen Radioamateuren gelang es hier und da, „echte“ Taschenempfänger zu bauen; allerdings waren das stets Einzelstücke, die nicht für eine Serienanfertigung geeignet waren.

Die ersten Transistor-Taschenempfänger entstanden gleichfalls in der Bastlerwerkstatt. Sie wurden in ausgedienten Taschenlampenhüllen, alten Kameragehäusen und Tabaksbüchsen untergebracht und erregten allgemeine Bewunderung – allerdings nicht lange; denn bald ging auch die Industrie dazu über, Taschenempfänger zu produzieren. „Sternchen“ z. B. wurde schon 1959 geboren.



*Betriebskosten  
für 1 Stunde*





Dieser erste Taschenempfänger unserer volkseigenen Industrie ist ein „Superhet“, die heute verbreitetste Empfängerart, mit sechs Transistoren und zwei Halbleiterdioden. Um Raum und Gewicht zu sparen, hat man sich mit dem Mittelwellenbereich begnügt. Die Antenne ist im Gehäuse mit untergebracht, ebenso die Batterie, mit der man „Sternchen“ bei voller Lautstärke über 50 Stunden betreiben kann. Begnügt man sich mit geringerer Lautstärke, so reicht die Batterie viel länger. Seine Abmessungen sind für Taschenempfänger typisch: Das Gehäuse ist 14 cm lang, 8 cm hoch und knapp 4 cm tief; mit Batterie wiegt „Sternchen“ 435 g, also noch nicht einmal ein Pfund. Wer dieses Gerät trotzdem nicht in die Tasche stecken möchte, kann es sich umhängen; Ösen für eine Kordel sind am Gehäuse angebracht. Auch kleine Umhängetaschen, ähnlich der Bereitschaftstasche eines Fotoapparates, sind im Handel.

Eines ist verständlich: Die Leistung „großer“ Rundfunkempfänger können Taschenempfänger nicht erreichen; denn bei ihrer Konstruktion ringt man um jeden Kubikzentimeter Raum und um jedes Pond an Gewicht und hält den technischen Aufwand so niedrig wie möglich. Doch Taschenempfänger sollen auch kein Sinfoniekonzert in seiner Klangfülle übertragen oder Sender von der anderen Seite des Erdballs heranziehen. Ihre Aufgabe ist erfüllt, wenn sie die nächsten Rundfunksender empfangen, unabhängig vom Lichtnetz, von einer Antenne und ohne den Besitzer zu „belasten“.

Neben „Sternchen“ gibt es bei uns noch andere Taschenempfänger, z. B. den „T 100“ und den „T 101“. Mit ihnen können auch Langwellen und für den Rundfunkempfang besonders wichtige Kurzwellenbänder aufgenommen werden. An die Stelle der Spezialbatterie des „Sternchens“ treten Stabzellen. Sie sitzen in zwei kleinen Einschüben und sind auszuwechseln, ohne daß der Empfänger geöffnet werden muß. An den „T 100“ und an den „T 101“ können neben einem Zusatzlautsprecher auch eine Schaltuhr und sogar ein Tonabnehmer angeschlossen werden.

Anderer Firmen bauen die Schaltuhr gleich in den Taschenempfänger ein, z. B. der westdeutsche Telefunken-Konzern in seinen „Ticcolo“. Ein solches Gerät ist nebenbei noch Wecker und holt seinen Besitzer mit dem Morgenprogramm des nächsten Rundfunksenders aus dem Reich der Träume.

Neben zahlreichen „normalen“ Taschenempfängern der sowjetischen Industrie ist besonders der „Woronesh“ interessant. Seine aufklappbare Vorderseite trägt eine Sonnenbatterie, die den Empfänger mit Strom versorgt. Außerdem sind Taschenlampenbatterien und ein Miniaturakkumulator zur Speicherung elektrischen Stromes und für den Gebrauch des Gerätes im „Pufferbetrieb“ vorgesehen.

Die Volksrepublik Polen stellte jüngst den nur 10 cm · 6,5 cm · 3 cm großen „Migo“ vor, und in der ČSSR wurde ein Taschenempfänger in die Serienproduktion überführt, der nur 250 g wiegt.

Rundfunkhörer sind durch den störungsfreien UKW-Empfang ver-



wöhnt. Nachdem Transistoren gefertigt worden waren, die auf den sehr hohen UKW-Frequenzen noch arbeiten, ging man daran, auch Taschenempfänger für UKW-Empfang einzurichten. Die ersten Modelle haben in einigen Ländern bereits die Fließbänder verlassen. Sie sind allerdings nur dort sinnvoll, wo der nächste UKW-Sender nicht weit entfernt ist.

Ebenso wie die japanischen Transistoren sind auch die japanischen Kleinstempfänger zu einer „ernsten Gefahr“ für die Unternehmer anderer kapitalistischer Länder geworden. Vor fünf Jahren war Japan am Umsatz von Transistorengeräten in den USA mit 30% beteiligt; 1961 waren 70% aller in den Vereinigten Staaten verkauften Transistorradios japanischen Ursprungs. Es heißt jedoch, die nordamerikanische Industrie sei nunmehr zu einem „Gegenangriff“ entschlossen...

Können Transistorgeräte eigentlich noch kleiner konstruiert werden? Bastler haben diese Frage bereits vor Jahren entschieden, indem sie Empfänger in Streichholzschachteln, Brillenfutterale und Zigaretteneuis einbauten. Für einen Lautsprecher reichte freilich der „Saft“ dieser Zwerge unter den Zwergen nicht aus; wenn man Radio hören wollte, mußte man sich einen Kleinsthörer an das Ohr hängen.

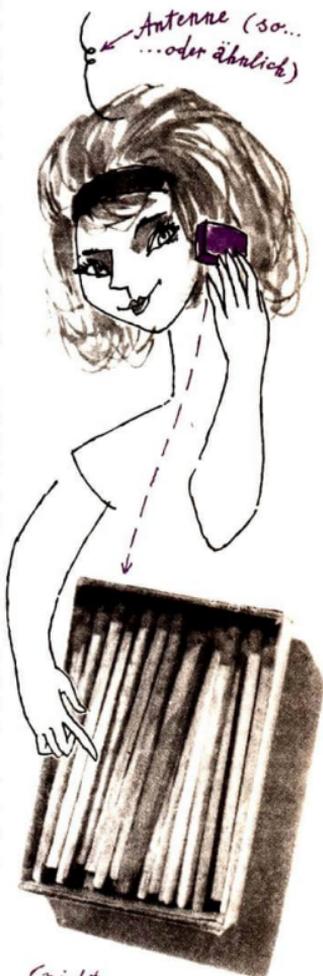
Auch die Industrie hat sich an solchen Geräten versucht. Eine westdeutsche Firma brachte ein Kleinstgerät heraus, das etwa so groß wie eine Streichholzschachtel ist. Es wird ans Ohr gehängt; das Ansatzstück des Hörers muß in das Ohr eingeführt werden. Als Antenne dient ein Drahtstückchen, das in der Frisur verborgen werden soll. Auch Brillenbügel sind bisweilen das Versteck für einen Transistorkleinstempfänger.

Die Verkaufschefs eines amerikanischen Radiowerkes entdeckten das Innere eines Hutes als geeigneten Platz für Transistorgeräte, und in Japan laboriert man an einem Miniaturempfänger in Größe und Form einer Armbanduhr. Außerdem gibt es dort Transistorgeräte, die mit einer Schmalfilmkamera oder einem Feuerzeug vereint sind. Schließlich konnte man von einem mit sieben Transistoren bestückten Gerät lesen, das mit Lautsprecher nur die Größe einer Streichholzschachtel aufweist.

Aus dem guten Geschäft, das man sich von diesen Spielereien versprach, wurde nichts, da diese recht teuren „Spielzeuge“ nur wenigen Kunden aufgeschwatzt werden konnten. Ihr Preis steht in keinem auch nur halbwegs vernünftigen Verhältnis zum Nutzen. Wir können sie gern entbehren.

### Steckdose nicht gefragt

Wer sich heute einen „großen Empfänger“, ein Fernsehgerät oder eine Musiktruhe kauft, könnte darin zwar mehrere Halbleitertgleichrichter, aber keine Transistoren entdecken. In diesen Geräten beherrscht noch immer die Verstärkerröhre das Feld. Sind die





Vorzüge des Transistors nicht so überzeugend, daß er die Elektronenröhre längst verdrängt haben müßte?

Was wir von einem hochwertigen Heimempfänger verlangen, ist gegenwärtig noch leichter mit Röhren als mit Transistoren zu erfüllen. Vor allem tritt das bei der sogenannten Sprechleistung zutage, der Fähigkeit des Empfängers, vier, fünf oder noch mehr Lautsprecher mit der nötigen elektrischen Leistung für eine möglichst naturgetreue Wiedergabe zu speisen.

Die Vorzüge des Transistors würden sich in der derzeitigen Empfängertechnik gar nicht voll auswirken. Aus Gründen der Klangqualität kann man die Lautsprecher und die Empfängergehäuse nicht beliebig verkleinern. Die Raumeinsparung durch Transistoren fiel demgegenüber kaum ins Gewicht. Sie wäre überhaupt nicht zu bemerken, solange man lediglich Transistoren an die Stelle der Röhren setzte. Auch daß Transistoren viel leichter als Röhren sind, hat für Heimempfänger keine besondere Bedeutung.

Eine grundlegende Änderung könnte eintreten, wenn sich im Empfängerbau allgemein die Miniaturisierung durchsetzt. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß der Großsuper von morgen nicht größer sein wird als das „Sternchen“ von heute; seine Lautsprecher werden, vom eigentlichen Empfangsgerät getrennt, an den für die Wiedergabe besten Plätzen im Zimmer aufgestellt oder aufgehängt werden – eine Forderung, die schon zur Zeit der ersten hochwertigen Röhrenempfänger immer wieder von Fachleuten erhoben wurde.

Weit günstiger schneidet der Transistor ab, wenn wir den Energieverbrauch eines Heimempfängers betrachten. Zwar erhöht auch ein 12-Röhren-Super unsere Stromrechnung nur unwesentlich; aber wenn wir den Energiebedarf vieler Rundfunkempfänger berücksichtigen, erhalten wir ein ganz anderes Bild. Siegfried Pfüller stellt in seinem Buch „Halbleiter – Bauelemente neuer Technik“ eine einfache Rechnung auf:

„Nehmen wir einmal an, im Durchschnitt verbräuche jedes Gerät etwa 60 Watt. Das entspricht ungefähr einer normalen Glühlampe. Würden jetzt in allen Geräten Transistoren eingebaut, so würde die Leistungsaufnahme . . . etwa auf 20 Watt bei gleicher Wirkung des Gerätes zurückgehen. Dies würde je Gerät eine Einsparung von 40 Watt bedeuten. Da etwa 6 Millionen Geräte in der DDR registriert sind, würde es eine Verminderung um  $40 \text{ Watt} \cdot 6 \text{ Millionen} = 240 \text{ Millionen Watt} = 240 \text{ Megawatt}$  betragen.

Eine solche Leistungseinsparung entspricht etwa der Leistungsabgabe des Großkraftwerkes Klingenberg in Berlin. So gewaltig können also die Einsparungen durch die Menge der vorhandenen Röhren und Geräte sein!“

Das ist wirklich ein überraschendes Ergebnis! Diese Sparsamkeit wird, zusammen mit den Fortschritten der Halbleiter- und der Miniaturisierungstechnik, dem Transistor vermutlich schon in naher Zukunft den Weg in Rundfunkheimempfänger frei machen.

Bei einer Gruppe von Heimempfängern hat sich der Transistor

schon durchgesetzt. Die „schnurlosen“ Geräte sind ausschließlich mit Transistoren und Halbleiterdioden bestückt.

Schnurlose Empfänger erfüllen einen alten Wunsch vieler Menschen, die neben ihrem „großen“ Gerät noch einen Zweitempfänger ihr eigen nennen wollten, der in der Küche ebenso wie auf dem Balkon, auf dem Nachttisch ebenso wie vor der Garage beim Wagenwaschen, auf dem Hausboden ebenso wie im Keller funktioniert. Die Rundfunkhörer verzichteten dabei gern auf einige Feinheiten der Spitzensuper, wenn diese Empfänger weder ein Anschlusskabel zur nächsten Steckdose noch eine äußere Antenne benötigten. Sie sollten „schnurlos“ (richtiger eigentlich: anschlusskabellos) sein und spielen, sobald man sie einschaltet.

Die Antenne konnte man im Gerät unterbringen. Die Netzanschlusskabel jedoch konnte nur wegfallen, wenn man die Spannungsquellen in das Gerät einbaute. Sollte dieses trotzdem leicht und klein bleiben, kam nur Transistorbestückung in Frage.

Die Steckbriefe der inzwischen weit verbreiteten schnurlosen Empfänger ähneln sich in überraschender Weise. Sie zeigen ein gefälliges, der modernen Wohnung angepaßtes Äußeres und besitzen einen Bedienungskomfort, der fast dem röhrenbestückten Heimempfänger entspricht. Ihre Wiedergabe ist sehr gut, und durch besondere Schaltungskniffe erreicht man, daß der Stromverbrauch um so geringer ist, auf je kleinere Lautstärke sie eingestellt sind. Die Bitte um Zimmerlautstärke wird somit durch einen handfesten materiellen Anreiz unterstützt. Die Stromversorgung übernehmen Trockenbatterien, wobei überall das Bestreben zu beobachten ist, die relativ teuren Spezialbatterien durch standardisierte Taschenlampenzellen zu ersetzen.

„Opal“, ein schnurloses Gerät aus der DDR, wird in verschiedenfarbigen Edelholzgehäusen geliefert; es enthält acht Transistoren und zwei Germaniumdioden und ist mit fünf Drucktasten ausgestattet. Als Spannungsquelle dienen sechs Monozellen für Taschenlampen.

„Lunik“, ein Erzeugnis der tschechoslowakischen Industrie, weist eine besonders übersichtliche Skala auf und wird ebenso wie der sowjetische schnurlose Empfänger „Minsk“ aus Taschenlampenbatterien gespeist. Ein Batteriesatz liefert Energie für etwa 150 Betriebsstunden.

In kapitalistischen Ländern hat die Entwicklung der „Schnurlosen“ teilweise neben zahlreichen gut durchkonstruierten, zweckentsprechenden Geräten merkwürdige Blüten getrieben. So bietet eine österreichische Firma einen Transistor-Nachttischlampenempfänger an, der in den Lampenfuß eingebaut ist und seinen Besitzer in den Schlaf musizieren soll. Unwillkürlich erinnert man sich, daß im Deutschen Kaiserreich einst ein Nachtstuhl mit eingebauter Spieldose verkauft wurde . . .

Wer noch nicht wußte, daß es in England sehr „feine“ Leute gibt, konnte sich 1960 auf der 27. Nationalen Rundfunk- und Fernseh-



messe davon überzeugen. Als „Clou“ der Ausstellung wurde ein schnurloses Gerät gezeigt, dessen Gehäuse mit siebzig Diamanten und anderen Edelsteinen verziert war. Wenn das keine technische Großtat ist! Trotzdem gab es einige – offenbar kommunistisch infizierte – Fachreporter, die ausrechneten, wieviel Elendswohnungen man mit dem Erlös aus diesem Gerät hätte verschwinden lassen können.

„Trösten“ wir uns damit, daß unser „Opal“ sehr beliebt ist und in viele Länder exportiert wird – und das ganz ohne Diamanten!

### Halbleiter beim Fernsehen

Moskauer Ingenieure konstruierten einen Fernsehempfänger, der mit Ausnahme der Bildröhre nur Halbleiterdioden und Transistoren enthält. Er wiegt 6 kp, ist 33 cm · 20 cm · 34 cm groß, und er verbraucht nur etwa ein Zehntel der Leistung normaler Fernsehgeräte. Der Empfänger kann an das Lichtnetz oder an eine Autobatterie angeschlossen werden.

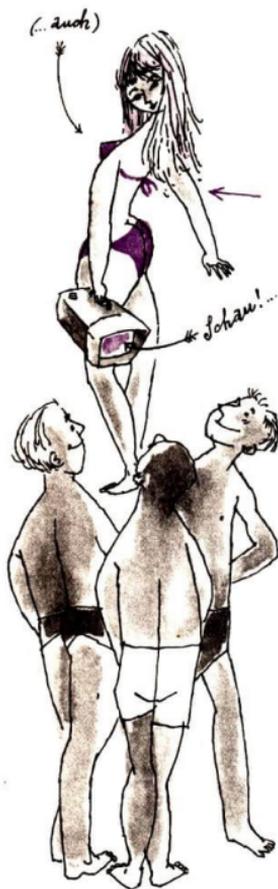
Die Sony-Corporation in Tokio entwickelte ein Transistor-Fernsehgerät, das dreiundzwanzig Transistoren und vierzehn Dioden enthält. Es ist etwas kleiner als der sowjetische Empfänger: 16 cm · 20 cm · 22 cm sind seine Maße; dementsprechend verringert sich auch die Größe des Bildschirms. Das jüngste Modell ist sogar kleiner als ein Tischfernsprecher.

Philco, ein nordamerikanisches Unternehmen, versuchte sich gleichfalls an einem Transistor-Fernsehgerät. Dessen Batterie reicht für fünf Betriebsstunden und muß anschließend nachgeladen werden. Zur Bildwiedergabe hat man bei Philco einen anderen Weg beschritten als die sowjetischen und japanischen Techniker: Das Bild ist nur 3,8 cm · 3,2 cm groß und wird durch Linsen und Spiegel vergrößert.

Der Anfang ist gemacht. Es dürften allerdings noch einige Jahre hingehen, bis Transistor-Fernsehgeräte überall zu haben sein werden. Gründe, die die Einführung des Transistors im Heimrundfunkempfänger verzögern, gelten auch für das Fernsehgerät.

Das größte Bauelement eines Fernsehempfängers ist die Bildröhre. Sie bestimmt die Anordnung und Verteilung aller übrigen Bauteile. Solange Bildröhren nicht verkleinert oder in ihrer Gestalt verändert werden können, hätte es wenig Sinn, Raum und Gewicht durch Transistoren zu sparen. Außerdem sind Transistoren für die hohen Fernsehfrequenzen gegenwärtig noch teurer als gleichwertige Röhren.

Doch Transistoren werden von Jahr zu Jahr billiger und zuverlässiger. Bildröhren, wie wir sie heute kennen, werden wahrscheinlich eines Tages überhaupt nicht mehr verwendet werden. Ihre Stelle werden Röhren einnehmen, die den langen „Hals“, ein Sorgenkind der Fernsehkonstrukteure, vermissen lassen. Entwicklungsmuster derartiger Röhren, die eigentlich nur noch aus dem



Bildschirm bestehen, gibt es bereits. Man könnte sie an die Wand hängen, während alle übrigen Empfängerstufen in einem Kästchen mit den notwendigen Bedienungsriffen Platz fänden.

Man hat bei Fernsehempfängern eine ähnliche Zwischenlösung angestrebt wie bei Koffergeräten und untersucht, ob es zweckmäßig ist, einzelne Stufen der Fernsehempfänger mit Transistoren auszurüsten. Sowjetische Ingenieure haben versuchsweise die sogenannten Bildverstärker von Fernsehgeräten mit Transistoren ausgerüstet. Gegenüber einem gleich leistungsfähigen Röhrenverstärker sank der Stromverbrauch auf ein Zwanzigstel. Auch denkt man daran, diejenigen Stufen mit Transistoren auszurüsten, die den Elektronenstrahl Zeile um Zeile über den Bildschirm führen. Ganz so einfach ist dieser Austausch allerdings nicht. Im Fernsehempfänger mit gemischter Bestückung entsteht, vor allem durch die Röhren, eine erhebliche Wärme. Sie stört die Arbeitsweise der temperaturempfindlichen Transistoren, während sie den übrigen Bauelementen wenig ausmacht.

Wichtiger als für Fernsehempfänger ist der Transistor schon heute für die Fernsehsendetechnik. Zwischen einer Fernsehstudiokamera und einer Schmalfilmkamera klaffen gewaltige Größenunterschiede. Das liegt nicht allein an der Bildaufnahmeröhre der Fernsehkamera, sondern auch daran, daß diese umfangreiche elektronische Baustufen enthält. Sie zu verkleinern und zu erleichtern ist eine Aufgabe, zu deren Lösung Halbleiterbauelemente bereits beim derzeitigen Entwicklungsstand gut beitragen können. Deshalb ist man in vielen Ländern bemüht, transistorisierte Fernsehkameras zu konstruieren, zu erproben und möglichst bald einzusetzen. Die in der Sowjetunion entwickelte Kamera „Wesna“ z. B. wiegt nur 2,5 kp und findet in einer kleinen Tasche Platz.

Neben dem Fernschrundfunk gewinnt das industrielle Fernsehen steigende Bedeutung. Zur Überwachung von Produktionsprozessen, im Verkehrswesen, in der Grundstoffindustrie, in der Kerntechnik und auf zahlreichen anderen Gebieten werden Fernsehanlagen als Beobachter eingesetzt. Das von der Kamera eingefangene Bild wird an zentraler Stelle und manchmal in großer Entfernung vom Beobachtungsort auf einem Bildschirm wiedergegeben.

Oft entscheiden Größe und Gewicht der Kamera darüber, ob dieses modernste Kontrollverfahren überhaupt anwendbar ist. Man könnte keine normale Fernsehkamera in ein Bohrloch oder in einen Atomreaktor versenken. Dafür braucht man Miniaturkameras. Sie lassen sich nur mit Hilfe von Halbleiterbauelementen konstruieren. Beachtliches wurde in dieser Richtung schon geleistet: Es gibt Kleinkameras für das industrielle Fernsehen, die sich in die Hosentasche stecken lassen.

Bei Fernsehreportagen wird häufig das Kamerabild drahtlos zum Übertragungswagen gesendet, um die Kamera beweglich zu machen. Nun wäre die leichteste Miniaturkamera nutzlos, wenn der zugehörige Reportagesender 100 kp wöge. Er muß im härtesten





Sinne des Wortes „tragbar“ sein, sei es, daß der Reporter ihn in der Hand hält, sei es, daß er ihn auf den Rücken schnallt. Auch diese Forderung ist nur mit Halbleitergeräten zu erfüllen, nicht mit Elektronenröhren. Wir werden derartige Kleinsender bald kennenlernen.

### Allerlei von Verstärkern

Wer Musik liebt und gern tanzt, wird auf die Dauer nicht immer mit dem zufrieden sein, was ihm sein Radio anbietet. Er möchte selbst Programme zusammenstellen, wie er will, und vor allem, wann er will. Er kauft sich also einen Plattenspieler oder ein Tonbandgerät.

Schallplatten gab es schon, ehe der Rundfunk entstand. Ihre heutige Verbreitung und Bedeutung aber verdanken sie der Rundfunk- und Verstärkertechnik. Erst die elektrischen Aufnahme- und Wiedergabeverfahren haben das Schallplattenhören zu einem Genuß werden lassen.

Besonders die Tonabnehmer wurden ständig weiterentwickelt. Dabei zeigte sich, daß gerade hochwertige Tonabnehmer eine sehr geringe elektrische Spannung abgeben. Durch die unvermeidlichen Verluste in der Verbindungsleitung vom Plattenspieler zum Rundfunkgerät wird sie weiter geschwächt. Außerdem ist diese Zuleitung sehr empfindlich gegen Störungen von außen. Unter Umständen kann bereits eine in der Nähe verlaufende Lichtleitung Ursache eines störenden Brummens sein.

Verstärkt man die Tonabnehmerspannung vor ihrem Eintritt in die Verbindungsleitung, so fallen die Störspannungen gegenüber der verstärkten Spannung kaum noch ins Gewicht. Zur „Anhebung“ der Tonabnehmerspannung genügt eine Verstärkerstufe. Würde man sie mit einer Röhre ausrüsten, brauchte man ein Stromversorgungsgerät, das die Röhre speist. Benutzt man dagegen einen Transistorverstärker, so genügt zur Stromversorgung eine billige Batterie, die bei dem geringen Stromverbrauch des Verstärkers monatelang hält. Außerdem kann man die wenigen Bauelemente des Transistorverstärkers in den Tonarm einbauen. Zusätzlicher Raum ist nicht nötig.

Daß Plattenspieler stets nur in Verbindung mit einem Rundfunk-

empfänger oder Verstärker „spielten“, wurde von vielen Musikfreunden als Nachteil empfunden. Sie wünschten sich Plattenspieler mit eigenem Verstärker und eigenem Lautsprecher. Solche Geräte sind allerdings nicht gerade billig; auch ihr Gewicht ist erheblich.

Man hat daher angefangen, Plattenspieler zu transistorisieren. Ein Transistorverstärker ist klein und leicht; vor allem braucht er kein Stromversorgungsgerät. Eine Trockenbatterie oder ein kleiner, nachladbarer Akkumulator reicht aus.

Freilich wären solche Plattenspieler noch immer an die Steckdose gefesselt, wenn ihr Motor weiterhin mit Netzstrom angetrieben werden müßte. Auch dieses Problem wurde gelöst. Man kennt sehr sparsame Elektromotoren, die aus einer Batterie gespeist werden und einen Plattenteller drehen können. In den neuesten transistorisierten Plattenspielern beziehen Motor und Verstärker ihre Energie aus *einer* leichten Batterie, Steckdose und Anschlußkabel sind damit überflüssig. Der Plattenspieler wird ebenso beweglich wie ein Koffer- oder Taschenempfänger.

Neben dem Plattenspieler hat sich das Tonbandgerät viele Freunde erworben. Heim-Tonbandgeräte sind heute immer „selbständig“. Sie enthalten einen Verstärker, Möglichkeiten zur Lautstärke- und Klangregulierung und einen oder mehrere Lautsprecher. Jeder Tonbandamateure weiß, daß sich das auf Größe und Gewicht auswirkt. Das beliebte Bandgerät „BG 23“ z. B. wiegt 8 kp, das mit etwas mehr Bedienungskomfort ausgestattete „KB 100“ sogar 12 kp. Auch wenn man zum Betrieb dieser Geräte keine Steckdose brauchte, würde man sie kaum ins Freie mitnehmen.

Leichte, netzunabhängige Tonbandgeräte besitzen darüber hinaus große Bedeutung für die Volkswirtschaft. Allmählich – oft, wie uns scheint, zu allmählich – findet das Tonband im Diktiergerät Eingang in Büros und Verwaltungen. Sein Einsatz ermöglicht ein zügigeres Arbeiten und spart Zeit und Nervenkraft. Der Abteilungsleiter, der Funktionär oder Sachbearbeiter braucht nicht mehr „zum Diktat zu bitten“. Er vertraut seine Texte dem Tonbandgerät an, kann sein Diktat beliebig unterbrechen, ergänzen und verbessern. Die „Fonotypistin“ legt das Tonband in das Wiedergabegerät ein und kann ohne Unterbrechung schreiben.

Doch das ist nur ein Anfang! Nicht jedes Büro braucht „sein“ Diktiergerät und „seine“ Schreibkraft. In einem zentralen Schreibraum werden mehrere Diktiergeräte aufgestellt. Sie sind mit der Haustelesonanlage verbunden, und es wird „über Draht“ diktiert. Man kommt mit weniger Diktiergeräten und viel weniger Arbeitskräften aus. Der Zeitung „Neues Deutschland“ entnehmen wir, daß im Kombinat Schwarze Pumpe durch eine derartige Anlage (sie läßt sich ohne große Kosten nachträglich einbauen) achtundvierzig Schreibkräfte für eine andere Tätigkeit frei wurden.

Diktiergeräte müssen sehr betriebssicher sein; außerdem sollten sie sich leicht transportieren und unabhängig vom Lichtnetz be-





treiben lassen. Man kann sie dann zu Sitzungen und Versammlungen, zu Konferenzen und Besprechungen mitführen oder sie sogar während einer Reise benutzen. Das transportable Diktiergerät rüstet man daher mit einem Transistorverstärker aus und versorgt es aus Batterien mit Betriebsstrom.

Wie klein Diktiergeräte sein können, zeigt ein Modell aus Japan: Es mißt 9,5 cm · 12 cm · 2,7 cm und wiegt 800 g. Man kann mit ihm ohne Bandwechsel dreißig Minuten lang diktieren. Taschendiktiergeräte anderer Länder sind etwas größer, lassen sich aber auch in einer Handtasche unterbringen.

Lange Mikrofonleitungen sind noch störanfälliger als die Verbindungsleitungen von Tonabnehmern. Seit Jahrzehnten baut man deshalb hochwertige Mikrophone mit einem Vorverstärker zusammen. Er ist in der „Flasche“, dem Metallzylinder unter dem Mikrofon, untergebracht und verstärkt die Mikrofonspannung, bevor sie in das Kabel eintritt.

Die Flasche wird überflüssig, wenn man den Vorverstärker transistorisiert. Er sitzt im Fuß oder im Gehäuse des Mikrophones und kann länger als ein Jahr ohne Batteriewechsel tätig sein. Vorverstärker dieser Art stehen inzwischen sogar dem Tonbandfreund zur Verfügung.

Auch die Verstärker von Elektrogitarren sind neuerdings häufig mit Transistoren bestückt; ein ungarisches Werk entwickelte sogar einen Kontrabaß mit Halbleiterverstärker.

Für Badeanstalten und Sportplätze ist ein tschechisches Transistor-Megaphon gedacht, das ein Mikrofon, einen Verstärker und einen leistungsfähigen Lautsprecher enthält und aus Stabbatterien gespeist wird. Ohne Mühe kann ein Sprecher auf Entfernungen bis zu 200 m verstanden werden.

Etwas ganz Besonderes dachten sich englische Imker aus: Die summenden Geräusche in einem Bienenstock zeigen kurze Zeit vor dem Schwärmen der Bienen gewisse Veränderungen im Ton, die mit dem Ohr wahrgenommen werden können. Man führt ein winziges Mikrofon in die Rückwand des Bienenstockes ein, verbindet es mit einem Halbleiterverstärker und kann so das Summen abhören und den Zeitpunkt des Schwärmens vorhersagen. Im Septemberheft 1959 der Zeitschrift „Nature“ ist dieses „Apidictor“ genannte Gerät beschrieben.



## Es gibt nicht nur den Rundfunk

### Rufen Sie bitte die Zentrale an!

„Also gut, versucht es; ich komme nachher noch einmal vorbei.“ Eben will Dr. Mertens seinen Rundgang durch die Produktionsabteilung fortsetzen, da summt es in der Tasche seines Laborkittels. Dr. Mertens zieht eine Blechhülse hervor, daumenstark

und so lang wie ein Füllhalter, die er ans Ohr hält. Er lauscht einen Augenblick gespannt und eilt davon. Wäre die Halle nicht von Maschinenlärm erfüllt, hätten vielleicht auch wir es aus der Hülse sprechen hören: „Kollege Dr. Mertens – Ihr Gespräch mit Bukarest kommt. Rufen Sie bitte vom nächsten Hausapparat die Zentrale an!“

Ist eine solche Personenrufanlage nicht eine sehr nützliche Erfindung? Wie oft haben wir es in Betrieben, Verwaltungen und Krankenhäusern selbst erlebt: Ein Kollege wird dringend verlangt, aber er ist nicht in seinem Zimmer, sondern in einer anderen Abteilung oder „auf Station“. Dann muß das Haustelesystem helfen: „Ist Kollege Schmidt bei Ihnen?“ „Haben Sie Kollegen Schmidt gesehen...?“ „Wenn Kollege Schmidt bei Ihnen auftaucht, möchte er sofort...“

Wie viele Arbeitsstunden mögen wohl täglich in einem Großbetrieb durch solche „Fahndungen“ verlorengehen! Wie oft werden Mitarbeiter durch den Fernsprecher aus ihrer Arbeit gerissen! Man sollte es einmal untersuchen. Sicher würde das Ergebnis die Einführung von Personenrufanlagen beschleunigen; denn mit ihnen läßt sich jeder Mitarbeiter jederzeit unmittelbar erreichen.

Untersuchen wir die Hülse, die Dr. Mertens trug. Sie enthält einen Transistorverstärker, der von einer winzigen chemischen Spannungsquelle, einer sogenannten Knopfzelle, gespeist wird. Erreicht ein Anrufsignal den Verstärker, so schaltet er einen Summer ein, der den Träger der Hülse auf den Anruf aufmerksam macht. Durch einen Knopfdruck wird der Summer abgeschaltet und der Verstärker mit einer Kopfhörerkapsel verbunden, die eine Stirnfläche der Hülse abschließt. Der Träger des Personenrufempfängers nimmt die Durchsage entgegen. Wenn er antworten möchte, sucht er den nächsten Fernsprecher auf.

Doch wie gelangen die Signale zum Personenrufempfänger? Und wie erreicht man, daß stets nur der Summer des Angerufenen anspricht, nicht aber die aller übrigen Träger von Empfängern?

Das Gebäude, in dem sich Dr. Mertens aufhält, wird von einer großen Drahtschleife eingeschlossen. Sie ist unauffällig an den Wänden verlegt; eine Windung umfaßt das Erdgeschoß, eine zweite den ersten Stock. Wer immer sich im Gebäude bewegt, befindet sich im Inneren dieser Schleife. Ihre beiden Enden führen zu einer leistungsfähigen Verstärkeranlage, die mit einem Mikrophon verbunden ist.

Wird das Mikrophon besprochen, fließen kräftige Wechselströme durch die Schleife. Sie entsprechen in Stärke und Frequenz genau den Sprachschwingungen. Ein Bild der Sprachschwingungen vermittelt auch das „magnetische Wechselfeld“, das durch diese Ströme verursacht wird. Es tritt besonders deutlich in dem von der Schleife eingeschlossenen Raum auf. Hält man eine Spule in das Wechselfeld, so ruft es in ihr gleichfalls Wechselspannungen hervor.



*und das ist die Drahtschleife*

(Drahtschleife) →

In jedem Personenrufempfänger befindet sich eine solche Spule. Sie gibt die Spannung an die Transistoren weiter, die sie verstärken und anschließend dem Kopfhörer zuführen. Im Prinzip sind die Spule im Empfänger und die Schleife nichts anderes als die Wicklungen eines Transformators. Wechselströme und Wechselspannungen an der einen Wicklung (hier die Schleife) verursachen Wechselströme und Wechselspannungen in der anderen Wicklung (hier die Empfängerspule).

Das Problem des Einzelanrufs, des „Selektivrufs“, läßt sich auf verschiedene Weise lösen. In der hier beschriebenen Anlage wird der Empfängerspule in der Anrufstellung ein Kondensator parallelgeschaltet. Dadurch reagiert der Personenrufempfänger nur noch auf *eine* Tonfrequenz. Sie ist durch die elektrischen Daten von Spule und Kondensator festgelegt. Wechselt man den Kondensator aus, kann man jedem Personenrufempfänger eine andere Ruffrequenz zuteilen.

Die Zentrale, von der aus die Anlage bedient wird, schickt zum Anruf die Ruffrequenz des Empfängers in die Leitung, mit dem eine Verbindung gewünscht wird. Hätte man dem Empfänger des Dr. Mertens eine Ruffrequenz von 5000 Hz zugeteilt, so ertönte sein Summer nur, wenn der Empfänger diese Frequenz aus der Schleife aufnahm. Auf eine Frequenz von 5500 Hz spräche nicht der Summer des Dr. Mertens, sondern derjenige des Kollegen an, dessen Gerät auf diese Ruffrequenz eingestellt ist.

Die Ruffrequenzen werden gleichfalls durch ein elektronisches Gerät erzeugt. Die meisten Personenrufanlagen sind so ausgeführt, daß der „richtige“ Rufton über die Schleife geht, sobald man in der Zentrale die Haustelefonnummer des Gesuchten wählt oder eine Taste drückt.

Unser Beispiel ist zwar typisch für die Ausführung einer Personenrufanlage, stellt aber keineswegs die einzige Gestaltungsmöglichkeit dar. Bei wenigen Teilnehmern und seltenen Anrufen kann man auf den „Selektivruf“ verzichten. Bei jedem Anruf sprechen alle Empfänger an; die nicht gerufenen Teilnehmer schalten wieder ab.

Ist hingegen die Zahl der Teilnehmer sehr groß, kommt man mit einzelnen Ruffrequenzen nicht mehr aus. Man kann in diesem Fall Kombinationen aus zwei oder drei Tönen wählen.

Daß der Träger eines Personenrufempfängers nicht unmittelbar antworten kann, scheint ein Mangel zu sein. Selbstverständlich ließe er sich beheben. Doch wäre damit wirklich viel gewonnen?

Es gibt wohl keinen Betrieb, in dem der Weg zum nächsten Fernsprecher weit ist. Die Taschengeräte aber würden, wollte man mit ihnen auch antworten, schwerer, größer und im Betrieb teurer. In der Zentrale der Anlage wären gleichfalls umfangreiche Erweiterungen notwendig, um Antworten entgegennehmen zu können. Deshalb gibt man bisher fast immer dem „einseitigen“ Personenrufsystem den Vorzug.

Rufzentrale



## Dolmetscher und Fremdenführer

Es ist fast zur Selbstverständlichkeit geworden, daß die Teilnehmer internationaler Konferenzen Referate und Diskussionsbeiträge sofort in ihrer Muttersprache oder in einer der Weltsprachen mit-hören können.

Die Hauptpersonen dieses „Simultandolmetschens“ bekommt man nur selten zu Gesicht. Es sind hochqualifizierte Dolmetscher, die nicht nur den Inhalt und Sinn der gesprochenen Texte exakt wieder-geben, sondern sich auch in der Fachterminologie auskennen und oftmals sogar beim Übersetzen den Tonfall und die Sprechweise der Redner berücksichtigen.

Vom „technischen Apparat“ ist auch nicht viel zu sehen, allenfalls Anschlußbuchsen für Kopfhörer und ein Schalthebel, mit dem jeder Konferenzteilnehmer eine Sprache wählen kann. Was sonst noch zur Dolmetscheranlage gehört, bleibt verborgen.

Die Rednermikrophone sind über Leitungen und Verstärker mit den Übersetzerkabinen verbunden. In ihnen nehmen Dolmetscher den Originaltext mit Kopfhörern auf, um ihn – übersetzt – sofort wieder in ein Mikrophon zu sprechen, das vor ihnen steht. Von ihm führen über einen weiteren Verstärker Leitungen zu jedem Sitzplatz im Saal.

Da für jede Konferenzsprache ein besonderes Leitungsnetz nötig ist, sind derartige Dolmetscheranlagen kompliziert und teuer. Nur in großen, viel benutzten Tagungsstätten kann man sie installieren. Sie lassen sich auch nicht provisorisch in einem beliebigen Saal einrichten, sondern müssen fest eingebaut werden. Die Konferenzteilnehmer aber „liegen an der Kette“, dargestellt durch die Kopfhöreranschlußschnüre; oft können sie nicht einmal aufstehen, um einen Kollegen zu begrüßen, ohne die Anschlußschnüre zu gefährden.

„Drahtlose“ Dolmetscheranlagen ohne diese Mängel verdanken wir der Halbleitertechnik. Sie können innerhalb kürzester Zeit fast überall auf- oder abgebaut werden.

Soll nur in eine Fremdsprache übersetzt werden, so genügt eine gewöhnliche Personenrufanlage; ihre Sendeschleife wird provisorisch an den Wänden des Konferenzsaales verlegt. Allerdings ist es meistens günstiger, die Empfänger zusätzlich mit einem Miniaturhörer auszustatten. Die Konferenzteilnehmer hängen ihn hinter das Ohr, stecken die Empfänger in die Tasche und behalten die Hände frei.

Bei mehreren Konferenzsprachen muß man eine andere Anlage verwenden. Sie arbeitet nicht wie ein vergrößerter Transformator, sondern ist beinahe ein „Rundfunk im kleinen“. Jede Übersetzung wird von einem Kleinsender auf einer bestimmten Wellenlänge in den Saal gestrahlt. Die Konferenzteilnehmer sind mit Taschenempfängern versehen; sie stimmen sie auf die Wellenlänge der Sprachsendung ab, die sie hören möchten.

Als Sendeantennen werden Drahtschleifen verwendet, die im Saal



verlegt worden sind. In ihnen fließen aber diesmal nicht verstärkte Mikrofonströme, sondern die von den Sendern erzeugten Hochfrequenzströme. Die Sender sind im Saal gut, außerhalb der Schleife dagegen kaum zu hören. Diese Bedingungen müssen erfüllt sein, damit die Dolmetscheranlage keine anderen Funkdienste stört.

Für eine sichere Verbindung zwischen den Empfängern der Konferenzteilnehmer und den Sendeschleifen gibt es – wenigstens theoretisch – zwei Möglichkeiten. Wählte man leistungsstarke Sender, so käme man mit einfachsten Empfängern aus. Man könnte sogar auf die seit mehr als 40 Jahren bekannten Detektorempfänger zurückgreifen, für die man weder eine Batterie noch Transistoren benötigte. Da aber jede Erhöhung der Sendeleistung die Gefahr vergrößert, andere Funkverbindungen zu stören, scheidet dieses Verfahren aus.

Man muß den zweiten Weg beschreiten. Die Sendeleistung wird möglichst begrenzt; dafür aber setzt man empfindlichere Empfänger ein. Ihre Konstruktion wurde erst durch die Erfindung des Transistors möglich.

Obwohl die Empfänger meistens drei Transistoren, die zugehörigen Bauelemente, außerdem eine Batterie und eine Ferritstabantenne enthalten, sind sie kaum größer als ein Zigarettenetui. Ihr Energiebedarf ist denkbar gering. Hunderte von Empfängern nehmen zusammen erst soviel Strom auf wie eine Taschenlampe. Der übersetzte Text wird mit einem Miniaturhörer wiedergegeben, der an das Ohr gehängt oder in den äußeren Gehörgang gesteckt wird. Ein Knopf dient zum Regulieren der Lautstärke, mit einem zweiten wird die gewünschte Sprache eingestellt. Man kennt Spezialausführungen, bei denen Empfänger und Kopfhörer zu einer nur wenige Pond schweren Einheit zusammengebaut sind, die mit einem Ohrbügel versehen ist.

Der Träger eines derartigen Empfängers kann sich völlig frei im Saal bewegen. Oft werden Nebenräume in die Sendeschleifen mit einbezogen. Man kann der Veranstaltung daher notfalls auch außerhalb des Saales folgen.

Die freie Beweglichkeit, die drahtlose Dolmetscheranlagen ihren Benutzern gewährleisten, verlockte die Techniker der englischen Multitone-Electric-Company zu einer viel diskutierten Variante: Sie bauten im Science-Museum (South Kensington) eine „Funkführungsanlage“ ein.

Jeder Besucher des Museums bekommt einen etwa 200 g schweren Empfänger in die Hand gedrückt, schließt daran einen Kopfhörer an und wird nun durch eine „Geisterstimme“ von Ausstellungsstück zu Ausstellungsstück, von Abteilung zu Abteilung geführt. Nach Betätigen eines Schalters kann er sich die Erklärungen auch in anderen Sprachen als in Englisch anhören.

Zweifellos hat eine derartige Anlage Vorteile: Man kann die auf Tonbändern festgehaltenen Texte beliebig oft wiederholen und



*Stromverbrauch  
von 100 Empfängern*



jederzeit ablaufen lassen. Niemand braucht zu drängeln, um keine Erläuterung des Museumsführers zu verpassen. Besucher aus verschiedenen Ländern können ohne Verständigungsschwierigkeiten gleichzeitig geführt werden.

Trotzdem ist wohl nicht anzunehmen, daß sich solche Anlagen durchsetzen werden. Das Tempo der Führung wird durch die Tonbänder vorgeschrieben. Verweilt man an einer Stelle länger, als es das Tonband vorsieht, so ist ein Teil der folgenden Erklärungen sinnlos. Einen persönlichen Kontakt mit dem Museumsführer gibt es nicht; man kann keine Fragen stellen. Auch ein Meinungsaustausch unter den Besuchern ist schwer; denn sie müssen dem Tonband lauschen. Auf einer technischen Ausstellung mag man das alles noch hinnehmen. Aber könnten Sie sich vorstellen, daß ein „Tonbandroboter“ Sie durch das „Grüne Gewölbe“ oder durch die Berliner Museen dirigierte?



### Mikrophone, Souffleure, Regisseure

Wenn Sie schon einmal vor dem Mikrophon einer Lautsprecheranlage gestanden haben, wissen Sie, daß nicht nur jede leise, zufällige Berührung des Mikrophons als Donnerkrachen übertragen wird oder ein herzhaftes Luftholen sich in den Lautsprechern wie ein Wasserfall anhört, sondern daß dem Sprecher auch ungewollte Lautstärkeschwankungen zu schaffen machen. Er muß den Abstand vom Mikrophon genau einhalten; zu flüstern ist ihm ebensowenig gestattet wie zu schreien; er darf nicht einmal den Kopf vor Seite wenden, wenn die Worte klar und lautstark wiedergegeben werden sollen. Temperamentvolle Redner und Vortragende ohne Mikrofonerfahrung vergessen diese Regeln immer wieder.

Was soll man aber machen, wenn sich der Vortragende bewegen muß, wenn er Experimente vorführt oder Karten und grafische Übersichten erläutert? Dann bleibt zunächst nichts anderes übrig, als mehrere Mikrophone geschickt zu verteilen. Doch selbst dem Rundfunk mit seiner ausgefeilten Technik gelingt es nicht immer, Lautstärkeschwankungen nachträglich auszugleichen.

Manchmal versuchte man, was sich bei Rundfunksprechern bewährt hatte: Man gab dem Vortragenden ein Mikrophon in die Hand, das an ein langes, leicht bewegliches Kabel angeschlossen war. Es wurde ein Mißerfolg: Die Redner hielten das Mikrophon nicht ruhig, hatten von vornherein eine Hand besetzt, und es ist sogar vorgekommen, daß sie, wenn sie zur Landkarte oder zur Tafel traten, das Mikrophon einfach auf den Tisch legten. Mitunter verwickelte sich auch das Anschlußkabel oder blieb irgendwo hängen. Das Kabel war auch dann noch im Wege, als man Mikrophone einsetzte, die am Rockaufschlag oder im Knopfloch angezwickt werden konnten.

„Das Kabel muß verschwinden!“ forderte man. „Ersetzt es durch eine drahtlose Verbindung!“ Das war leichter gesagt als getan;



denn Röhrengeräte, mit denen man diese Forderung hätte erfüllen können, waren zu groß und zu schwer. Durch die Halbleitertechnik konnte der Gedanke des „drahtlosen Mikrophons“ verwirklicht werden.

Der Träger eines drahtlosen Mikrophons hat einen vollständigen Sender bei sich. Allerdings ist dieser Sender nur so groß wie eine Zwanzigerpackung Zigaretten; er wiegt auch nicht viel mehr. Die Sendeleistung beträgt nur winzige Bruchteile eines Watts. Das ist erklärlich; denn der Sender muß aus einer Taschenlampenbatterie gespeist werden und soll nur zwanzig oder dreißig Meter weit zu hören sein, damit er den „richtigen“ Funkverkehr nicht stört.

Besprochen wird der Sender des drahtlosen Mikrophons mit einem pfenniggroßen Knopflochmikrophon. Am Rande der Bühne oder des Vortragspodiums steht ein Empfänger, der die Radiowellen des drahtlosen Mikrophons aufnimmt, verstärkt und an die Lautsprecheranlage weitergibt. Auch der Empfänger ist selbstverständlich mit Transistoren ausgestattet. Die Sendeantenne wird in das Sendergehäuse mit eingebaut, oder das Verbindungskabel vom Taschensender zum Knopflochmikrophon stellt gleichzeitig auch die Sendeantenne dar.

Bei Vorträgen, Reden und in Hörsälen sind drahtlose Mikrophone oft zu finden. Sogar Tonbandamateure beginnen sie zu schätzen. Da die Verbindungsleitungen zwischen Tonbandgerät und Mikrophon nicht allzu lang sein dürfen, wenn man Tonaufnahmen in einem Nebenraum machen möchte, muß man das ganze Aufnahmegerät mitnehmen. Mit dem drahtlosen Mikrophon dagegen ist der Aktionsradius des Bandgerätes größer. Es kann an seinem Platz bleiben. Drahtlose Mikrophone für Tonbandamateure benötigen nicht einmal einen besonderen Empfänger. Sie benutzen das Rundfunkheimgerät, dem lediglich ein kleines Zusatzgerät vorgeschaltet wird.

Durch höhere Leistung und etwas größere Abmessungen zeichnen sich drahtlose Mikrophone aus, mit denen man Rundfunkreporter vom Kabel zum Übertragungswagen unabhängig macht. So arbeitet die britische Rundfunkgesellschaft BBC mit drahtlosen Reportagemikrophonen, die einige hundert Meter überbrücken. Sie sind trotzdem noch viel kleiner und leichter als Miniatur-Sprechfunkgeräte mit Röhrenbestückung.

Eine Funkverbindung auf der Bühne haben polnische Techniker vorgeschlagen und ausgeführt. Sie rüsteten Schauspieler mit Taschenempfängern und unauffälligen Kleinhörnern aus. Der Souffleur sitzt in den Kulissen und gibt die Stichworte drahtlos über einen kleinen Sender.

Ähnliche Einrichtungen verwendet man immer häufiger als Regiekommandoanlagen. Bei Film- und Fernsehaufnahmen werden Kameralleute und Regiepersonal mit Transistorempfängern ausgestattet, über die Anweisungen des Regiestabes entgegengenommen werden.



*Hände sind frei!*



Übrigens haben sich solche Anlagen bereits in der „Vor-Transistor-Zeit“ bewährt. So arbeitete die DEFA bei den Aufnahmen zum Film „Das Lied der Matrosen“ mit einer drahtlosen Regiekommandoanlage. Der Sender entstammte einer serienmäßig produzierten Funkanlage für Kraftfahrzeuge, während die Kleinempfänger speziell für diesen Zweck von einem Ingenieurkollektiv entwickelt worden waren.

### Transistoren für die Schwarze Pumpe

Rundfunkhörer denken selten daran, daß die Funktechnik ursprünglich für einen ganz anderen Zweck gedacht war. Sie sollte Nachrichtenverbindungen schaffen, wo Kabel und Leitungen nicht ausgelegt werden konnten. Der Schiffsfunk, der Flugfunk, die großen Zentralen für den transozeanischen Fernschreib- und Telefonverkehr sind die bekanntesten Beispiele dafür.

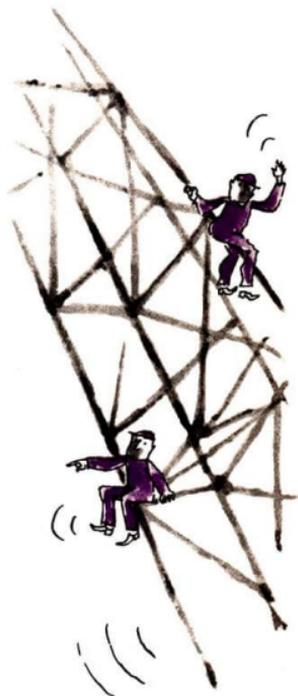
An vielen Stellen gab es allerdings zunächst keine drahtlose Verständigungsmöglichkeit, obwohl sie dort sehr nützlich gewesen wäre. Blenden wir zurück zum Jahre 1930, und begeben wir uns auf eine Baustelle.

Zwei Kräne schwenken die schweren Mittelträger für eine Stahlbrücke ein. Hoch über dem Flußbett reiten Monteure auf der Gitterkonstruktion. Sie dirigieren die Kräne, deren Führer sich weit aus ihren Kabinen beugen. Nur durch Zeichen ist eine Verständigung möglich; denn Zurufe würden im Lärm der Baustelle, im Mahlen der Betonmischer und im Pfeifen und Rollen der Feldbahn untergehen. Erst nach sechs, sieben Versuchen gelangt der Träger in die richtige Position und kann vorsichtig abgesetzt werden. Welch umständliches und gefährliches Verfahren! Das Übersehen, das Mißdeuten eines Winkzeichens könnte Menschen oder Teile des entstehenden Bauwerks in die Tiefe reißen.

Ein Funkgerät müßte her, ein Kleinfunkgerät zum Umschnallen, das nicht schwerer zu bedienen wäre als ein Fernsprecher und das trotzdem eine einwandfreie Verständigung mit den Kranführern ermöglichte!

Auf vielen Baustellen mag man ähnliche Stoßseufzer ausgestoßen haben; aber 1930 war an solche Geräte noch nicht zu denken. Die Funkgeräte waren noch zu schwer und groß; ihre Bedienung war so kompliziert, daß man sie nur einem Fachmann anvertrauen konnte.

Jedes Kilopond an Gewicht, jeder Kubikdezimeter Raum, die in den folgenden Jahren bei der Entwicklung kleiner, leichter Funkgeräte eingespart werden konnten, erweiterte ihren Anwendungsbereich. Polizeifahrzeuge, Löschzüge und Krankentransportwagen konnten allmählich mit einem Funkgerät ausgerüstet werden, das nicht mehr soviel Platz wie ein Fahrgast beanspruchte; auf Bahnhöfen unternahm man erste Versuche, eine drahtlose Sprechverbindung zwischen Rangierlokomotiven und Stellwerk zu schaffen;





Motorboote der Wasserstraßenbehörden konnten drahtlos mit ihren Dienststellen an Land telefonieren; in fast allen Armeen der Welt tauchten Tornisterfunkgeräte auf. Sie waren aber, was Größe und Gewicht anbelangt, vor allem noch recht unbequeme „Tornister“. Selbst die gegen Ende des zweiten Weltkrieges entstandenen Kleinfunkgeräte belasteten ihre Träger auf die Dauer. Bei der Arbeit hätten sie so gehindert, daß Brückenmonteure wahrscheinlich bald zur Winkmethode zurückgekehrt wären.

Sogar beim Bau der Kraftwerke im Kombinat „Schwarze Pumpe“ behalf man sich zunächst mit der Winkmethode. Inzwischen gab es jedoch Kleinstfunkgeräte, die mit Transistoren bestückt waren und wie eine Kamera oder ein Fernglas umgehängt werden konnten. Sollte man sie gegen wertvolle Devisen aus dem westlichen Ausland beziehen? Sollte man auf größere, empfindlichere und unwirtschaftlichere Röhrengeräte zurückgreifen, die zur Verfügung standen? Oder sollte man gar auf unseren Großbaustellen moderne Großmaschinen, aber uralte Methoden der Nachrichtenübermittlung einsetzen?

Nichts von alledem! Man entschloß sich, die vervielfachte Kraft des Kollektivs zu nutzen, und gründete im Juli 1960 eine überbetriebliche sozialistische Arbeitsgemeinschaft, der nicht nur Hochfrequenzspezialisten, sondern auch Mitarbeiter des Kombinats „Schwarze Pumpe“ angehörten. Man ging ohne langes Debattieren an die Arbeit. Bereits einen Monat danach erprobte man im Kombinat Labormuster eines Transistor-Kleinstfunkgerätes.

Wenig später wurden die beiden zusammenarbeitenden Kräne am Kraftwerk Mitte mit je einem Empfänger ausgestattet. Außerdem erhielten die Kranführer und der Kraneinweiser einen Transistor-Kleinstsender. Er ist nicht größer als eine Schmalfilmkamera, enthält drei Transistoren und wird aus serienmäßig produzierten, billigen Kleinakkumulatoren gespeist, wie sie in manchen Taschenlampen zu finden sind. Man hatte damit erreicht, daß der Kraneinweiser – unabhängig von den Sichtbedingungen – immer richtig verstanden wird, daß die Kranführer ihre Tätigkeit aufeinander abstimmen können und viele Arbeitsstunden gespart werden.

Es sind also nicht immer monate- oder jahrelange Entwicklungsarbeiten notwendig, um für eine volkswirtschaftlich wichtige Aufgabe eine befriedigende technische Lösung zu finden. Initiative, Begeisterung und Zielstrebigkeit wiegen oft schwerer als die benötigten Worte: „Das geht doch nicht“.

Die für die „Schwarze Pumpe“ entwickelte Anlage kann und will keinen Anspruch darauf erheben, universell, für die verschiedenartigsten Zwecke, einsetzbar zu sein. Bei ihrer Konstruktion ging es vor allem um möglichst großen Zeitgewinn. Doch sobald die Funktionsmuster einwandfrei arbeiteten, begann die Arbeitsgemeinschaft, die Geräte zu verbessern und zu erweitern: Kleine, batteriegespeiste Empfänger und ein Kleinst-Funksprechgerät waren die nächsten Aufgaben.

## Die verlängerte Stimme

Man hat die Transistor-Kleinstfunkgeräte „verlängerte Stimme“ genannt. Das ist nicht ganz richtig; denn meistens sind sie auch „verlängerte Ohren“. Man kann mit ihnen nicht nur senden, sondern auch empfangen. Allerdings wird man nicht für jeden Zweck ein „Spezialohr“ und eine „Spezialstimme“ entwerfen und ausführen, wie es noch in der „Schwarzen Pumpe“ der Fall sein mußte.

Wenn auf einer Großbaustelle die „verlängerten Stimmen“ des VEB Tiefbau Nord von den „verlängerten Ohren“ des VEB Hochbau Süd verstanden werden sollen, müssen sämtliche Kleinstfunkgeräte im gleichen Wellenbereich senden und empfangen und in wichtigen Grundzügen ihrer Arbeitsweise übereinstimmen.

Über den Wellenbereich hat man sich seit längerem geeinigt. Man bevorzugt fast immer Frequenzbänder im Ultrakurzwellengebiet. Sie sind sehr störungsarm. Außerdem bleibt die Reichweite von Ultrakurzwellen begrenzt; die Gefahr, andere Funkdienste zu beeinträchtigen, ist gering.

Das „Zauberwort“, das die reibungslose Zusammenarbeit von Transistor-Kleinstfunkgeräten ermöglicht, das ihre Zahl und ihre Einsatzmöglichkeiten rasch vervielfachen wird, heißt Standardisierung. Wenige Typen technisch aufeinander abgestimmter Transistor-Kleinstfunkgeräte, aus leicht auswechselbaren, in großen Serien herstellbaren Bausteinen aufgebaut, aus billigen Spannungsquellen gespeist – das ist die „verlängerte Stimme“, die unsere Volkswirtschaft braucht.

Transistor-Kleinstfunkgeräte, die allen diesen Forderungen nachkommen, gibt es noch nirgends auf der Welt. Zwar werden in kapitalistischen Ländern viele Typen von Kleinstfunkgeräten angeboten; will aber eine Baufirma, die mit Telefunkengeräten drahtlos telefoniert, ihren Gerätebestand ergänzen, so muß sie Telefunkengeräte dazukaufen, denn andere Anlagen „passen“ nicht. Fällt eine Baugruppe in einem Lorenz-Kleinstsender aus, so kann nur die Lorenz-Gesellschaft Ersatz liefern. Für die Hersteller der Geräte ist das zwar sehr gewinnbringend, für ihre Benutzer dagegen umständlich und teuer.

Immerhin gibt es unter den Transistor-Kleinstfunkgeräten des Auslandes Konstruktionen, die technisch gut durchdacht und ausgeführt sind. So entwickelte man in Schweden ein Transistorfunkgerät, das bis zu 5 km überbrücken kann. Das ist eine Reichweite, die meistens gar nicht verlangt wird. Trotzdem wiegt das Gerät mit allem Zubehör nur 400 g und findet in der Jackentasche Platz. Seine Bedienung ist denkbar einfach: Sobald der Stecker der Mikrophon- und Hörerzuleitung eingeführt wird, ist das Funkgerät betriebsbereit. Lediglich beim Übergang vom Empfang auf Senden und umgekehrt muß ein Schalthebel umgelegt werden. Das mit einer Gummischicht überzogene Gehäuse ist stofffest und wasserdicht. Die Stromversorgung übernimmt eine Spezialbatterie. Andere Länder haben ähnliche Geräte auf den Markt gebracht.





Alle Anwendungsmöglichkeiten für Transistor-Kleinstfunkgeräte aufzuzählen wäre nicht mehr möglich; wir müssen uns mit einer bescheidenen Auswahl begnügen.

Auf Baustellen ist ihr Einsatz nicht auf die Kräne beschränkt. Es wäre durchaus lohnend, alle Großmaschinen mit ihnen auszurüsten. Auch Transportfahrzeuge können wirkungsvoller geleitet werden, wenn sie jederzeit drahtlose Anweisungen entgegennehmen können. Vermessungstrupps, Reparaturbrigaden und Straßenwärter können durch Kleinstfunkgeräte viel Zeit sparen.

In der Landwirtschaft kann man eine drahtlose Verbindung zu den Feldbaubrigaden, zu Erntemaschinen, ja zu einzelnen Traktoren herstellen und dadurch unnütze Wege und Arbeitsunterbrechungen vermeiden. Bei Forstpflegearbeiten, beim Holzeinschlag und sogar auf der Jagd sind Kleinstfunkgeräte eine nicht zu unterschätzende Hilfe.

Lotsen, Verkehrspolizisten, Bergsteiger können sich jederzeit mit ihren Stützpunkten verständigen.

Späher, Posten, Streifen und Baurupps der bewaffneten Organe können Kleinstfunkgeräte bei sich führen.

Ein geschäftstüchtiger „Sportsfreund“ eines kapitalistischen Landes hat sogar schon einmal versuchsweise zwei Baseballmannschaften mit Miniaturempfängern ausgestattet, über die sie während des Spiels Anweisungen ihrer Trainer entgegennahmen. Jede Mannschaft benutzte eine andere Frequenz. Welche neuartigen „sportlichen“ Möglichkeiten ergäben sich, wenn dieses Beispiel Schule machte! Sicherlich würde die Mannschaft „Blau“ bald einen Störsender auf der Frequenz der Mannschaft „Rot“ strahlen lassen oder falsche Anweisungen dazwischenfunken; die eine Mannschaft würde versuchen, der anderen die Empfänger abzunehmen...

Ein sehr wichtiges Anwendungsgebiet für Transistor-Kleinstfunkgeräte sind Notfunkanlagen. Zu ihnen zählen vor allem Sender für Rettungsboote oder -flöße. Sie müssen an der Wasseroberfläche schwimmen und so robust sein, daß man sie von Deck in die See werfen kann. Jedermann muß sie bedienen können, ohne vorher eine Gebrauchsanweisung zu studieren. Sie sollen unter Umständen viele Stunden hintereinander in Betrieb sein, dürfen aber auch durch langes Lagern keinen Schaden nehmen. Neben Sendern, die von Schiffbrüchigen in Betrieb gesetzt werden können, gibt es Seenot-Funkbojen. Sie strahlen automatisch auf der internationalen Seenotfrequenz Hilferufe aus, sobald sie ins Wasser geworfen werden. Die Funkzeichen werden angepeilt und weisen den Helfern den Weg.

An Land können Notfunkgeräte von Forschern, Bergsteigern oder Jägern mitgeführt werden. In den skandinavischen Ländern wurde der „Notrufsender Diana“ bekannt. Er schaltet sich ein und sendet selbsttätig Notzeichen, sobald seine Stabantenne ausgezogen wird. Batterien versorgen ihn für 30 Stunden mit Strom. Bei zahlreichen schwedischen Bergrettungsposten wurden Spezialempfänger auf-



„Frühstücke!“



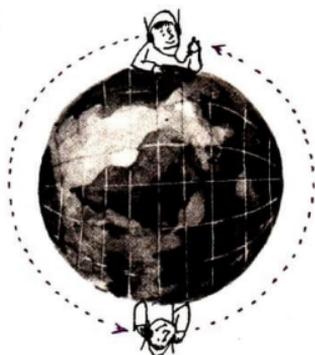
gestellt, die diese Notzeichen empfangen können. Auch Seenotstellen sind mit den Empfängern ausgerüstet, da zahlreiche Motorboote, Sportsegler und kleine Küstenfahrzeuge den Sender mit sich führen.

Notgelandete Flugzeuge oder Flugzeugwracks sind oft schwer zu entdecken, weil ihre Funkanlage zerstört wurde oder keine Zeit mehr blieb, sie zu bedienen. Um trotzdem Notrufe geben zu können, konstruierte man selbsttätige Notsender. Sie wiegen keine 2 kg und sind in eine etwa 60 cm · 60 cm große Tragfläche eingebaut, die am Leitwerk des Flugzeugs befestigt wird. Sobald die Maschine ein unnormales Verhalten zeigt, z. B. in steilen Sturzflug übergeht oder sich zu sehr auf die Seite legt, löst sich die Tragfläche und segelt mit dem Sender, der dabei Hilferufe ausstrahlt, zu Boden. Der Gleitwinkel ist so berechnet, daß der Sender die Erde zwar in Flugzeugnähe erreicht, aber soweit vom Wrack entfernt landet oder wassert, daß er weder durch einen Brand noch durch eine Explosion beschädigt werden kann.

Wir möchten auch noch – obwohl es sich nicht um Kleinstfunkgeräte im eigentlichen Sinne des Wortes handelt – die „Funkalarm-Anlagen“ nennen. Sie werden in den Wohnungen von Angehörigen der Feuerlöschpolizei oder von Hilfs- und Katastrophendiensten aufgestellt und bestehen entweder aus einem vollständigen Transistorempfänger oder aus einem mit Transistoren bestückten Zusatzgerät für Rundfunkempfänger. Bei Alarm werden von der Zentrale bestimmte Funksignale ausgestrahlt, die in der Wohnung eine Signalglocke auslösen.

Fast immer genügt es, wenn Transistor-Kleinstfunkgeräte eine Reichweite von einigen hundert Metern haben; für größere Entfernungen setzt man leistungsfähigere Funkanlagen ein. Wenn nötig, kann man aber auch mit Kleinstfunkgeräten erhebliche Distanzen überbrücken, wie das tragbare Funktelefon eines sowjetischen Ingenieurs beweist. Es ermöglicht Gespräche bis zu 80 km Entfernung; sie können sogar an das öffentliche Fernsprechnetz weitergeleitet werden.

Den Reichweitenrekord dürfte ein Funkamateurliegen, der in seinem selbstgebauten Transistor-Kleinstfunkgerät auf einmal Antwort von den Antipoden bekam. Allerdings waren daran weniger die Transistoren im Gerät „schuld“ als vielmehr die Eigenschaften der benutzten Kurzwellen, die es gestatten, unter bestimmten Voraussetzungen mit winzigen Sendeleistungen größte Entfernungen zu überbrücken.



## Maschinen, Schalter, Motoren

### Elektronik zwischen gestern und morgen

Wäre jemand vor dreißig oder fünfunddreißig Jahren auf die Worte „industrielle Elektronik“ gestoßen, hätte er wenig mit ihnen anfangen können. Nicht einmal der „Große Brockhaus“ hätte ihm Auskunft gegeben; er hatte den Elektronen zwar mehrere Spalten gewidmet, aber von „Elektronik“ oder von „industrieller Elektronik“ wußte er noch nichts.

Ein Leser von heute weiß, daß Maschinen, Aggregate, ganze Produktionseinrichtungen „elektronisch“ gelenkt und überwacht werden; er hat von „elektronischen Rechenmaschinen“ gehört, die schneller multiplizieren, dividieren, differenzieren, integrieren, Gleichungen lösen als ein Heer von Mathematikern, und er hat erfahren, daß in Leningrad U-Bahnzüge von „elektronischen Führern“ sicher gesteuert werden.

Die industrielle Elektronik, die „Wissenschaft und Technik von der Anwendung der elektronischen Bauelemente und Einrichtungen in der Produktion“, ist eines der jüngsten und vielversprechendsten Kinder der Technik. Aber sie ist ein bescheidenes Kind, das sich niemals nach vorn drängt.

Stets ist die industrielle Elektronik nur zuverlässiger Helfer; stets bleibt sie Mittel zum Zweck. Sie ersetzt komplizierte, energieverzehrende Getriebe; sie zählt, mißt, prüft und kontrolliert; sie sortiert, wiegt Rohstoffe ab und verpackt die fertigen Produkte; sie steuert Drehmaschinen, Bohrwerke, Papiermaschinen, Walzwerke und Taktstraßen; sie regelt Öfen, die Temperaturen chemischer Bäder, Beleuchtungsanlagen, den Straßen-, Schienen- und Luftverkehr; sie erhitzt, härtet, schweißt, lötet, trocknet und verleimt.

Ihre wichtigsten Bauelemente und Baugruppen hat die industrielle Elektronik der Hochfrequenztechnik entlehnt. Besonders die Verstärkerröhre war in fast allen elektronischen Geräten vertreten. Diese Röhre trägt aber auch die Schuld daran, daß man elektronischen Geräten zunächst mißtrauisch gegenüberstand. Es wäre überflüssig, die Mängel der Elektronenröhre hier noch einmal aufzuzählen. Sie sind uns bereits hinlänglich bekannt.

Man half sich, indem man Spezialröhren für die industrielle Elektronik schuf. Es sind Röhren, die man an die Wand werfen könnte, ohne ihnen zu schaden, und für die viele Tausende von Betriebsstunden garantiert werden. Gerade diese Eigenschaft ist sehr wertvoll; denn elektronische Geräte sind oft Tag und Nacht ununterbrochen in Betrieb, und ein Röhrenausfall könnte recht ernste Produktionsstörungen verursachen.

Allerdings besitzen selbst Spezialröhren einige Mängel: Wie normale Verstärkerröhren verbrauchen sie auch dann Strom, wenn sie nicht arbeiten, sondern nur in Betriebsbereitschaft gehalten werden sollen; auch sie entwickeln Wärme, die abgeführt werden muß und einer Verkleinerung der Geräte im Wege steht.



(die Ordnung!)

Wahrscheinlich hätten Stromverbrauch, Wärme und vor allem die Abmessungen der Geräte eines Tages dazu geführt, daß – wie es einmal ausgedrückt wurde – die Elektronik an sich selbst „erstickt“ wäre. Elektronische Geräte näherten sich in Abmessungen, Kosten und Energiebedarf immer mehr den Anlagen, die sie steuern sollten; entfielen doch bei modernen Produktionseinrichtungen oft 60% des Preises auf die elektronische Ausrüstung.

Gerade zum rechten Zeitpunkt entstand die Halbleitertechnik. War die industrielle Elektronik von gestern ausschließlich auf Elektronenröhren und ihnen verwandte Bauelemente angewiesen, so finden wir gegenwärtig Röhren und Halbleiterbauelemente nebeneinander. Im Bereich geringer elektrischer Leistungen neigt sich das Zünglein der Waage bereits auf die Seite der Halbleiter, während bei großen elektrischen Leistungen vorläufig noch Elektronenröhren und ihre Verwandten, die „Ionenröhren“, das Feld beherrschen.

### Schalter ohne Funken

Schalter und ihre Kontakte sind seit jeher Sorgenkinder der Elektrotechnik. Ihre Unarten zeigen sie bereits im Lichtnetz unserer Wohnung: Wird der Knebel eines Schalters gedreht oder umgelegt, knackt es im Radio. Der Funken, der beim Schließen oder Öffnen der Kontakte auftritt, sendet störende Radiowellen in den Raum und längs der Lichtleitungen.

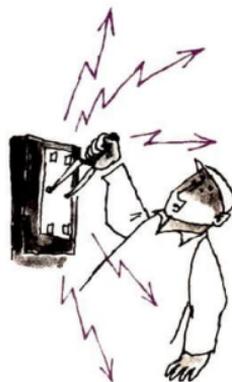
Es geschieht aber noch viel mehr. Durch die Hitze der Funken verbrennen die Schalterkontakte allmählich an der Oberfläche; wir können das an einem auseinandergenommenen Schalter leicht erkennen.

Schmutz und Staub, die sich im Laufe der Zeit zwischen den Kontakten ansammeln, sind gleichfalls unangenehm. Sie setzen, ebenso wie die „Brandstellen“, das elektrische Leitvermögen der Kontaktstellen herab. Dadurch können erhebliche Spannungsverluste eintreten. Der Rundfunkempfänger, der nicht mehr spielt, weil die Wellenschalterkontakte verschmutzt sind, ist wohl das bekannteste Beispiel hierfür.

Bei stärkeren Strömen kann durch den hohen Widerstand eines verbrannten oder verschmutzten Kontaktes ein Brand entstehen; der Funken erlischt nicht, sondern verwandelt sich in einen „Lichtbogen“, dessen Hitze den Schalter zerstört.

Bei industriellen elektrischen Anlagen machen sich die Schwächen der Schalter und ihrer Kontakte besonders deutlich bemerkbar. Da meistens viel höhere Stromstärken als im Lichtnetz unserer Wohnung zu schalten sind, ist die Wirkung der Kontaktfunken entsprechend größer. In manchen Betrieben läßt sich ein Verschmutzen der Kontakte nicht vermeiden, in anderen wieder könnten Schaltfunken eine Explosion hervorrufen.

Es kommt hinzu, daß Schaltkontakte in der Industrie meistens viel



öfter betätigt werden als ein Lichtschalter. Schaltkontakte in Schweißautomaten, in Fernsprechämtern, in Rechenmaschinen, an Automatenstraßen müssen viele Hunderttausende von Schaltungen aushalten, und oft ist die Schaltgeschwindigkeit so groß, daß Schaltungen und mechanische Kontakte nicht mehr mitkämen. Zwar werden für die meisten Schaltelemente einige Millionen Schaltvorgänge garantiert, aber trotzdem sind Schaltelemente meistens viel kurzlebiger als die übrigen Bauteile, mit denen sie in Geräten vereint sind.

Bedenken wir endlich, daß in Steuer- und Regelgeräten nicht selten Tausende von Schaltkontakten notwendig sind – bereits in manchen automatisch gesteuerten Personenaufzügen sind es über 5000 –, daß aber das Ausfallen eines Kontaktes die gesamte Anlage außer Betrieb setzen kann, so werden wir verstehen, daß man seit langem bestrebt ist, funkenfreie, schmutzsichere, „schnelle“, verschleißfeste, kurz: kontaktlose Schaltelemente zu finden.

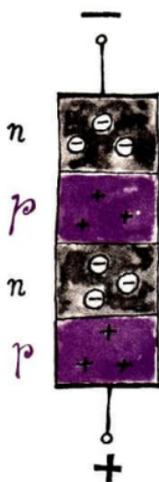
Was verlangen wir von einem Schalter? In der Stellung „ein“ soll er den elektrischen Strom ungehindert durchfließen lassen; in der Stellung „aus“ soll er den Stromfluß verhindern und dem Strom einen „unendlich großen“ Widerstand entgegensetzen. Außerdem soll das Umschalten, das Übergehen von „aus“ auf „ein“ und umgekehrt, möglichst wenig Zeit erfordern.

Diese Bedingungen lassen sich aber nicht nur mit Kontakten, sondern auch mit Halbleiterbauelementen erfüllen. Eine Diode besitzt in Durchlaßrichtung einen sehr niedrigen Widerstand; das ähnelt einem Schalter in der Stellung „ein“. Ihr Widerstand in Sperrrichtung ist sehr hoch; das entspricht einem Schalter in der Stellung „aus“. Auch die Zenerdiode verhält sich fast wie ein Schalter: Bis zu einer bestimmten Spannung ist ihr Widerstand sehr groß (Schalterstellung „aus“); bei Überschreiten der „Zenerspannung“ wird ihr Widerstand sehr klein (Schalterstellung „ein“).

Tatsächlich kann man in vielen Geräten Schaltkontakte durch Dioden ersetzen. Es gibt seit einiger Zeit sogar Spezialdioden, die ausschließlich als „Schalter“ Verwendung finden. Bekannt wurde die „Vierschichtdiode“. Sie wird aus einem Siliziumeinkristall mit der Schichtenfolge n-p-n-p hergestellt. Ihr Widerstand in Stellung „aus“ ist etwa 5 000 000mal größer als in Stellung „ein“, sie kommt damit dem „idealen Schalter“ (Widerstand unendlich groß – kein Widerstand) nahe.

Transistoren können nicht nur als Schalter, sondern gleichzeitig auch als Relais dienen und mit sehr geringen elektrischen Leistungen weit größere Leistungen steuern. Die sogenannten Schalttransistoren sind für solche Aufgaben besonders geeignet.

Zählen wir rasch einmal auf, was mit Halbleiterschaltern gewonnen wird: Es gibt bei ihnen keine bewegten Kontakte, keine Funken und keinen Verschleiß. Wenn man sie nicht überlastet, sind sie so gut wie „unsterblich“. Sie brauchen außerdem viel weniger Platz als die herkömmlichen Schalter und sind robuster als diese. Vor



allem aber sind sie ihren „mechanischen Geschwistern“ an Schnelligkeit überlegen. Während ein mechanischer Schalter es nicht einmal auf wenige hundert Schaltungen je Sekunde bringt, können sie in einer Sekunde viele Tausende von Schaltungen ausführen.

Gerade dieses hohe Arbeitstempo wird in der „Impulstechnik“ verlangt. Ihre Aufgabe ist es, Geräte und Apparate mit Hilfe sehr kurzer Strom- und Spannungstöße zu steuern und zu regeln.

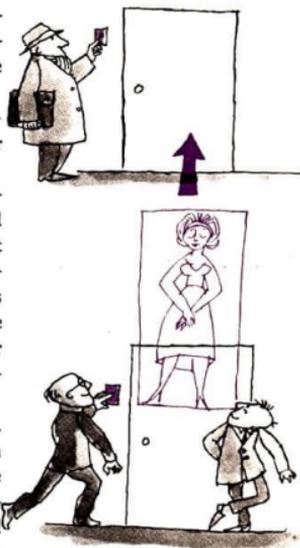
Das klingt geheimnisvoll, ist uns allen aber eigentlich längst geläufig: Damit auf dem Bildschirm des Fernsehempfängers ein Bild entsteht, muß ein Elektronenstrahl in rasender Geschwindigkeit Zeile für Zeile über den Bildschirm geführt werden: In jeder Sekunde sind fast 16 000 Zeilen zu „schreiben“. Der Rhythmus des Schreibens muß bis auf Bruchteile von Millionsteln einer Sekunde eingehalten werden. Das ist nur möglich, indem der Empfänger vom Sender Steuerimpulse auffängt, die den Elektronenstrahl jeweils um eine Zeile weiterrücken.

Auch bei jedem Telefongespräch begegnet uns die Impulstechnik. Drehen wir die Wählerscheibe, so werden bei ihrem Zurücklaufen Stromimpulse über die Leitungen geschickt. Im Fernamt geben sie die Kommandos, nach denen die gewünschte Verbindung selbsttätig hergestellt wird. Durch die Baustufen von Radargeräten und elektronischen Rechenmaschinen eilen in jeder Sekunde Tausende von Impulsen. Sie reisen auch an Überlandleitungen entlang und überwachen Kraftwerke und Energienetze.

Die Bedeutung der Impulstechnik wächst von Jahr zu Jahr. Ihre Entwicklung könnte ohne Halbleiterbauelemente kaum vorangetrieben werden.

Sehr oft ist es erforderlich, in elektrischen oder elektronischen Anlagen mehrere Schaltfunktionen miteinander zu verknüpfen. Das ist z. B. bei einem Fahrstuhlmotor der Fall, der von drei Stockwerken aus geschaltet werden soll. Ein weiteres, komplizierteres Beispiel sei noch angeführt: In Ölheizungsanlagen wird beim Verlöschen der Flamme selbsttätig die Brennstoffförderung abgestellt. Nach einer Sicherheitspause wird erneut gezündet. Schlägt der Zündversuch fehl, wird die Anlage blockiert; gleichzeitig werden Alarmsignale gegeben. Hier greifen schon mehrere Schaltungsvorgänge ineinander über. Ähnliche Beispiele gibt es in Hülle und Fülle in der Industrie, im Verkehrswesen und an anderer Stelle.

Man hat diese Vorgänge untersucht und festgestellt, daß sich auch die kompliziertesten Schaltungsvorgänge auf eine Reihe einfacher Grundoperationen zurückführen lassen. Konstruiert man Schaltungseinheiten für diese Grundoperation, so kann man aus diesen Bausteinen Schaltanlagen für die verschiedensten Zwecke zusammenstellen. In mehreren Ländern wurden bereits Bausteinsysteme für Steuerungs- und Schaltanlagen entwickelt. Sie verwenden fast durchweg Halbleiterbauelemente als „Schalter“. Dadurch ist man nicht nur der Sorgen mit Kontakten ledig, sondern man spart Raum, Energie und Herstellungskosten, während die Anlagen an





Zuverlässigkeit gewinnen. Zur Verwirklichung der Grundfunktion ODER (der Motor wird von der ersten *oder* der zweiten *oder* der dritten Stelle eingeschaltet) brauchte man in Schaltanlagen bisher drei Relais mit mindestens je einem Schaltkontakt. Heute wird die gleiche Funktion von einem Baustein ausgeübt, der drei Dioden und einen Widerstand enthält. Die Bausteine für andere Grundfunktionen sind ähnlich einfach.

Dem volkseigenen Elektro-Apparate-Werk Berlin-Treptow gebührt der Ruhm, für unsere Industrie mit den TRANSLOG-Bausteinen ein Baukastensystem für „kontaktlose“ Steuerungen und Schaltungen geschaffen zu haben. Die einzelnen Bausteine sind etwa so groß wie eine Zigarettenschachtel. Sie enthalten Dioden und Transistoren sowie einige andere Bauelemente und können mit einem Griff ausgewechselt werden. Die Bausteine lassen sich vielfältig kombinieren, so daß mit dem TRANSLOG-System auch die kompliziertesten Schalt- und Steueraufgaben zu lösen sind.

### Die Stromstärke steigt

Immer wieder nahm die industrielle Elektronik Anleihen bei der Hochfrequenztechnik auf. Die meisten der Steuer- und Regeleinrichtungen ließen sich aus Bauelementen zusammensetzen, die ihre Bewährungsprobe in der Funk- und Nachrichtentechnik längst bestanden hatten.

Die Grenze dieses Vorgehens lag dort, wo größere Stromstärken zu verarbeiten waren; denn die Elektronenröhre ist, wenn sie nicht unhandlich und sehr teuer werden soll, nur für Ströme geeignet, die  $\frac{1}{10}$  A nicht wesentlich überschreiten.

Gerade die Regelung größerer Stromstärken war aber eine Hauptaufgabe der industriellen Elektronik. Man konnte sich nicht mehr damit begnügen, den Antrieb von Werkzeugmaschinen oder anderen Aggregaten ein- und auszuschalten, sondern man wollte Drehzahl und Leistung der Motoren in weiten Grenzen stetig verändern; an anderer Stelle, etwa bei elektrischen Bahnen, Kränen und Fördereinrichtungen, verlangte man, daß Motoren ihre Drehzahl unabhängig von der jeweiligen Belastung beibehielten; Mechanisierung und Automatisierung forderten schließlich immer dringender, daß Motoren nach einem bestimmten, vorgegebenen Plan ganze Arbeitsprogramme mit verschiedenen Drehzahlen und Leistungen selbsttätig erledigten. Das alles ließ sich, wenn man nicht erhebliche Energieverluste und sehr störanfällige Schaltgeräte in Kauf nehmen wollte, nur mit Hilfe der industriellen Elektronik bewerkstelligen. Dazu aber war es erforderlich, auch Ströme von vielen Ampere elektronisch zu regeln.

Die elektrische Schweißtechnik verlangte Schalt- und Regeleinrichtungen, die Ströme von Hunderten von Ampere exakt steuern konnten und Zeitspannen von tausendstel Sekunden pünktlich einhielten. Hierbei traten die Nachteile elektromechanischer Schalt-

und Steuergeräte besonders unangenehm in Erscheinung. In Elektrowärme- und Beleuchtungsanlagen konnten sich elektromechanische Schalt- und Steuerglieder ebenfalls nicht auf die Dauer behaupten.

Spezielle Bauelemente für die industrielle Elektronik wurden entwickelt, vor allem die sogenannten Ionenröhren, das „Thyratron“, das „Excitron“, das „Ignitron“, das „Senditron“ und wie sie alle heißen. Es sind Röhren, in denen nicht allein Elektronen, sondern auch elektrisch geladene Gasatome, Ionen, wirksam sind. Durch die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Ionen wird es möglich, Ströme zu steuern, die den Strom, der durch Elektronenröhren gesteuert werden kann, um ein Vielfaches übertreffen.

Ionenröhren sind an sich Gleichrichter. Sie lassen elektrischen Strom nur in einer Richtung passieren. Das ist kein Mangel; im Gegenteil: Motoren, die Drehzahl und Leistungen in weitem Bereich ändern und den verschiedensten Betriebsbedingungen angepaßt sein sollen, werden am besten mit Gleichstrom gespeist. Bei vielen anderen Anwendungen ist es ebenso. Freilich wäre das noch kein Grund, Ionenröhren einzusetzen; denn Gleichrichter stellt die Technik, nicht zuletzt die Halbleitertechnik, in vielerlei Ausführungen und Leistungsfähigkeit zur Verfügung.

Ionenröhren sind jedoch nicht nur Gleichrichter schlechthin, sondern „steuerbare“ Gleichrichter. Legen wir an ihre „Steuerelektrode“ entsprechende Spannungen oder führen wir dieser Elektrode elektrische Impulse zu, so können wir mit den Röhren schwache oder starke Ströme steuern, ganz wie es verlangt wird. Außerdem läßt sich die Stromstärke nicht nur in großen Stufen umschalten, sondern stetig regeln. Obwohl man auf diese Weise sehr starke Ströme beherrscht, bleiben die Energieverluste verhältnismäßig gering.

Die Steuerspannungen und -impulse für Ionenröhren wurden anfänglich mit Hilfe von Elektronenröhren erzeugt. An ihre Stelle treten in jüngster Zeit mehr und mehr Halbleiterbauelemente. Damit entsteht ein Widerspruch: Auf der einen Seite finden wir die kleinen, robusten Halbleiter, auf der anderen tausendfach größere, Wärme entwickelnde und Heizstrom verbrauchende Ionenröhren.

Man nahm diesen Widerspruch nicht hin, sondern suchte nach Halbleiterbauelementen, die die Ionenröhren ersetzen, ja vielleicht übertreffen können. Ein solches Bauelement wurde in den vergangenen Jahren bereits geschaffen. Man nennt es „Halbleiterthyatron“, „Festkörperthyatron“, „Trinistor“ oder auch „gesteuerten Siliziumgleichrichter“.

Das Halbleiterthyatron besteht aus einer Folge von vier Schichten verschiedenen Leitfähigkeitstypus: p-n-p-n. Während aber die nach dem gleichen Schema aufgebaute Vierschichtdiode nur zwei Anschlüsse aufweist, kommt beim Festkörperthyatron ein dritter hinzu. Er führt zur „inneren“ p-Schicht, der „Torelektrode“. Wie beim Halbleitergleichrichter gibt es beim Halbleiterthyatron eine Sperr- und eine Durchlaßrichtung. Im Gegensatz zum Halbleiter-

gleichrichter läßt das Halbleiterthyatron aber in der Durchlaßrichtung erst dann Strom durch, wenn an seine äußeren Anschlüsse eine „Umschaltspannung“ von mehreren hundert Volt gelegt wird.

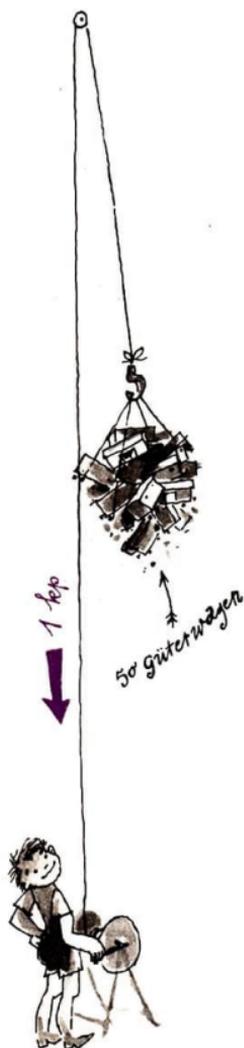
Dieses Verhalten ändert sich, wenn die Torelektrode durch eine Spannung von wenigen Volt gegenüber dem benachbarten n-Gebiet positiv elektrisch gemacht wird. Es ist tatsächlich, als sei ein sperrendes Tor aufgestoßen worden: Die Umschaltspannung sinkt auf einen Bruchteil ihres bisherigen Wertes; in Durchlaßrichtung fließt ein kräftiger Strom durch das Halbleiterthyatron, während es in Sperrichtung den Stromfluß nach wie vor verriegelt. Wie weit die Umschaltspannung sinkt, hängt von der Steuerspannung an der Torelektrode ab. Sie öffnet das „Tor“ für den elektrischen Strom mehr oder weniger weit.

Damit ist die Wirkungsweise des Halbleiterthyatrons bereits erklärt. Verbinden wir es mit einer Wechselspannungsquelle, so richtet es den Wechselstrom gleich. Wie stark der fließende Strom wird, hängt von der Steuerspannung an der Torelektrode ab.

Halbleiterthyatrone steuern gegenwärtig Stromstärken um 25 A. Für die Regelung zahlreicher Motoren – zum Beispiel an Werkzeugmaschinen – reicht das meistens aus. Die „Steuerleistung“ ist im Verhältnis zur geschalteten Leistung sehr gering. Eine Leistung von wenigen Tausendstel eines Watts an der Torelektrode genügt, um Leistungen von mehreren Kilowatt zu regeln. Das ist ein ähnliches Verhältnis, als wenn wir mit einer Kraft von 1 kp mit Hilfe einer Winde die Ladung von fünfzig Güterwagen heben.

Das Halbleiterthyatron ist nicht nur ein vollwertiger Ersatz für das Ionenröhrenthyatron. In einigen Punkten ist es ihm sogar überlegen. Der Wirkungsgrad ist höher; die entstehende Wärme bleibt geringer und kann leichter abgeführt werden. Ein Ionenröhrenthyatron muß, ehe es steuern kann, vorgeheizt werden. Das Halbleiterthyatron dagegen benötigt keine Heizung. Es ist jederzeit betriebsbereit und verbraucht während der Betriebspause keine Elektroenergie. Auch „reagiert“ es schneller als das Ionenröhrenthyatron. Selbst bei raschesten Schaltfolgen versagt es nicht. Vor allem besitzt das Halbleiterthyatron gegenüber dem Ionenröhrenthyatron unverkennbare Vorteile durch Gewicht, Abmessungen und Robustheit. Man hat vollständige Regelgeräte mit Festkörperthyatronen konstruiert, die nicht größer sind als ein Thyatron in einem Gerät herkömmlicher Bauweise.

Daß Halbleiterthyatrone zur Zeit noch sehr teuer sind, wird ihren Einsatz auf die Dauer nicht behindern; auch die ersten Halbleitergleichrichter und Transistoren wurden mit Gold aufgewogen. Es ist anzunehmen, daß der Transistor und seine Nachfolger eines Tages nicht nur die Ionenröhren ersetzen, sondern daß sich durch sie der elektronischen Regel- und Steuertechnik auch Möglichkeiten erschließen werden, die ihr bisher wegen der Abmessungen und des Stromverbrauchs der Ionenröhren versagt bleiben mußten.



## Im Labyrinth der Verbindungen

### Telefonieren wir einmal!

Der Fernsprecher ist rund sechsmal älter als die Halbleitertechnik. Er wurde an jenem denkwürdigen Oktobertag des Jahres 1861 geboren, an dem der Lehrer Philipp Reis (1834 bis 1874) sein Telefon der Öffentlichkeit vorstellte. Zwar vergingen noch Jahrzehnte, ehe Fernsprechnetze die Kontinente überspannten, aber immerhin konnte man nach allen größeren Orten der Welt telefonieren, lange bevor auch nur jemand ahnte, daß Germanium, Silizium und einige andere Stoffe einst eine neue Epoche der Elektro- und Nachrichtentechnik einleiten würden.

Es sah daher zunächst nicht so aus, als könne die alte Fernsprechertechnik viel von der noch jungen Halbleitertechnik profitieren. Doch weit gefehlt! Die Halbleiter schicken sich an, auch beim Telefon „dabei“ zu sein.

Fernsprecher stehen oder hängen in vielen Millionen Räumen. Werden wir angerufen, klingelt es – laut, durchdringend, nicht gerade angenehm; nicht ohne Grund heißt die Klingel im Fernsprecher „Wecker“. Wir fahren zusammen, der Kollege am Nebentisch schrickt von seiner Arbeit hoch. Muß das sein? Wäre es nicht möglich, das schrille Schellen durch einen musikalischeren Ton zu ersetzen?

Mit einem Transistor und einem billigen Kleinlautsprecher kann man einen elektronischen Summer konstruieren, der viel weniger Strom verbraucht als der Wecker. Die Tonhöhe läßt sich persönlichen Wünschen anpassen; die Lautstärke ist einstellbar und wird so reguliert, daß sie für die Umgebung, in der der Apparat steht, gerade ausreicht. Der Fernsprecher auf dem Schreibtisch summt leise, der in der Werkstatt oder auf dem Nachtschränchen lauter.

Um Leitungs- und Installationsmaterial zu sparen, möchte man häufig mehrere Fernsprecher – zum Beispiel sämtliche Apparate einer Betriebsabteilung – an *eine* Leitung zur Zentrale anschließen. Das hat jedoch nur Sinn, wenn es trotzdem möglich ist, einen Teilnehmer zu rufen, ohne daß die anderen gestört werden. Diese Bedingung wird durch eine einfache Transistorschaltung in den Fernsprechern erfüllt; sie ruft den Teilnehmer nur beim Empfangen einer ganz bestimmten, von Apparat zu Apparat verschiedenen Ruffrequenz an den Fernsprecher. Über die Leitung wird dazu jeweils die Ruffrequenz des Apparates geschickt, mit dem eine Verbindung gewünscht wird. Anlagen, bei denen sechs bis acht Teilnehmer über eine gemeinsame Leitung mit der Vermittlung verbunden sind, arbeiten seit mehreren Jahren.

Man versucht auch, die übliche Wählerscheibe durch Tasten zu ersetzen, die den Ziffern der Scheibe entsprechen. Werden die Tasten, der Rufnummer des gewünschten Teilnehmers entsprechend, gedrückt, so sendet eine Transistorschaltung eine Kombina-





tion von Tonfrequenzen zur Vermittlung, die automatisch die Verbindung herstellt. Man braucht nur noch die Hälfte der Zeit zum Wählen; außerdem ergeben sich technische Vorteile für den Aufbau und die Arbeitsweise der Fernsprechzentrale.

Bei Telefongesprächen aus lärmgefüllten Räumen verstehen wir trotz gespannter Aufmerksamkeit meistens nicht alles; Sätze oder Namen müssen wiederholt werden, Hörfehler bleiben nicht aus. Der naheliegendste Ausweg ist, solche Fernsprecher mit einem zusätzlichen Verstärker auszurüsten. Röhrenverstärker scheiden wegen ihrer Abmessungen und wegen ihres Stromverbrauchs aus. Ein Transistorverstärker hingegen kann im Gehäuse des Fernsprechers mit untergebracht werden und verbraucht so wenig Strom, daß er ohne zusätzliche Spannungsquelle aus der Fernleitung gespeist werden kann. In Fernsprechern für Werkhallen, Geschäftsräume und Bahnhöfe, aber auch in Apparaten, die von Schwerhörigen benutzt werden, können solche zusätzlichen Verstärker sehr wertvoll sein. Eine in England entwickelte Ausführung eines Fernsprecherverstärkers wird einfach auf die Hörmuschel des Handapparates gesteckt.

Das in Fernsprechern übliche Kohlemikrofon ist, was seine Wiedergabequalität betrifft, alles andere als ideal. Trotzdem mußte man es bis in die jüngste Zeit fast ausschließlich einsetzen, weil andere, hochwertigere Mikrofontypen zu geringe Spannungen abgeben. Die Kombination Transistorverstärker-hochwertiges Mikrofon beseitigt diesen Nachteil. Man braucht dazu nicht einmal viel am Fernsprecher oder an der Fernsprechanlage zu verändern. Mikrofon und Verstärker sind sehr klein und so konstruiert, daß sie gegen das Kohlemikrofon ausgetauscht werden.

Der nächste Schritt führt zum „Freispreche-Telefon“, dessen Benutzer nicht mehr auf den Handapparat angewiesen ist, sondern von jeder Stelle des Zimmers aus telefonieren kann. Der Freisprechteil, bestehend aus Mikrofon, Lautsprecher und zwei Transistorverstärkern, ist im Tischgerät mit eingebaut. Drückt man einen Knopf, kann man in gewohnter Weise mit dem Handapparat sprechen.

Selbst die Halbleiterdiode hilft uns telefonieren. Man schaltet sie als „Knallschutz“ über den Stromkreis des Fernhörers; sie dämpft alle Störgeräusche, die eine bestimmte Lautstärke überschreiten.

### Hallo, Fernamt!

Ferngespräche über Hunderte und Tausende von Kilometern wurden erst möglich, nachdem die Verstärkerröhre erfunden worden war. Im ersten Weltkrieg entstanden zunächst recht unzuverlässige Fernsprecherverstärker. Sie wurden in bestimmten Abständen in Fernleitungen eingefügt. In den folgenden Jahren nahmen Betriebssicherheit und Leistungsfähigkeit der Verstärker rasch zu. Eine Schwäche der Fernsprechtechnik ließ sich anfänglich nicht beseitigen: Auf Fernleitungen konnte immer nur *ein* Gespräch ge-

führt werden. Damit wäre ein Hauptvorteil des Fernsprechers, die Zeitersparnis, bald hinfällig geworden; denn unerträgliche Wartezeiten bis zur Vermittlung eines Gesprächs hätten sich nicht vermeiden lassen. Man überlege sich einmal, was es bedeuten würde, wenn zwischen Dresden und Leipzig im Laufe von 24 Stunden nur 480 Dreiminutengespräche geführt werden könnten!

Man mußte nach Möglichkeiten suchen, auf einer Leitung oder auf einem Kabel zehn, fünfzig, besser noch Hunderte von Gesprächen gleichzeitig zu führen. Die Zahl der Leitungen entsprechend zu vervielfachen ging nicht an; der technische Aufwand wäre untragbar gewesen; denn nicht nur die Menge des Leitungs- und Installationsmaterials, sondern auch die Zahl der Verstärker und aller übrigen technischen Einrichtungen würde sich entsprechend vermehren müssen. Es wäre ähnlich, als wollte man auf vielbefahrenen Bahnstrecken jedem Zug ein besonderes Gleis mit Signaleinrichtungen, Weichen und Bahnsteigen zubilligen.

Die Möglichkeit, zahlreiche Gespräche auf einer Leitung gleichzeitig zu übertragen, brachte die „Trägerfrequenztechnik“. Sie arbeitet mit Hochfrequenzschwingungen, wie sie sonst in der Funktechnik verwendet werden. Die Schwingungen laufen als Hochfrequenzströme durch die Kabel und „tragen“ die Mikrofonspannungen zahlreicher Gespräche, ähnlich wie uns Radiowellen Musik- oder Sprachfrequenzen ins Haus bringen. Je breiter das Frequenzband der Hochfrequenzströme ist, desto mehr Gespräche lassen sich darin „verpacken“. Das gleichzeitige Übertragen von 60 oder 120 Sprachkanälen ist heute eine alltägliche Sache, und zahlreiche Fernkabel bieten bereits „Platz“ für beinahe tausend Gespräche.

Je breiter aber das Frequenzband ist, desto dichter müssen die Verstärker zusammenrücken. Bereits bei 60 Sprachkanälen muß man alle 18 km, bei 120 Kanälen alle 9 km verstärken; erhöht man die Zahl der Sprachkanäle noch mehr, so sinkt der Verstärkerabstand auf wenige Kilometer. Außer den Zwischenverstärkern „auf der Strecke“ sind am Anfang des Kabels, wo die einzelnen Gespräche in das Hochfrequenzband umgesetzt werden, umfangreiche Verstärkereinrichtungen ebenso nötig wie am Ende, wenn die einzelnen Sprachkanäle wieder getrennt werden.

Alle diese Verstärker enthalten Röhren; sie brauchen Strom und müssen untergebracht werden. In dicht besiedelten Gegenden ist das noch möglich; doch sobald man Fernkabel durch Einöden oder durch das Meer führt, wird die Aufstellung der Verstärker und ihre Stromversorgung sehr schwierig. Zum Beispiel mußte man in das Unterseekabel zwischen Neufundland und Schottland über fünfzig Verstärker einspleißen und auf den Meeresgrund versenken. Die Verstärker werden von den Endstellen des Kabels mit Strom versorgt; man hofft, daß ihre Röhren länger als zwanzig Jahre ihre Pflicht tun werden. So bewundernd wir vor dieser technischen Großtat stehen – eine Ideallösung ist sie gewiß nicht. Wir



brauchen nur daran zu denken, wie schwierig und kostspielig eine Reparatur wäre! Stromversorgung und Bau der Verstärker wären einfacher gewesen, wenn man statt der Röhren Transistoren verwendet hätte; aber als das Kabel projektiert und ausgelegt wurde (im Herbst 1956 war es betriebsbereit), hatte man noch nicht genügend Erfahrungen gesammelt, um Transistoren für diese spezielle Aufgabe einsetzen zu können.

Inzwischen sind Transistoren auch für die Verstärker der Fernsprech-Weitverkehrstechnik anwendbar geworden. Bei Zwischenverstärkern und Endverstärkern in Fernsprechämtern treten ihre Vorzüge deutlich in Erscheinung: Der Stromverbrauch mancher Geräte sinkt auf ein Zehntel, der Raumbedarf auf ein Viertel oder weniger. Transport und Aufstellung der Verstärker werden erleichtert, die Wartungs- und Unterhaltungskosten bleiben niedrig. Für Zwischenverstärker in Fernkabeln sind keine besonderen Baulichkeiten mehr nötig. Man schließt die Verstärker in luft- und feuchtigkeitsdichte Behälter ein und versenkt sie in gleichmäßigen Abständen entlang der Kabelstrecke. Der immer gleiche Abstand von Verstärker zu Verstärker macht es möglich, die Anlagen bereits im Herstellungsbetrieb auf ihre elektrischen Daten einzustellen. Die Montage „auf der Strecke“ wird dadurch bedeutend billiger und erfordert weniger Zeit.

Die Speisespannung wird den Verstärkern über das Kabel zugeführt. Da Transistoren mit sehr geringen Strömen arbeiten, bereitet das keinerlei Schwierigkeiten.

Auf Freileitungen kann man Verstärker an die Masten schrauben. Sie sind damit leicht zu kontrollieren und zu reparieren. In sonnigen Gegenden kann eine Sonnenbatterie vorgesehen werden, die zusammen mit einem Pufferakkumulator den Verstärker speist.

Wir sehen, es spricht viel dafür, in Fernsprechverstärkern die Röhren gegen Halbleiterbauelemente auszutauschen. Daß dieser Tausch sich bisher nur sehr langsam anbahnt, scheint vielleicht auf den ersten Blick erstaunlich. Aber der gewaltige Gerätepark eines weitverzweigten Fernsprechnetzes kann nicht von heute auf morgen auf Halbleiter umgestellt werden. Das ergibt sich einmal aus der Zahl der Geräte, zum anderen daraus, daß eine solche Umstellung für einen längeren Zeitraum zukunftsicher sein muß. Man weiß jedoch noch nicht genug über die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit von Halbleiterbauelementen, um eine allgemeine Umstellung vornehmen zu können, und es wäre aus wirtschaftlichen Gründen einfach nicht vertretbar, aller zwei oder drei Jahre große Summen zu investieren, um jeweils den „letzten Schrei“ der Technik sofort zu berücksichtigen. Hier möge uns wieder der Schienenverkehr als Vergleich dienen: Man kann ihn nicht auf einmal elektrifizieren oder auf eine günstigere Spurweite umstellen. Stets ist eine Übergangsperiode notwendig, in der „das Alte“ und „das Neue“ nebeneinander bestehen und reibungslos zusammenarbeiten müssen.



*unmodern* →

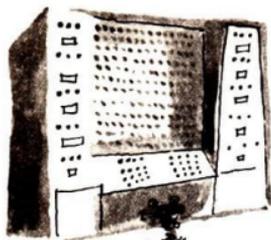
Die Halbleitergeräte müssen sich also für einige Zeit mit den bisherigen Röhrengeräten „vertragen“. Der Halbleitertechniker ist deshalb gezwungen, gewisse Kompromisse einzugehen; er kann noch nicht alle Vorteile der Transistoren und Dioden voll ausschöpfen. Das ändert jedoch nichts daran, daß auch die Zukunft der Fernsprechtechnik den Halbleitern gehört. Bei der Projektierung *neuer* Fernsprechnetze wird man sich schon in naher Zukunft ganz auf die Halbleitertechnik orientieren. Halbleiterbauelemente werden dabei nicht nur die Elektronenröhren der Verstärker verdrängen, sondern auch die meisten anderen der gegenwärtig in Fernsprechämtern notwendigen Bauelemente.

Zur Zeit gibt es in jedem Fernsprechamt noch Tausende von Kontakten in Wählern und Relais. Sie sind wie alle mechanischen Kontakte störanfällig und besitzen eine nur begrenzte Arbeitsgeschwindigkeit. Im Fernamt von morgen werden Relais und Wähler nicht mehr anzutreffen sein. Elektronische Bausteine, „kontaktlose“ Schalteinheiten, die zu beliebig umfangreichen Anlagen zusammenstellbar sind, werden blitzschnell freie Verbindungswege heraussuchen, den Gesprächspartner an den Apparat rufen und die Gebühren berechnen. Das „Fräulein vom Amt“ wird eine abwechslungsreichere, produktivere und weniger „nervtötende“ Tätigkeit ausüben; Reparaturen werden selten sein und die Wartungsarbeiten auf ein Minimum beschränkt bleiben; denn die Lebensdauer der Bauelemente wird sich vervielfachen.

Es wird eines Tages selbstverständlich sein, Fernsprechteilnehmer in der ganzen Welt ohne lange Wartezeit zu erreichen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß wir nach dem Drücken von Wählrasten nicht nur die Stimme unseres Partners hören, sondern auch sein Gesicht auf dem Bildschirm sehen. Das „Videotelefon“, vor mehr als zwanzig Jahren versuchsweise betrieben und jüngst in verbesserter Qualität durch sowjetische Ingenieure wieder eingeführt, könnte Allgemeingut der Menschheit werden.

Anfänge auf dem Wege zur vollelektronischen Fernsprechtechnik gibt es bereits. Schon vor fünf Jahren wurde in Paris die erste europäische Fernsprechvermittlung auf Halbleiterbasis vorgeführt. Wenn sie auch nur für eine sehr begrenzte Teilnehmerzahl ausgelegt war, so zeigte sie doch überzeugend, daß das neue, „kontaktlose“ System funktionierte. Die für zwanzig Teilnehmer gedachte Vermittlung war mit Verstärkern und allem Zubehör in einem Gehäuse von der Größe eines Rundfunkempfängers untergebracht. Sie entnahm dem Stromversorgungsnetz nicht mehr Energie als eine 100-Watt-Glühlampe. Dieser Energieverbrauch erklärt sich teilweise sogar nur daraus, daß man zwar eine Vermittlung auf Halbleiterbasis, aber „gewöhnliche“ Fernsprechapparate verwendete. Würde man auch in den Fernsprechern selbst Halbleiterbauelemente einsetzen, so ließe sich der Energiebedarf weiter senken. Einige größere Anlagen dieser Art laufen gegenwärtig im Versuchsbetrieb.





## Adam Ries – elektronisch

Elektronische Rechenmaschinen sind in den vergangenen Jahren fast „Wunderkinder“ der Technik geworden. Sie haben sich als so vielseitig erwiesen, daß man sie – allerdings zu Unrecht – „Elektronengehirne“ nennt. Längst sind sie darüber hinaus, „nur“ sehr komplizierte und langwierige Berechnungen auszuführen. Sie verwalten auch Materiallager, führen Konten, helfen beim Diagnostizieren von Krankheiten, lösen die verwickeltsten Transportprobleme, bestimmen den günstigsten Standort von Industriewerken, übersetzen fremdsprachiger Texte, „knobeln“ klangvolle Namen für industrielle Erzeugnisse „aus“, bearbeiten Statistiken, helfen bei der Wettervorhersage und „komponieren“ bisweilen – natürlich in den USA, im „Land der unbegrenzten Möglichkeiten“ – einen Schlager.

Die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten elektronischer Rechenmaschinen lassen sich in drei große Komplexe ordnen; jeder ist für die Volkswirtschaft und die Planung der sozialistischen Länder von größter Bedeutung.

Wissenschaft und Technik können sich an Probleme wagen, die wegen des gewaltigen Umfangs der nötigen Rechenarbeit bisher als praktisch unlösbar galten. Verschiedene Wege zur Bewältigung eines technisch-wissenschaftlichen Projekts können in kurzer Zeit durchgerechnet werden; die beste Lösung läßt sich ohne lange und kostspielige Versuche finden.

Als „Datenverarbeitungsmaschinen“ können Elektronenrechner die meisten Büro- und Verwaltungsarbeiten übernehmen. Sie „merken“ sich Millionen von Zahlen, Daten oder statistischen Angaben und werten sie nach den verschiedenartigsten Gesichtspunkten aus. Sie sind damit ein wichtiges Hilfsmittel jeder Planung, sei es im Betrieb, sei es im Bereich wirtschaftlicher oder staatlicher Planungsorgane.

Für die Automatisierung der Produktion sind Elektronenrechner gleichfalls unentbehrlich. Sie „übersehen“ und lenken den Produktionsprozeß, regeln die Materialzufuhr und können bei Betriebsstörungen sogar „Entscheidungen“ treffen, die größeren Schaden verhüten.

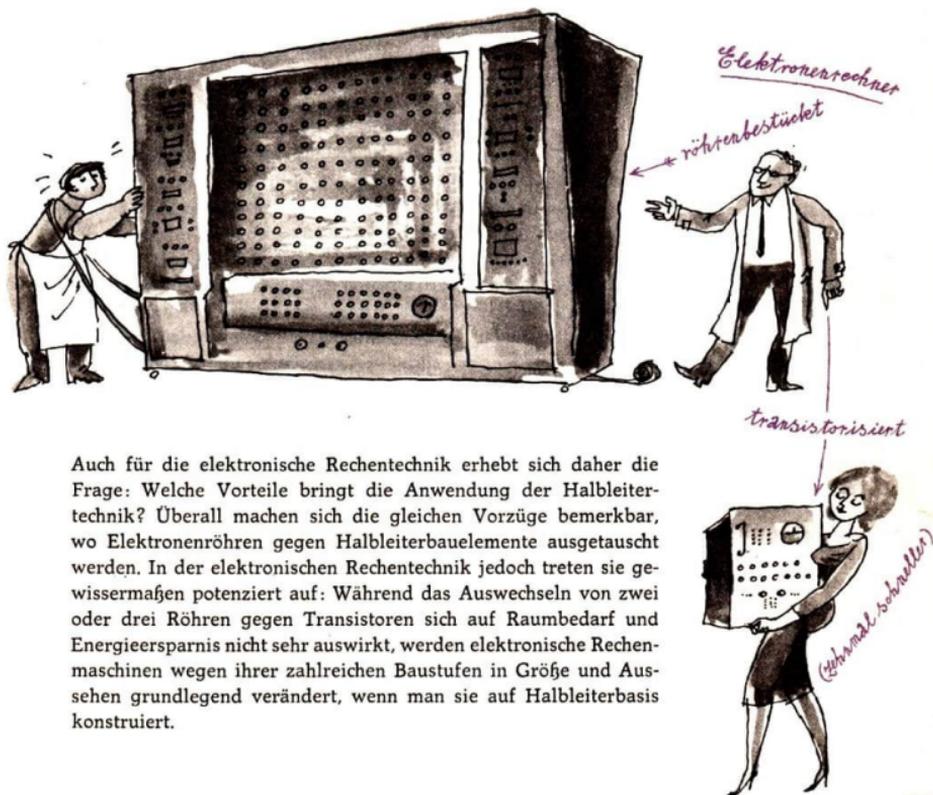
Ebenso erstaunlich wie die Vielseitigkeit der Elektronenrechner ist ihre Arbeitsgeschwindigkeit. Sie führen Hunderttausende von einfachen Rechenoperationen in einer Sekunde aus und schreiben die Ergebnisse so schnell nieder, daß in der Sekunde mehrere Schreibmaschinenseiten bedruckt vorliegen. Um eine Gleichung mit drei Unbekannten zu lösen, brauchen sie noch keine tausendstel Sekunde. Das Rechenzentrum der Akademie der Wissenschaften der UdSSR erledigte allein im Jahre 1955 ein Arbeitspensum, das 10000 Rechner zwanzig Jahre lang beschäftigt hätte. Inzwischen sind auch diese erstaunlichen Zahlen schon wieder überholt.

Die Leistungsfähigkeit der Elektronenrechner wird mit großem technischem Aufwand erkauft: ENIAC (Electronic numerical inte-



grator and computer), der erste „große“ Elektronenrechner, enthielt 18000 Elektronenröhren und 1500 Relais und mußte in einem Saal aufgestellt werden. Dabei war ENIAC ein träger Bursche und brauchte, um 250 Paare zehnstelliger Zahlen miteinander zu multiplizieren, eine ganze Sekunde. Seine Nachfolger waren zwar kleiner und leistungsfähiger – „MANIAC“ beispielsweise kam mit „nur“ 3000 Röhren aus –, aber es waren doch noch recht „dicke Brocken“, die nicht nur viel Platz und Elektroenergie benötigten, sondern wegen der zahlreichen Elektronenröhren auch sehr störanfällig waren.

In einem Elektronenrechner hat nicht jede Röhre eine andere Aufgabe zu erfüllen; viele Baugruppen treten in vielfacher Wiederholung auf: Da gibt es zahlreiche „Trigger“, eine besondere Art elektronischer Relais; da gibt es Additions-, Multiplikations-, Subtraktions- und Divisionsschaltungen. Diese Wiederholung gleicher Baugruppen erinnert an die Fernsprechtechnik; denn in Fernsprechämtern begegnen uns ebenfalls immer wieder die gleichen Bauelemente und Bausteine: Wähler, Relais, Verstärker.



Auch für die elektronische Rechentechnik erhebt sich daher die Frage: Welche Vorteile bringt die Anwendung der Halbleitertechnik? Überall machen sich die gleichen Vorzüge bemerkbar, wo Elektronenröhren gegen Halbleiterbauelemente ausgetauscht werden. In der elektronischen Rechentechnik jedoch treten sie gewissermaßen potenziert auf: Während das Auswechseln von zwei oder drei Röhren gegen Transistoren sich auf Raumbedarf und Energieersparnis nicht sehr auswirkt, werden elektronische Rechenmaschinen wegen ihrer zahlreichen Baustufen in Größe und Aussehen grundlegend verändert, wenn man sie auf Halbleiterbasis konstruiert.

Das Zusammenarbeiten von alt und neu, das in der Fernsprechtechnik beachtet werden muß, spielt bei der Transistorisierung von Elektronenrechnern nur eine untergeordnete Rolle. Niemandem würde es einfallen, bereits vorhandene Rechenanlagen nachträglich auf Halbleiter umzustellen. Man entwickelt statt dessen neue, bessere Rechner, die von vornherein alle Möglichkeiten der Halbleitertechnik einschließen. Bereits die erste elektronische Rechenanlage unserer Republik, die ZRA 1 der volkseigenen Zeisswerke, enthielt 12000 Germaniumdioden, während Röhren nur noch für einige Sonderaufgaben vorgesehen waren. Heute sind Elektronenrechner mit 15000 Transistoren und 60000 Dioden nicht mehr selten.

Um einen Röhrenelektronenrechner mit einer Halbleiterrechenanlage vergleichen zu können, muß man von gleichen Einsatzbedingungen ausgehen. Als Beispiel diene uns eine für die Flugzeugindustrie bestimmte Rechenanlage, die mit Röhren bestückt war, aber nach einiger Zeit durch einen Transistorrechner mit 6000 Dioden und 1500 Transistoren abgelöst wurde. Die neue Anlage rechnet zehnmal schneller als die alte, ist zwanzigmal kleiner und verbraucht nur 3% der für den röhrenbestückten Rechner notwendigen Elektroenergie. Während man bei der alten Anlage ständig mit Röhrendefekten zu tun hatte, arbeitete der neue Rechner viele tausend Stunden, ohne daß ein Bauelement ausfiel.

Eine große Gruppe von Rechenanlagen verdankt ihr Entstehen überhaupt erst der Halbleitertechnik. Während die universell einsetzbaren Großrechenanlagen immer für zahlreiche Betriebe, Forschungsstätten und Behörden zugleich tätig sind, gibt es in Laboratorien und in Konstruktionsbüros oder Verwaltungen eine Fülle von langwierigen und ermüdenden Rechenarbeiten, mit denen ein Großrechner keinesfalls ausgelastet wäre und die man deshalb nach wie vor mit der mechanischen Rechenmaschine ausführt. Die Halbleitertechnik erlaubt es, für solche Zwecke kleine und vor allem auch nicht zu teure Elektronenrechenmaschinen zur Verfügung zu stellen, die nicht von ausgebildeten Mathematikern „gefahren“ werden müssen. Diese Kleinrechner, deren Konstruktion leicht auf die Besonderheiten des jeweiligen Betriebes abgestimmt werden kann, haben große Zukunftsaussichten. Sie werden wesentlich dazu beitragen, daß Forschungs- und Entwicklungsaufgaben geringeren Umfangs schnell und exakt gelöst werden können.

Kleinrechner existieren bereits. Die sowjetische Rechenmaschine „MN 10“ wiegt nur 45 kp und verbraucht so viel Strom wie zwei 100-Watt-Birnen. Allein der Stromversorgungsteil eines Röhrenrechners ist schwerer als die ganze MN 10. Eine andere Kleinrechenmaschine mißt, obwohl in ihr 5500 Bauelemente zusammenwirken, nur 7,5 cm · 18 cm · 28 cm. Man könnte sie bequem in einer Aktentasche transportieren. Der Kleinrechner „Cellatron SER 2“ des VEB Elektronische Rechenmaschinen, Karl-Marx-Stadt,

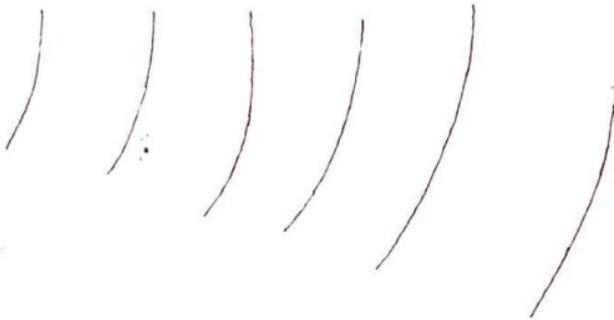


enthält 750 Transistoren und 2500 Dioden und entnimmt dem Lichtnetz nur 250 W.

Im Institut für Maschinelle Rechentechnik der Technischen Universität Dresden arbeitet man an der Entwicklung von Kleinrechnern, die nicht größer als ein Rundfunkempfänger sein sollen. Sie werden mindestens 500mal schneller rechnen als ein Techniker an der mechanischen Rechenmaschine und dürften in der billigsten Ausführung noch nicht einmal 10000 DM kosten.

Sicherlich werden Kleinelektronenrechner eines Tages ebenso zum Handwerkszeug jedes Technikers und Ingenieurs gehören wie heute Rechenschieber und Tabellenwerk. Vielleicht sind sie nicht einmal viel größer als ein Rechenschieber; denn die Fortschritte der Miniaturisierung und die Molekularelektronik, deren Anfänge wir zur Zeit erleben, werden sich auch in der elektronischen Rechen-technik widerspiegeln.





# HALBLEITER KÖNNEN MEHR

## Halbleiter messen alles

### Wo steckt der Fehler?

Wenn früher ein Radio plötzlich verstummte, blieb nichts anderes übrig, als es in die nächste Werkstatt zu tragen. Dieser Transport war um so mißlicher, je größer und schwerer die Empfänger wurden. Doch eine Reparatur an Ort und Stelle war so gut wie ausgeschlossen. Nur selten ist einem Empfänger anzusehen, wo ein Defekt „sitzt“ und welches Bauelement auszuwechseln ist. Meistens muß die Fehlerstelle immer enger eingekreist und auf diese Weise auffindig gemacht werden. Die dazu notwendigen Instrumente und Geräte gab es in der Vergangenheit nur in der Rundfunkwerkstatt.

Bei Geräten der Nachrichtentechnik und der industriellen Elektronik war die Situation ähnlich; nicht selten mußten zentnerschwere Anlagen ausgebaut und über viele Kilometer transportiert werden, um einen Kondensator oder einen Widerstand von wenigen Pond Gewicht auszutauschen. Man suchte deshalb nach transportablen Meß- und Prüfeinrichtungen, die mühelos und überallhin mitgeführt werden konnten. Zunächst wurden „tragbare Geräte“ konstruiert, die aber in Wirklichkeit viel zu schwer und zu groß waren, um getragen zu werden. Sie blieben meistens in der Werkstatt stehen.

Erst seit kurzem bahnt sich eine Änderung an. Zwar werden auch heute noch die meisten Rundfunk- und Fernsehgeräte nicht in unserem Heim, sondern in der Werkstatt repariert; aber immer öfter könnten wir, wenn unser Empfangsgerät versagt, auch folgendes erleben. Der Rundfunkmechaniker holt eine Hülse aus der Brusttasche seines Kittels. Sie sieht fast wie ein zu dick geratener Kugelschreiber aus; doch ein Knopfdruck läßt keinen Schreibgriffel, sondern eine Metallspitze hervortreten. Mit ihr tippt der Mechaniker nacheinander an verschiedene Punkte im Drahtgewirr des Empfängers, wobei er immer wieder das Schaltschema des Gerätes zu Rate zieht. Aus dem Lautsprecher klingt, solange die Spitze die Anschlüsse eines Bauelementes berührt, jedesmal ein leiser oder lauter Ton.

Die Hülse enthält einen sogenannten Prüfsignalgeber, bestehend aus einer Stabbatterie und einer Transistorschaltung, einem



„Multivibrator“. Dieser macht seinem Namen „Vielschwinger“ alle Ehre: Er erzeugt ein Gemisch von Wechselspannungen der verschiedensten Frequenzen, von niedrigen Tonfrequenzen bis zu Hochfrequenzen, wie sie von Funksendern ausgestrahlt werden.

Das Frequenzgemisch ist das „Prüfsignal“. Es wird mit der Metallspitze den verschiedenen Baustufen des Empfängers zugeführt. Der Mechaniker verfolgt nun, was mit dem Prüfsignal geschieht, ob es von den Empfängerstufen verstärkt wird, ob es zu schwach aus dem Lautsprecher klingt oder ob es „verschwindet“, weil irgendwo in der Schaltung ein Kurzschluß oder eine Unterbrechung aufgetreten ist. Durch geschicktes Handhaben des Prüfsignalgebers gelingt es oft in überraschend kurzer Zeit, einen Fehler zu lokalisieren und das schadhafte Bauelement ausfindig zu machen.

Es kann allerdings sein, daß man mit dem Prüfsignalgeber allein nicht zum Ziel kommt. Doch unser Mechaniker trägt ein weiteres Gerät mit sich. An dessen Vorderseite entdecken wir eine kleine Lautsprecheröffnung, die Skala eines Meßinstrumentes und einige Einstellknöpfe. Es ist ein Transistorverstärker, den man „Signalverfolger“ nennt. Damit ist seine Aufgabe schon umrissen: Mit ihm kann man Schritt für Schritt im Rundfunk- oder Fernsehgerät feststellen, ob und wie die von der Antenne aufgefangenen Funkwellen im Gerät verarbeitet werden. Berührt man beispielsweise mit dem „Tastkopf“ des Signalverfolgers – er sieht äußerlich dem Prüfsignalgeber ähnlich, ist aber durch ein Kabel mit dem Verstärker verbunden – den Antennenanschluß des Empfängers, so sind im Lautsprecher des Signalverfolgers alle Sender zu hören, deren Wellen die Antenne erreichen. Man verfolgt nun mit dem Tastkopf systematisch den ganzen Weg, den die Empfangsspannungen im Empfänger zurücklegen. So darf hinter den Abstimmkreisen nur noch der Sender zu hören sein, auf den der Skalenzeiger des Gerätes eingestellt ist. Sind mehrere Sender aufzunehmen oder bleibt der Lautsprecher stumm, so liegt der Fehler in den Abstimmkreisen. Man überprüft die einzelnen Wellenbereiche und grenzt so die Fehlerstelle weiter ein. Verschwindet das Signal an anderer Stelle im Empfänger, geht man ähnlich vor. Andere Geräte der Nachrichtentechnik und Elektronik lassen sich auf die gleiche Weise untersuchen. Da mit dem Signalverfolger außerdem meistens Ströme, Spannungen und Widerstände gemessen werden können, ist er wirklich ein universelles Hilfsmittel für den Reparaturtechniker.

Neu ist nicht die Prüf- und Meßmethode selbst; auch in Rundfunk- und Nachrichtenwerkstätten zählen Prüfsignalgeber und Signalverfolger zu den beliebtesten Hilfsgeräten, weil sie ein schnelles und rationelles Arbeiten ermöglichen. Neu ist, daß diesmal die Apparaturen der Werkstatt zum Empfänger, nicht aber die Empfänger in die Werkstatt kommen. Neu ist auch, daß die Prüfgeräte unabhängig vom Lichtnetz arbeiten; man könnte notfalls sogar ein Koffergerät auf dem Zeltplatz mit dem Signalverfolger unter-



suchen. Ist das schadhafte Bauelement aufgespürt, kann es leicht an Ort und Stelle ausgewechselt werden. Das ist nicht nur für den Rundfunk- und Fernsehfreund ein Vorteil, sondern vor allem überall dort, wo elektronische Anlagen fest eingebaut sind.

### Kabel gesucht!

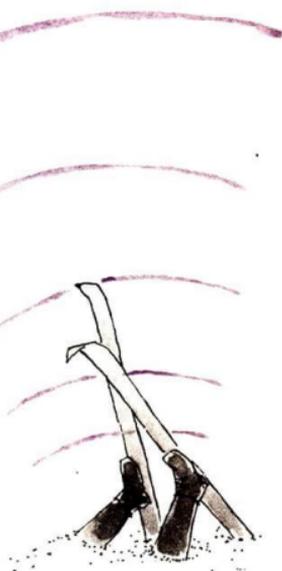
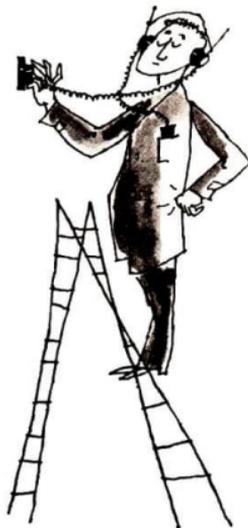
Pannen gibt es nicht nur in Rundfunk- und Fernsehgeräten, sondern manchmal auch in der Lichtleitung. Die Reparatur kann dadurch erschwert werden, daß mitunter gar nicht genau bekannt ist, wo die unter dem Putz verlegten Leitungen verlaufen. In Wechselstromnetzen hilft ein Transistortaschengerät dem Installateur, „verlorengegangene“ Leitungen wiederzufinden. Ein Tastkopf wird an den Zimmerwänden oder an den Decken entlanggeführt. Sobald er in die Nähe einer Wechselstromleitung gelangt, beginnt ein Kopfhörer oder ein Lautsprecher deutlich zu brummen. Je mehr man sich der Leitung nähert, desto lauter brummt es; beim „Überfahren“ der Leitung tritt ein deutliches Lautstärkemaximum auf. Kabelsuchgeräte zum Aufspüren von Erdkabeln arbeiten nach einem ähnlichen Prinzip.

Aber nicht nur die Lage von Leitungen, sondern auch Unterbrechungen oder Kurzschlüsse lassen sich lokalisieren. Zu diesem Zweck werden die Stromkreise, in denen sich der Fehler bemerkbar macht, vom Netz abgeklemmt. Statt dessen speist man sie mit dem Wechselspannungsgemisch eines Prüfsignalgebers. Die eingegrabenen oder unter dem Putz verlegten Leitungen werden mit einem kleinen Suchgerät – es ist nichts anderes als ein vereinfachter Signalverfolger – abgetastet. An einer Bruchstelle oder bei einem Kurzschluß ist ein deutlicher Sprung der Lautstärke zu vernehmen.

Die Methode ist nicht auf elektrische Leitungen beschränkt. Man kann den Prüfsignalgeber ebenso gut mit einer Gas- oder einer Wasserleitung oder einem anderen Metallrohr verbinden und Bruchstellen aufsuchen. Dieses elektronische Suchverfahren hat den Vorzug, daß es nicht mehr nötig ist, „auf Verdacht“ Mauern aufzustemmen oder Kabelgräben zu öffnen. Man stößt ohne unnützen Aufwand sofort zur Fehlerstelle vor.

Eine Variante solcher Geräte wird zu einem ganz anderen Zweck gegenwärtig in der Schweiz erprobt: Wanderer oder Skiläufer stecken sich einen 70 p schweren, stiftförmigen Magneten in die Tasche. Werden sie durch eine Lawine verschüttet oder stürzen sie in eine Spalte, so findet sie ein mit Transistoren bestücktes Suchgerät sehr schnell, da es auf die von den Magneten ausgehenden Kraftwirkungen anspricht.

Die Suchgeräte sind nicht anwendbar, wenn ein Kabel schwer zugänglich oder sehr lang ist. In diesen Fällen hilft man sich anders: In das Kabelende wird ein kurzer elektrischer Impuls geschickt.



Er durchläuft das Kabel und gerät an der beschädigten oder unterbrochenen Stelle „ins Stolpern“. Es wird ein schwacher Impuls reflektiert, der als Echo im Kabel zurückläuft. Mißt man die Zeitspanne zwischen dem Abgehen des Impulses und der Rückkehr des Echos, so kann man, da die Laufgeschwindigkeit des Impulses im Kabel bekannt ist, die Entfernung der Schadenstelle errechnen oder an einem Instrument ablesen. Die „Fehlerortungsgeräte“ beruhen also auf dem gleichen Prinzip wie Radaranlagen. Sie sind dementsprechend schwer und unhandlich. Das vom VEB Funkwerk Dresden hergestellte Fehlerortungsgerät FOG 1 wog 29 kg und war ungefähr so groß wie ein Fernsehempfänger. Geräte anderer Firmen besaßen ähnliche Abmessungen. Man konnte sie allenfalls in einem Personenkraftwagen transportieren, nicht aber in der Hand tragen.

In jüngster Zeit ging man dazu über, auch die Fehlerortungsgeräte auf Halbleiterbauelemente umzustellen. Die Erfolge waren verblüffend: Das Gewicht sank auf 3 bis 5 kg, die Abmessungen verminderten sich auf die eines Kofferempfängers. Da die Geräte aus eingebauten Akkumulatoren gespeist werden, sind sie unabhängig vom Lichtnetz. Wie sehr sich dadurch ihr Anwendungsbereich erweitert, geht daraus hervor, daß Betriebe, die transistorisierte Fehlerortungsgeräte herstellen, auf Jahre hinaus mit Aufträgen eingedeckt sind und mit der steigenden Nachfrage längst nicht Schritt halten können.

### Kontrolle ist besser

Wenn sich auch Halbleitergeräte in vielen Zweigen der Technik bei der Fehlersuche bewährt haben, so ist es doch am besten, wenn man sie zu diesem Zweck gar nicht erst einzusetzen braucht. Werden technische Anlagen fortlaufend überwacht und gemessen, so läßt sich ein Defekt häufig schon im Entstehen erkennen, noch ehe er größeren Schaden anrichten kann. Das ist eine Binsenwahrheit, und Tausende von Kontroll- und Prüfinstrumenten, angefangen beim Armaturenbrett des Kraftwagens, beim Manometer der Warmwasserheizung bis zum Cockpit einer Düsenmaschine oder zur Schaltwarte eines Kernkraftwerkes, beweisen, daß man diese Wahrheit seit langem erkannt hat. So wird es auch niemand erstaunlich finden, daß Halbleiterbauelemente schon sehr früh in die Meßtechnik einzogen. Eine Reihe von Prüf- und Kontrollgeräten auf Halbleiterbasis ist uns bereits in den vorausgegangenen Kapiteln begegnet. Wir brauchen nur einmal zu den Seiten zurückzublättern, wo von Thermistoren oder von lichtelektrischen Bauelementen und ihren Anwendungen die Rede ist. Weitere Beispiele werden wir kennenlernen. Auch sie stellen aber nur eine kleine Auswahl von fast unzählbar vielen Möglichkeiten dar.

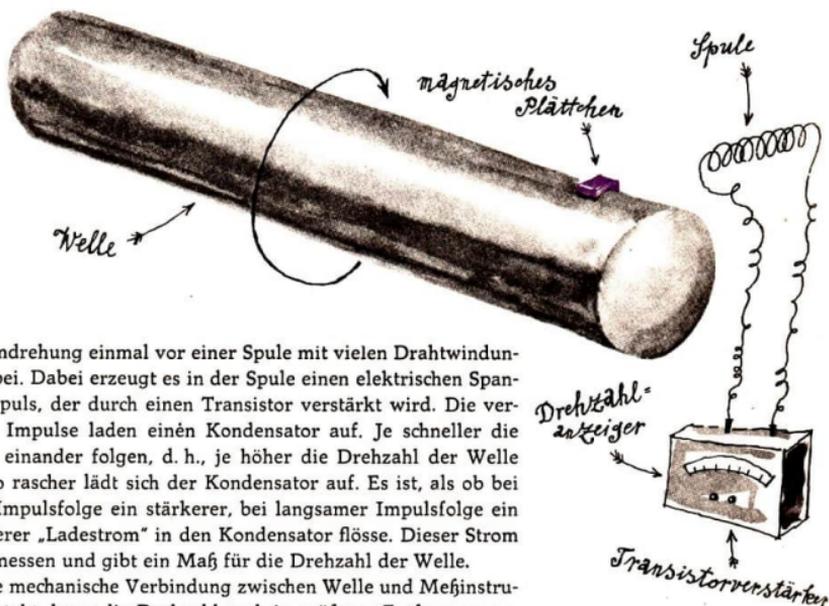
Dem Transistor eröffnet sich ein weites Feld im Meßverstärker; denn sehr oft werden technische Daten in elektrische Spannungen



umgesetzt, die zu schwach sind, um unmittelbar Meßgeräte zu steuern oder über größere Entfernungen bis zu einem zentralen Meßplatz fortgeleitet zu werden. Denken wir an ein Fotoelement, das irgendwelche Produkte zählt! Die Spannungsimpulse, die das Fotoelement abgibt, betragen nur Bruchteile eines Volt. Sollen sie ein Zählwerk betätigen, muß man sie vorher verstärken. Wir brauchen hier gewiß nicht noch einmal zu wiederholen, daß ein Röhrenverstärker keine einfache und technisch „elegante“ Lösung darstellen würde. Ein Transistor in Verstärkerschaltung dagegen kann ohne weiteres mit in den Meßkopf eingebaut werden, der das Fotoelement aufnimmt. Die Anlage wird dadurch weder größer, noch sind besondere Stromversorgungseinrichtungen nötig. Eine Trockenbatterie reicht für mehrmonatigen Betrieb aus.

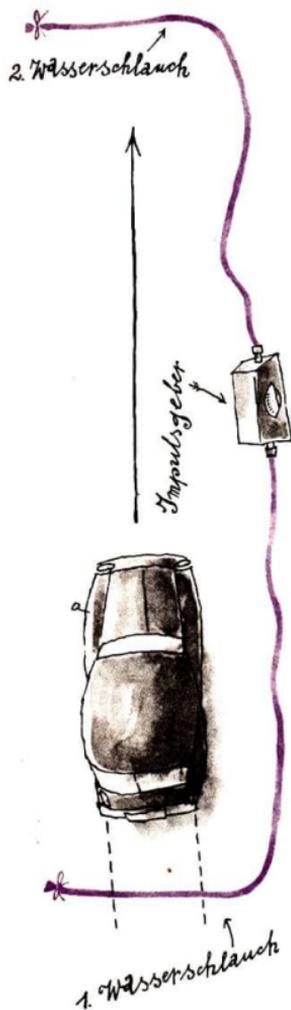
Drehzahlbestimmungen gehören zu den häufigsten technischen Messungen. Es gibt zahlreiche mechanische oder elektromechanische Drehzahlmesser. Sie haben einen Nachteil: Es ist ein Eingriff in den Motor oder das Aggregat nötig, dessen Drehzahl gemessen werden soll – sei es, daß eine biegsame Welle die Drehungen zum Meßgerät überträgt, sei es, daß eine umlaufende Kontaktnocke angebracht werden muß.

Transistorisierte Drehzahlmesser machen einen solchen Eingriff unnötig. Auf der Welle, deren Drehzahl bestimmt werden soll, wird ein dünnes, magnetisches Plättchen befestigt. Es läuft bei



jeder Umdrehung einmal vor einer Spule mit vielen Drahtwindungen vorbei. Dabei erzeugt es in der Spule einen elektrischen Spannungsimpuls, der durch einen Transistor verstärkt wird. Die verstärkten Impulse laden einen Kondensator auf. Je schneller die Impulse einander folgen, d. h., je höher die Drehzahl der Welle ist, desto rascher lädt sich der Kondensator auf. Es ist, als ob bei rascher Impulsfolge ein stärkerer, bei langsamer Impulsfolge ein schwächerer „Ladestrom“ in den Kondensator flösse. Dieser Strom wird gemessen und gibt ein Maß für die Drehzahl der Welle.

Da keine mechanische Verbindung zwischen Welle und Meßinstrument besteht, kann die Drehzahl auch in größerer Entfernung an



gezeigt werden. Wenn kein Magnetplättchen angebracht werden kann, versieht man die Welle mit einer hellen oder dunklen Markierung. Ein Lämpchen richtet einen Lichtstrahl auf die Welle, und ein Fotowiderstand oder ein Fotoelement empfängt das reflektierte Licht. Die Helligkeit schwankt jedesmal, wenn die Markierung unter dem Lichtstrahl vorbeiläuft. Dadurch entstehen die Meßimpulse. Transistorisierte Drehzahlmesser sind so zuverlässig und handlich, daß sie in einigen Kraftfahrzeugmodellen bereits die Stelle der herkömmlichen Tachometer eingenommen haben.

Ganz anders ist ein Transistorgerät konstruiert, das Fahrzeuggeschwindigkeiten vom Straßenrande aus mißt. Quer über die Fahrbahn werden zwei mit Wasser gefüllte, an einem Ende verschlossene Schläuche gelegt. Sobald ein Fahrzeug mit den Vorderreifen den ersten Schlauch überfährt, wird durch den sich topflanzenden Druck und einen Kontakt ein „Impulsgeber“ eingeschaltet. Er erzeugt aufeinanderfolgende kurze Spannungstöße, etwa hundert je Sekunde, die selbsttätig gezählt werden. Beim Überfahren des zweiten Schlauches wird der Impulsgeber wieder abgeschaltet. Die Zahl der Impulse ist ein Maß für die Zeitspanne zwischen Ein- und Ausschalten und damit auch für die Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese wird, von einem Instrument sofort angezeigt. Die Anlage ist einfacher und billiger als die für Geschwindigkeitskontrollen verwendeten Verkehrsradargeräte.

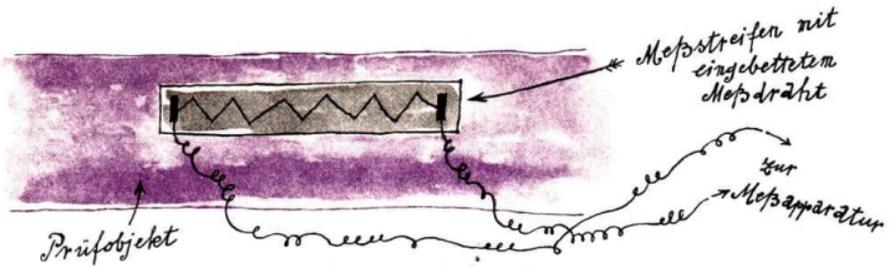
Um beim Verkehrsradar zu bleiben: Da gibt es doch in den USA neuerdings „Verkehrsradar-Abwehrgeräte“, die öffentlich verkauft werden. Sie sind handtellergröÙ und werden an die Windschutzscheibe geheftet oder am Armaturenbrett befestigt. Nähert sich das Fahrzeug einem Verkehrsradargerät, so warnt ein Pfeifton den Fahrer, damit er die Geschwindigkeit rechtzeitig mindern kann. Welche „Freiheit“ muß in einem Lande herrschen, das Gesetzesverletzern die technischen Hilfsmittel zur Verfügung stellt, nicht ertappt zu werden!

### Blitze – Streifen – Strahlen

Aus einer Notiz der Fachpresse geht hervor, daß nicht einmal mehr Gewitter vor der Halbleitertechnik sicher sind. Kirgisische Wissenschaftler schufen ein tragbares Halbleitergerät, das selbsttätig Blitze registriert, Gewitter bis auf eine Entfernung von 300 km feststellt und ihren Weg verfolgt.

Solche Beobachtungen sind nicht nur für die Wetterkunde wertvoll, sondern haben noch eine greifbarere Bedeutung: Die Auswertung hilft sowjetischen Ingenieuren und Wissenschaftlern, die Trasse von Hochspannungsleitungen in gebirgigen Gegenden so zu führen, daß besonders gewitterreiche Stellen und damit häufige Blitzschläge in die Leitungen vermieden werden.

Haben Sie schon einmal das Wort „Dehnungsmeißstreifentechnik“ gelesen? Die Meßmethoden, die sich hinter diesem Wortungeheuer



verbergen, sind sehr nützlich. Stellen Sie sich einen dünnen, elastischen Draht vor, der in seiner ganzen Länge unverrückbar fest auf ein Stück Gummiband geklebt wird. Dehnen wir das Band vorsichtig aus, so wird auch der Draht länger und damit dünner. Der elektrische Widerstand des Drahtes, der bekanntlich von der Drahtlänge und vom Drahtdurchmesser abhängt, nimmt dadurch zu. Mißt man die Widerstandsänderung, so kann man daraus die Längenänderung bestimmen. Da die Widerstandsänderung auf elektrischem Wege gemessen wird, ist das Verfahren ohne weiteres für Fernmessungen geeignet.

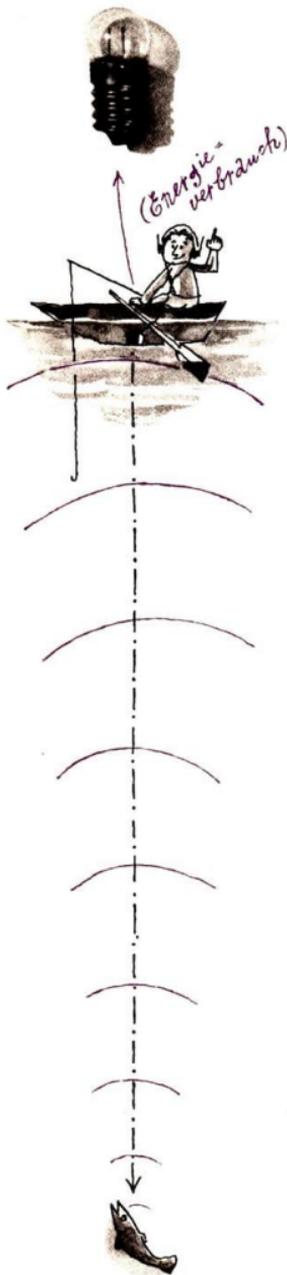
In der technischen Praxis werden auf das Prüfobjekt „Dehnungsmefstreifen“ geklebt, in die ein Mefdraht eingebettet ist. Größen- und Formänderungen der verschiedenartigsten Werkstücke können so gemessen werden.

Die Widerstandsänderungen sind nur geringfügig. Um sie zu bestimmen, braucht man sehr empfindliche und genaue Mefinstrumente. Es wurden daher Materialien gesucht, die beim Verformen größere Widerstandsänderungen aufwiesen. Man fand sie in Halbleiterstoffen. Bewährt haben sich dünne Siliziumfäden, die auf einem geeigneten Träger befestigt sind. Sie ändern ihren Widerstand so erheblich, daß die Änderungen bereits mit verhältnismäßig einfachen und billigen Mefinstrumenten erfaßt werden können. Auch hochempfindliche Druckmesser und sogar Mikrophone lassen sich unter Benutzung von Halbleiterstoffen konstruieren.

Durch die Entwicklung der Kerntechnik wurden neue Mefinstrumente erforderlich. Sie messen die Stärke radioaktiver Strahlung; sie warnen, wenn die Strahlungsintensität gefährlich hohe Werte erreicht. Diese Geräte müssen handlich und leicht sein, damit sie jederzeit mitgeführt und überall eingesetzt werden können.

Das Strahlungsnachweisgerät „Aktifon D“ des VEB Vakutronic wiegt 400 g, hat die Form eines Stabes und kann bequem in einer Hand gehalten werden. Wird das Gerät von radioaktiver Strahlung getroffen, so werden in ihm elektrische Impulse ausgelöst. Sie steuern einen Transistorverstärker und sind in einem Kleinkopfhörer je nach Strahlungsintensität als mehr oder weniger schnelles „Tröpfeln“ zu hören.

Die Stromversorgung des Gerätes wurde auf besonders geschickte Weise gelöst. Griff des Gerätes ist ein Handdynamo, wie er für



Taschenlampen benutzt wird. Drückt man den Antriebshebel des Dynamos zwei- oder dreimal mit dem Daumen, so ist das Strahlennachweisgerät für mehrere Minuten betriebsbereit. Der Dynamo liefert nicht nur die Energie für den Transistorverstärker, sondern über einen Transverter auch die Hochspannung, die zum Auslösen der Impulse gebraucht wird.

Mit einem Echolot kann man vom fahrenden Schiff aus die Wassertiefe ohne Verzögerung bestimmen oder fortlaufend registrieren. Sogar Fischschwärme lassen sich mit ihm ausfindig machen. In seiner Funktion ähnelt das Echolot Radar- und Fehlerortungsgeräten. Allerdings ist es diesmal ein Ultraschallimpuls, dessen Laufzeit zum Meeresboden und zurück gemessen und in die Wassertiefe umgerechnet wird.

Kleine Fahrzeuge mußten bisher auf Echolote verzichten, da diese zu schwer und zu teuer waren und viel Strom verbrauchten. Echolote mit Transistoren benötigen nur  $\frac{1}{10}$  W, verbrauchen also weit weniger Elektroenergie als eine Taschenlampe. Sie wiegen, obwohl sie ein Dutzend Transistoren und einige Halbleiterdioden enthalten, mit allem Zubehör nur 2 bis 3 kp und lassen sich notfalls sogar in einem Ruderboot mitführen. Wahrscheinlich wird es eines Tages auch möglich sein, ebenso leichte und sparsame Radargeräte zu entwickeln. Der Anwendungsbereich des Radars würde sich dadurch sehr ausweiten; denn man könnte mit den Geräten auch Sportboote, Segelflugzeuge und kleine Fischereifahrzeuge ausstatten.

### Auf die Sekunde kommt es an

Die Zeitmessung begleitet uns von früh bis spät, und sogar bei einem nächtlichen Erwachen gilt unser erster Blick dem Wecker.

Daß Uhren genau gehen, verdanken sie den Schwingungen eines Pendels oder einer Unruh. Dabei zeigen sich allerdings auch Abweichungen. Die Lager nutzen sich ab; Temperaturschwankungen beeinträchtigen die Exaktheit der Zeitmessung. Man kann diese Fehlerquellen ausschalten, wenn man die mechanischen Schwingungen durch elektrische „Schwingungen“ ersetzt. Das Wechselstromnetz z. B. hält seine Frequenz genau ein. Man kann es daher statt der Unruh benutzen und sehr einfache Uhren bauen. Ob sie die Zeit richtig anzeigen oder nicht, hängt ausschließlich davon ab, wie exakt die Generatoren im Kraftwerk ihre Frequenz einhalten.

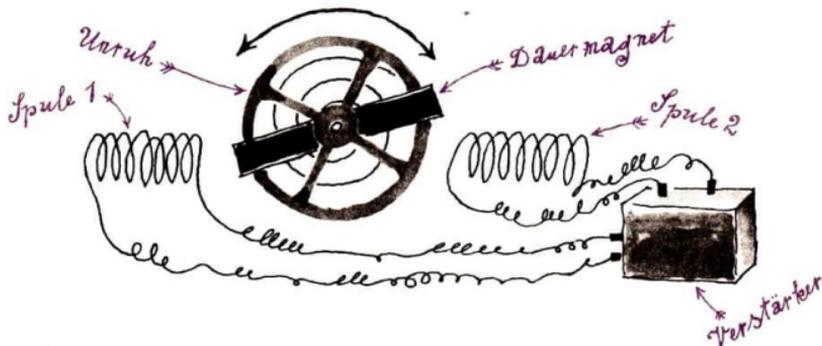
Uhren für astronomische oder geophysikalische Messungen, die im Laufe eines Tages höchstens um tausendstel Sekunden vor- oder nachgehen dürfen, lassen sich auf diese Weise nicht steuern. Bei ihnen wird die steuernde Wechselspannung in der Uhr selbst gewonnen. Das geschieht in einem „Quarzoszillator“, einem leistungsschwachen Hochfrequenzsender, der seine Frequenz mit Hilfe eines Quarzkristalls genauestens einhält. Da die Frequenz der gewonne-

nen Wechselfrequenz zu hoch ist, um unmittelbar zum Antrieb der Uhr verwendet zu werden, „teilt“ man sie in einer elektronischen Baugruppe; man untersetzt sie auf einen niedrigeren Wert. Diese niedrige Frequenz wird nochmals verstärkt und treibt den Uhrenmotor.

Doch nur wenige Forschungsstätten konnten diese teuren Quarzuhren aufstellen. Es erregte daher in Fachkreisen berechtigtes Aufsehen, als die ersten Berichte über Transistor-Quarzuhren veröffentlicht wurden. So brachte eine Schweizer Firma eine derartige Uhr heraus, die nicht größer als drei oder vier aufeinandergelegte Taschenbücher ist. Die Uhr enthält 16 Transistoren und einen Motor, der so klein ist, daß man ihn in der geschlossenen Faust verstecken könnte. Sie begnügt sich mit der Elektroenergie aus einer Sonnenbatterie von der Größe einer Buchseite. Eine ähnliche Quarzuhr, die in 24 Stunden nur um 0,002 Sekunden vor- oder nachgeht, wurde im Institut für Radiotechnik und Elektronik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften entwickelt.

Seit langem bemüht man sich, bei Tischuhren, Armbanduhr und Schiffschronometern die Antriebskraft der gespannten Feder durch eine elektrische Spannungsquelle zu ersetzen. Da Elektromotoren ihre Drehzahl nicht genau genug einhielten, steuerte man die Uhren durch Kontakte, die von der hin- und herschwingenden Unruh betätigt wurden. Diese Kontakte gaben allerdings immer wieder Anlaß zu Störungen. Sie wurden in jeder Sekunde zweimal, manchmal viermal betätigt; in einem Jahr mußten sie also rund 63 Millionen (beziehungsweise 126 Millionen) Schaltungen einwandfrei ausführen, eine Beanspruchung, der auch das beste Material und die beste Konstruktion auf die Dauer nicht standhalten konnten.

Bei den „kontaktlosen“ Uhren tritt ein Transistor an die Stelle der Schaltkontakte. Mit der Unruh schwingt ein Dauermagnet vor zwei Spulen. In der einen Spule entsteht beim Vorbeischieben des Magneten ein schwacher Spannungsimpuls. Er wird im Transistor verstärkt und ruft einen Stromstoß durch die zweite Spule hervor. Durch die dabei auftretenden magnetischen Kräfte erhalten Magnet und Unruh einen „Schub“, der für die nächste Unruh-



schwingung und für den Antrieb des Räderwerkes ausreicht. Bei anderen Ausführungen werden Schwingungen einer Stimmgabel auf das Räderwerk übertragen. Die Spulen greifen diesmal über die Enden der Stimmgabel. Wieder entstehen Steuerimpulse, die, verstärkt, die Stimmgabelschwingungen aufrechterhalten.

Zur Speisung der Transistoruhren finden Taschenlampenzellen oder Miniaturakkumulatoren Verwendung. Oft sind die Uhren so eingerichtet, daß sie Zusatzgeräte steuern können. So ist in Transistor-Schiffschronometern häufig ein weiterer Transistorverstärker eingebaut. Er wird gleichfalls von den Impulsen gesteuert, die an der Unruh entstehen, und gibt kräftige Stromimpulse ab. Sie können über Leitungen geschickt werden und „Tochteruhren“ in verschiedenen Räumen an Bord steuern. Chronometer und Tochteruhren zeigen zwangsläufig stets genau die gleiche Zeit an. Auch Navigationsgeräte, Fahrtmesser oder Kursweschreiber, können an die Transistoruhr angeschlossen werden.

Transistor-Armbanduhren arbeiten nach dem gleichen Prinzip und enthalten die gleichen Bauelemente. Sie demonstrieren wie kaum ein anderes alltägliches Gerät, was Halbleitertechnik und Feinmechanik zu leisten vermögen. Man bedenke: Spulen, jede mit vielen Windungen allerfeinsten Drahtes bewickelt, Unruh mit Magneten, Transistor, Räderwerk, Spannungsquelle, meistens noch ein Kondensator und ein Widerstand – das alles ist im Gehäuse einer Armbanduhr untergebracht!

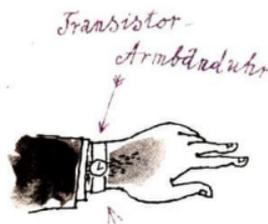
Auch die Stromversorgung ist eine Meisterleistung. Zwar zählt der Stromverbrauch der Transistor-Armbanduhr nur nach Mikroampere, aber dafür soll die Uhr monatelang ohne Auswechseln der Spannungsquelle laufen.

Zwei Arten der Speisung sind üblich. Es gibt Spezialbatterien – sie sind etwa so groß wie ein Groschen –, die Strom für ein bis zwei Jahre liefern. Anschließend müssen sie vom Uhrmacher gegen eine neue Batterie ausgewechselt werden. Statt der Batterie kann auch ein winziger Akkumulator in die Uhr eingesetzt werden. Er treibt die Uhr einige Monate lang und ist anschließend wieder aufzuladen. Das kann der Uhrenbesitzer selbst erledigen: Er setzt die Uhr in einen mitgelieferten „Ladebügel“, schiebt eine Taschenlampenzelle in den Bügel – fertig. Nach zehn bis zwölf Stunden ist der Akkumulator von der Taschenlampenzelle aufgeladen; die Uhr erfüllt erneut ihre Aufgaben.

## Es geht um die Gesundheit

### Hören und Sehen

Hörhilfen nennt man die aus einem Mikrophon, einem Verstärker und einem Hörer bestehenden Geräte, denen es ungezählte Schwerhörige verdanken, daß für sie die Welt nicht stumm bleibt.



*(natürliche Größe  
der Batterie)*

In der Wirkungsweise unterscheidet sich die Hörhilfe nicht von anderen Verstärkeranlagen. Was ihre Konstruktion erschwert, sind die besonderen Bedingungen, die an sie gestellt werden:

Eine Hörhilfe soll unauffällig und so klein und leicht sein, daß sie ihren Träger weder belastet noch in seiner Bewegungsfreiheit behindert. Sie muß dem Ohr eine genügende Schallenergie zustrahlen, darf aber zu gleicher Zeit nur wenig Strom verbrauchen, damit ihr Betrieb nicht zu unwirtschaftlich und teuer wird.

Schließlich muß der Verstärker je nach Art der Erkrankung des Betroffenen häufig bestimmte Frequenzen bevorzugen oder auch benachteiligen, und meistens darf auch eine bestimmte Höchstlautstärke des in das Ohr eingeführten Kleinhörers niemals überschritten werden.

Die ersten Hörhilfen waren mit Röhren bestückt. Sie stellten zwar einen gewaltigen Fortschritt gegenüber den alten Hörrohren dar, konnten aber die genannten Bedingungen noch nicht ganz erfüllen. Das blieb erst Transistor-Hörhilfen vorbehalten, einer Errungenschaft des letzten Jahrzehnts.

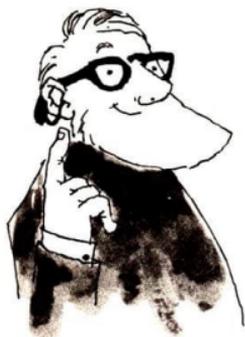
Transistor-Hörhilfen fast aller Länder sind nach gleichen Überlegungen gebaut und sehen sich auch äußerlich ähnlich. Sie enthalten einen drei- oder vierstufigen Transistorverstärker, eine Mikrophonkapsel und eine Batterie oder einen Miniaturakkumulator. Die Lautstärke wird mit einem Regelknopf eingestellt.

Eine in unserer Republik verbreitete Hörhilfe, die „H 30“ des volkseigenen Funkwerkes Kölleda, ist nur 70 mm · 55 mm · 15 mm groß, hat also etwa die Abmessungen einer Zigaretenschachtel. Die Spannungsquelle, eine Knopfzelle, kann mit einem Zusatzgerät immer wieder nachgeladen werden. Die Hörhilfe wiegt noch keine 100 p.

Ein Nachteil vieler Hörhilfen war es, daß ihr Benutzer nicht telefonieren konnte. Um das zu ändern, rüstete man sie mit einer einsteckbaren Telefonspule aus. Die Hörhilfe wird so an den Fernhörer gehalten, daß sich die Telefonspule in der Nähe der Magnetspulen des Hörers befindet. Die Sprechströme des Fernsprechers werden dadurch unmittelbar, ohne Vermittlung des Mikrophons, in das Hörgerät übertragen. Die Telefonspule kann außerdem in Theatern, Lichtspielhäusern, aber auch zu Hause am Rundfunk- oder Fernsehempfänger wertvolle Dienste leisten. Schließt man nämlich an den Tonfilmverstärker oder an den Heimempfänger eine Sendeschleife an, wie sie uns bei Rufanlagen begegnete, so entstehen in der Telefonspule gleichfalls Tonfrequenzspannungen; man hört keine Nebengeräusche aus dem Zimmer, der Lautsprecher braucht nicht zu weit „aufgedreht“ zu werden. Bei der Hörhilfe H 30 ist die Telefonspule im Gehäuse mit untergebracht.

Die Möglichkeiten der Halbleitertechnik sind mit Hörhilfen in Zigaretenschachtelgröße nicht erschöpft. Man trieb die Verkleinerung systematisch voran, wobei man vor allem die berechtigten Wünsche der Gehörleidenden nach Unauffälligkeit des Gerätes





erfüllte. Sehr bald gab es Hörhilfen, die als Haarspange oder auch als Brosche ausgeführt waren. Sie wurden von Hörbrillen abgelöst, in deren Gestell sämtliche Einzelteile der Hörhilfe Platz fanden. Anfänglich brauchte man noch beide Brillenbügel für den Verstärker. Das war eine technisch wenig glückliche Lösung; denn es mußten Leitungen über die Brillenscharniere von einem Bügel zum anderen geführt werden. Heute gibt es diese Komplikationen nicht mehr; ein Brillenbügel reicht aus, alle Bauelemente der Hörhilfe unterzubringen.

Der nächste Schritt führte zum Hörbügel. Er sitzt unauffällig hinter dem Ohr. Man sieht ihn kaum. Doch auch damit ist die letzte Stufe noch nicht erreicht. Ziel der Entwicklung ist es, die ganze Hörhilfe im Ohr zu verbergen. Es existieren bereits einige solche Geräte, die nicht einmal 10 g wiegen. Auch hat man schon Hörhilfen erprobt, die ihre Betriebsenergie durch Umwandlung der menschlichen Körperwärme erhalten und in Form einer kleinen Hülse in das Ohr eingeführt werden. Von einem ganz neuen Weg zu Hörhilfen werden wir bald lesen.

Nicht nur dem Schwerhörigen, sondern auch dem Stummen kann die Halbleitertechnik Hilfe bringen. Für Menschen, die durch eine Operation an den Stimmbändern ihre Sprache verloren, wurde ein Hilfsgerät entwickelt, das ein „künstliches Sprechen“ ermöglicht. In einer Metallhülse sitzt ein Multivibrator (siehe S. 146), dessen Schwingungen einem elektromagnetischen Übertrager zugeleitet werden. Das Gerät wird an den Kehlkopf gehalten und versetzt ihn in Schwingungen. Die Laute werden dann durch Kehlkopf, Mundhöhle, Zunge, Zähne und Lippen gebildet und sind gut zu verstehen. Ein sowjetisches Werk in Kasachstan hat die Serienproduktion solcher Geräte bereits aufgenommen. Sie wiegen nur 50 g. Bei einer anderen Ausführung muß der Stumme ein Ansatzstück des Gerätes in den Mund nehmen.

Das Problem des künstlichen Auges ist noch nicht gelöst. Zwar gibt es Halbleitergeräte, die, nach dem Prinzip eines Echolotes arbeitend, Hindernisse anzeigen; auch existieren fotoelektrische Einrichtungen, mit denen der Blinde hell und dunkel zu unterscheiden vermag, doch von einem eigentlichen Sehen kann noch nicht gesprochen werden. Lediglich die Konstruktion von Lesegeräten ist in jüngster Zeit geglückt. Sie tasten die Druckschrift buchstaben- und zeilenweise ab. In einer Transistorschaltung entsteht für jeden Buchstaben ein charakteristischer Klang, den sich der Blinde bald merkt. Er kann so mit einiger Übung Druckschrift, wenn auch langsam, lesen. Daß man sich mit diesen Resultaten nicht zufrieden gibt, werden wir an anderer Stelle erfahren.

## Funkspruch aus dem Magen

Wie arbeitet das Herz, wenn der Mensch körperlich tätig ist? Wie schlägt der Puls des Sportlers, des Piloten, des Bergmannes, des Bergsteigers? Es ist wichtig, diese Fragen zu beantworten; denn die Antwort erleichtert das Erkennen und die Behandlung von Herzkrankheiten und kann Hinweise geben, wie ein Überlasten des Herzens zu vermeiden ist.

Die üblichen Methoden und technischen Hilfsmittel der Herzuntersuchung sind allerdings weder am Arbeitsplatz noch im Stadion anwendbar; sie setzen voraus, daß die Versuchsperson an Ort und Stelle bleibt.

Daß die Halbleitertechnik auch auf diesem Gebiet ganz neue Möglichkeiten eröffnet, erwies sich bei einer Spartakiade der Völker der UdSSR. Einer Pressenotiz entnehmen wir, daß der sowjetische Eisschnellauf-Olympiasieger Jewgeni Grischin mit einer ganz besonderen Ausrüstung zum 500-m-Lauf antrat. Er führte ein nur 100 g schweres Gerät mit sich, das drahtlos über die Tätigkeit des Herzens berichtete. Der zugehörige Empfänger stand abseits der Kampfbahn und wurde von Ärzten beobachtet.

Anlagen ähnlicher Art schnallte man Werkträgern verschiedener Berufsgruppen für arbeitsphysiologische Untersuchungen um.

Vom Aufbau eines derartigen Gerätes ist für uns eigentlich nur noch der Teil interessant, der den Herz- oder Pulsschlag „ins Elektrische“ übersetzt; denn über Transistorkleinsender und ihre Empfänger haben wir in den vergangenen Kapiteln schon genug erfahren.

Eine recht einfache Methode zur Gewinnung von Meßwerten besteht darin, am Ohrfläppchen des „Versuchskaninchens“ ein elektrisches Lämpchen und einen Fotowiderstand anzuklellen. Das vom Ohrfläppchen durchgelassene Licht schwankt im Rhythmus der Durchblutung, d. h. mit der Pulsschlagfolge. Entsprechend verändert der Fotowiderstand einen Strom, der den Transistorsender steuert. Es werden im Herzschlagrhythmus drahtlos Töne übertragen, die in einem Lautsprecher hörbar gemacht werden. Soll das Beobachtungsergebnis für Vergleichszwecke oder für eine spätere Auswertung festgehalten werden, so koppelt man ein Tonbandgerät oder ein Registriergerät an den Empfänger.

Mit verfeinerten Apparaten hat man bereits regelrechte Elektrokardiogramme, wichtige Hilfsmittel zur Herzuntersuchung, erhalten und drahtlos übertragen können.

Neuerdings helfen ähnliche Geräte bei der Beobachtung und Messung von Gehirnströmen. Auch dabei erwies es sich als Nachteil, daß der Patient an den Encephalographen gefesselt war. Der Einsatz eines Transistorverstärkers und -senders hat diese Fessel gesprengt. Das Gerät ist in einem Kästchen von etwa 9 cm · 6 cm · 5 cm untergebracht und wiegt nur 300 g, behindert also den Patienten nicht. Er kann sich bewegen und reagiert infolgedessen weit ungenügender, als wenn er auf einem Ruhebett läge.



Originalgröße

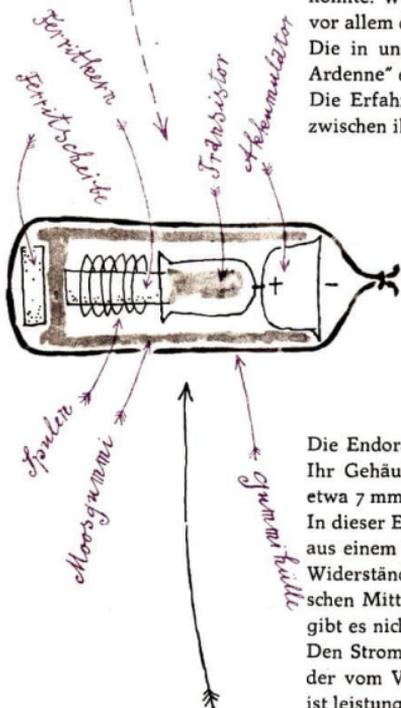


Geradezu Weltberühmtheit erlangten in den vergangenen Jahren die Magen-Darm-Sonden, auch Endoradiosonden oder Intestinalsender genannt.

Man drückt einem Magen- oder Darmkranken eine kleine Kapsel, aus Plastikmaterial angefertigt oder mit einer Gummihaut überzogen, in die Hand; er schluckt sie mühelos hinunter, und schon beginnt die Kapsel, die einen Radiosender und Meßfühler birgt, ihre Botschaften an einen Empfänger zu funken, der neben dem Bett des Patienten steht. Druck-, Temperatur- und Säuregehaltswerte werden übermittelt; außerdem kann leicht festgestellt werden, wo sich die Radiosonde jeweils befindet und mit welcher Geschwindigkeit sie Magen und Darm durchwandert. Von alledem merkt der Patient nichts.

Man hat die Magen-Darm-Sonden „Sputniks im menschlichen Körper“ genannt; die Bezeichnung ist nicht schlecht gewählt. Genau wie ein Erdtrabant liefert die Endoradiosonde dem Wissenschaftler auf einfache Weise und ohne Unterbrechung Daten, die er sonst nicht oder nur auf Umwegen und durch indirekte Schlüsse erhalten könnte. Wie beim Sputnik kommt es bei der Magen-Darm-Sonde vor allem darauf an, Gewicht und Raum zu sparen.

Die in unserer Republik vom „Forschungsinstitut Manfred von Ardenne“ entwickelte Endoradiosonde hat sich seit Jahren bewährt. Die Erfahrungen, die man bei ihrem Einsatz machte, fanden inzwischen ihren Niederschlag in zahlreichen Verbesserungen.



Die Endoradiosonde ist ein wahres Wunder an Miniaturisierung. Ihr Gehäuse ist ganze 26 mm lang, bei einem Durchmesser von etwa 7 mm; es hat also die Abmessungen eines Bleistiftstummels. In dieser Enge findet zunächst der winzige Sender Platz, bestehend aus einem Transistor, zwei Spulen, zwei Kondensatoren und zwei Widerständen. Er arbeitet auf einer Frequenz, die im Bereich zwischen Mittel- und Kurzwellen liegt. Eine besondere Sendeantenne gibt es nicht; ihre Rolle übernehmen die Spulen.

Den Strom für den Sender liefert ein erbsengroßer Akkumulator, der vom VEB Grubenlampenwerk Zwickau entwickelt wurde. Er ist leistungsfähiger und wirtschaftlicher als gleichgroße Akkumulatoren aus dem kapitalistischen Ausland.

Das Meßsystem ist einfach, aber zweckmäßig und zuverlässig. Für

Endoradiosonde

Druckmessungen wird ein Stirrende der Kapsel durch eine Ferrit-scheibe abgeschlossen. Sie ruht auf einer federnden Unterlage und wird je nach dem im Magen oder Darm herrschenden Druck nach innen gedrückt. Dabei nähert sie sich den Spulen des Senders. Die Folge ist eine geringfügige Änderung der Sendefrequenz. Für Säuremessungen wird ein anderer Meßkopf aufgesteckt.

Ein Spezialempfänger nimmt die Signale auf und leitet sie an Meßinstrumente weiter; sie schreiben fortlaufend die Meßdaten nieder. Als Empfangsantenne dient entweder eine Spule, die dem Patienten aufgelegt wird, oder ein „Antennenhemd“, das er überzieht. In diesem Hemd sind Antennendrähte eingnäht.



Die Endoradiosonde wird gewiß bald in vielen Kliniken selbstverständliches Hilfsmittel bei der Aufklärung von Magen- und Darm-erkrankungen werden. Schon experimentiert man mit noch kleineren „Radiopillen“. Aus Japan wird von einer Magensonde berichtet, die keinen Sender und keine Spannungsquelle enthält, sondern nur durch Echos antwortet, wenn sie von außen durch Funkwellen „gefragt“ wird.

Die Veterinärmediziner haben den Nutzen von Magen-Darm-Sonden inzwischen gleichfalls erkannt. Um die Druckverhältnisse in Kuhmägen zu untersuchen, läßt man die Kuh eine Endoradiosonde schlucken. Ihr Sender muß etwas leistungsfähiger sein; denn als Empfangsantenne benutzt man den Draht der Weideumzäunung, so daß eine größere Entfernung zu überbrücken ist. Der Sender bleibt bis zu 9 Tagen in den Mägen der Kuh und liefert während dieser ganzen Zeit Meßwerte. Anschließend wird er chirurgisch entfernt.

### In stationärer Behandlung

Immer zahlreicher, besser und vielseitiger werden die technischen Hilfsmittel, die Ärzten und ihren Mitarbeitern für das Erkennen sowie die Behandlung von Krankheiten und Verletzungen zur Verfügung stehen. Sei es eine einfache Rotlichtbestrahlung, sei es die komplizierteste Operation: Stets tragen Überwachungs- und Kon-





trollgeräte dazu bei, die Wirksamkeit der Behandlung, die Genauigkeit einer Untersuchung zu erhöhen, Schädigungen des Patienten auszuschließen und die Gefahren einer Operation soweit wie nur irgend möglich herabzusetzen. Ganze Arsenale von Geräten sind in den vergangenen Jahren in unsere Krankenhäuser und Polikliniken eingezogen; viele Millionen hat der Arbeiter- und Bauern-Staat dafür ausgegeben, die Untersuchungs- und Heilverfahren auf den neuesten wissenschaftlich-technischen Stand zu bringen.

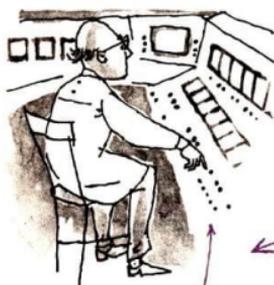
An einer Stelle hat sich bisher trotzdem wenig geändert: Noch immer gehen Schwestern von Krankenbett zu Krankenbett, um mehrmals täglich Pulsschlag und Temperatur zu messen. Diese Methoden passen eigentlich nicht mehr so recht in das Bild einer modernen Klinik, und, was schlimmer ist, es haften ihnen manche Mängel an.

Die Fieber- und Pulsmessungen sind zur Zeit gewissermaßen Momentaufnahmen des Krankheitsgeschehens. Man kann aus ihnen zwar wertvolle Schlüsse ziehen, aber eine ständige Kontrolle oder wenigstens die Möglichkeit, jederzeit zu kontrollieren, wäre viel besser. Jede Zunahme der Pulsfrequenz, jede rasche Temperaturänderung – Anzeichen für eine Veränderung im Zustand des Patienten – würden sofort bemerkt; notwendige Gegenmaßnahmen könnten unverzüglich eingeleitet werden.

Überlegen wir uns auch, welche Belastung für das Pflegepersonal die täglichen Routinemessungen darstellen. Könnten sie wegfallen, so wäre das Personal nicht nur von einer eintönigen Tätigkeit befreit; es fände auch mehr Zeit, sich um jeden Patienten zu kümmern.

Im Krankenhaus von morgen wird es die Schale mit den Fieberthermometern und die Sanduhr zum Pulszählen nicht mehr geben. Statt dessen wird zu jeder Station ein Raum gehören, dessen eine Wand dem Regiepult eines Rundfunkstudios oder dem Bedienungs-feld einer elektronischen Rechenmaschine ähnelt.

Treten wir näher. Vor uns auf dem Tisch ein Feld von Druckknöpfen, über jeder Druckknopfreihe ein Schildchen mit dem Namen des Patienten und kurzen Angaben über seine Krankheit. Drücken wir in der Reihe „Wilhelm Müller“ den Knopf, auf dessen Fläche ein „P“ zu lesen ist! Sofort erscheint auf einer matten Glasscheibe eine leuchtende Zahl: die Pulsfrequenz Herrn Müllers. Drücken wir den Knopf „T“, so können wir die Temperatur des Patienten ablesen. Will der Arzt hören, wie das Herz eines Patienten arbeitet, so genügt es, einen Schalthebel umzulegen. Sofort überträgt ein Lautsprecher das Herzgeräusch. Die Nachtschwester kann sich sogar überzeugen, ob ihre Patienten ruhig schlafen; denn ein weiterer Druckknopf schaltet einen Lautsprecher ein, der das Atemgeräusch überträgt. Leuchtet aber über der Druckknopfreihe eine rote Lampe auf, so heißt das: Gefahr! Die Meßwerte zeigen plötzlich unerwartete Abweichungen.



morgen:  
Beobachtungszentrale

Die technischen Grundlagen für solche Einrichtungen sind bereits vorhanden. Wie die Pulsfrequenz kontrolliert und gemessen werden kann, ist uns schon bekannt. Bei stationärer Behandlung kann das gleiche Verfahren angewandt werden. Herztöne und Atemgeräusche werden von empfindlichen Mikrofonen aufgenommen und gelangen, wenn sie einen Transistorverstärker passiert haben, zum Lautsprecher oder auch zu einem Schreibgerät. Verstärker für diesen Zweck sind mit fünf bis sieben Transistoren bestückt und in einem handlichen, mit einem Griff auswechselbaren Baustein zusammengefaßt. Zur Temperaturmessung wählt man Thermistoren, die mit Fernthermometern verbunden sind.

Es ist sogar möglich, den Druck im Blutkreislauf zu messen. Der Druckmesser hat die Form einer Injektionsspritze. In ihr ist eine dünne, elastische Membran ausgespannt, die ein Ferritplättchen trägt. Es nähert sich, je nach der durch den Druck bedingten Durchbiegung der Membran, einer Spule, verändert deren elektrische Daten und liefert damit die gewünschten Meßwerte.

Die Übertragung der Meßdaten braucht im Krankenhaus nicht drahtlos zu erfolgen. Es kann ein Kabelnetz mit Anschlüssen an jedem Bett verlegt werden; sämtliche Geräte können aus einer zentralen Spannungsquelle mit Elektroenergie versorgt werden. Batterien oder Akkumulatoren in den einzelnen Meßgeräten sind nicht nötig.

Die Mikrophone, Thermistoren, Druckmesser und Fotowiderstände sind am Körper des Patienten befestigt. Dabei sind noch technische Schwierigkeiten zu überwinden; denn selbstverständlich dürfen die Geräte den Patienten nicht behindern. Das Ziel ist es, alle „Meßfühler“ in einem kleinen Meßkopf zusammenzufassen, der an geeigneter Stelle am Körper des Patienten angebracht wird.

Schon heute werden die beschriebenen Anlagen in Sonderfällen – vor allem während und nach Operationen – angewandt, um durch die ständige Kontrolle wichtiger Körperfunktionen den Operationsverlauf und plötzliche Änderungen im Zustand des Patienten mit Sicherheit verfolgen zu können.



### Vom Schrittmacher zum künstlichen Auge

Bereits im ersten Kapitel dieses Buches haben wir von einem Transistorgerät gelesen, das steuernd in die Tätigkeit des menschlichen Herzens eingreift. Man nennt es Schrittmacher oder auch Stimulator. Es kann einen Patienten retten, dessen Herzmuskel versagt, zu schwach oder zu unregelmäßig arbeitet. Das Arbeitsprinzip des Stimulators besteht darin, den Herzmuskel im richtigen Rhythmus durch schwache elektrische Schläge anzustoßen. Derartige Geräte werden zwar bereits seit längerer Zeit hergestellt, doch konnten sie wegen ihrer Abmessungen und ihres Gewichts nur im Operationssaal oder am Krankenbett eingesetzt werden.

Halbleiterstimulatoren dagegen sind so klein und so bescheiden im Stromverbrauch, daß sie ohne weiteres vom Patienten mitgeführt und für lange Zeit aus einer kleinen Batterie gespeist werden können. Sie erzeugen elektrische Spannungsimpulse, die dem Herzmuskel zugeleitet werden. Das geschieht durch Einoperieren von Elektrodenröhren oder von einer kleinen Spule, die vom Schrittmacher beeinflusst wird und Spannungsimpulse an den Herzmuskel weitergibt. Die Frequenz der Impulse läßt sich einstellen. Man geht jetzt sogar schon dazu über, den ganzen Stimulator unter der Brustwand einzuheilen. Nach drei bis fünf Jahren wird die Miniaturbatterie durch einen einfachen Eingriff ausgewechselt. Vielleicht wird man sogar eines Tages auf die Batterie verzichten können und statt dessen die Körperwärme zur Stromversorgung heranziehen.

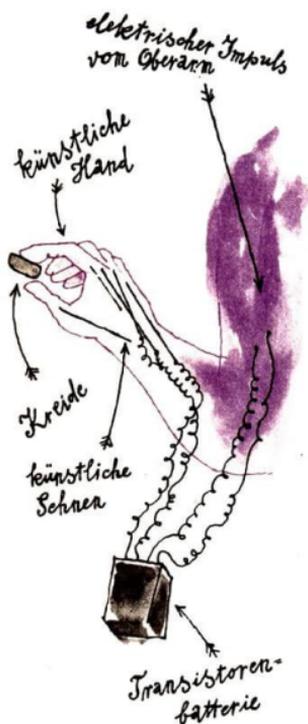
Der Herzstimulator ist nur ein Anfang; ein Anfang allerdings, der es vielen Kranken ermöglicht, wieder aktiv Anteil am Leben zu nehmen. Wie es auf diesem Gebiet vielleicht einmal weitergehen könnte, zeigen Meldungen, nach denen ein Hund mit einem künstlichen, transistorgesteuerten Herzen 13 Stunden lebte.

Überhaupt dürfte das Zusammenwirken von Medizin, Elektronik und Kybernetik eines Tages Auswirkungen haben, von denen wir uns heute noch keine rechte Vorstellung machen können. Grenz ist nicht schon ans Wunderbare, was Wilfred G. Burchett in seinem Buch „Land der Verheißung“ über den Ersten Internationalen Automatisierungskongreß berichtet, der 1960 in Moskau stattfand?

„Einer der ... Anlässe, die den Applaus der Delegierten hervorriefen, war das Auftreten eines jungen Russen, der an eine Tafel ging, ein Stück Kreide nahm und auf russisch ‚Willkommen, Kongreßdelegierte!‘ schrieb. An sich nichts Bemerkenswertes – wenn er nicht eine künstliche Hand gehabt hätte, vielleicht das vollkommenste künstliche Glied, das je erfunden wurde. Der junge Mann war gekommen, um einen Bericht von Professor Abram Kobrinsky über ‚bioelektrische‘ Steuerung zu veranschaulichen. Die Finger- ‚muskeln‘ wurden durch Elektrizität gespeist, die von den Oberarmmuskeln des jungen Mannes ausging. Der menschliche Organismus erzeugt ganz schwache elektrische Ströme, die in diesem Fall durch eine Transistoren- batterie<sup>1</sup>, so groß wie ein Zigaretten- schächtelchen, an der Hüfte des jungen Mannes verstärkt wurden. Von dort wurde der Strom durch künstliche Sehnen an die Stelle geleitet, wo die ursprünglichen Sehnen durchgetrennt worden waren. Die Finger erhielten genau die Strommenge, die für einen elektronischen ‚Gefühlssinn‘ erforderlich ist.“

Wenige Zeilen weiter heißt es: ... im Januar 1962 wurden auf einer außerordentlichen Tagung der Grusinischen Akademie der Wissenschaften weitere Entwicklungen auf dem Gebiet der bioelektrischen Ströme demonstriert. Unter anderem war von der phantastisch anmutenden, aber durchaus realen Möglichkeit die

<sup>1</sup> Anmerkung des Verlages: Gemeint ist ein mit Transistoren bestücktes elektronisches Gerät.

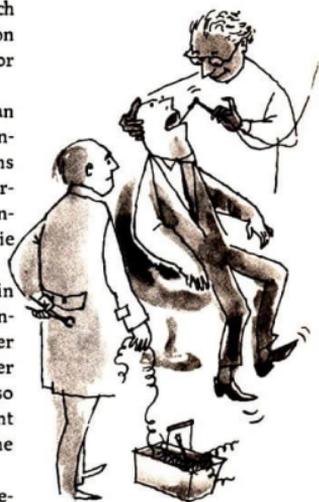


Rede, Blinden künstliche Augen zu geben, die weit besser sind als natürliche. Einem Kollektiv unter der Leitung von Professor Boris Bognew und dem Ingenieur Wassili Gudow ist es gelungen, den bioelektrischen Strom der Sehnerven aufzufangen, der schließlich so verstärkt werden könnte, daß man ein künstliches Auge von ebensolcher Vollkommenheit erhielte, wie sie die von Professor Abram Kobrinsky vorgeführte künstliche Hand aufweist."

In eine ähnliche Richtung weist auch eine Methode, mit der man hofft, der Schwerhörigkeit auf ganz neue Weise begegnen zu können. Grundlage des noch in den Anfängen steckenden Verfahrens ist die Beobachtung, daß zwischen den Zahnerven und den Gehörzentren des Gehirns eine direkte Verbindung besteht und Reizungen der betreffenden Nervenenden demzufolge unmittelbar an die Gehörzentren weitergeleitet werden.

Man will nun einen gesunden Zahn, dessen Nerv noch völlig in Ordnung ist, vorsichtig ausbohren und in der Bohrung einen winzigen Empfänger unterbringen, der im wesentlichen aus einer Schicht Halbleitermaterial mit einer darüberliegenden Gold- oder Silberschicht besteht. Nimmt dieser Empfänger Funkwellen auf, so werden die Nervenenden gereizt. Zur Erzeugung der Wellen dient ein winziger Sender, der zusammen mit einem Mikrophon wie eine Armbanduhr getragen wird.

Ob sich dieses Verfahren, das in amerikanischen Zeitschriften beschrieben wurde, in der Praxis durchführen läßt, ist zur Zeit noch nicht zu beurteilen. Es hätte auf alle Fälle den Vorteil, daß auch Menschen mit zerstörtem „Cortischem Organ“, bei denen normale Hörhilfen versagen, nicht taub blieben.



## Strom aus dem Äther

### Aufregung um eine Laubenkolonie

Bei jeder Rundfunksendung, bei jeder Funkverbindung wird Energie drahtlos von den Sende- zu den Empfangsantennen übertragen.

Aber auch eine „echte“ drahtlose Energieübertragung, die Hochspannungsleitungen und Stromversorgungsnetze überflüssig macht, existierte schon einmal – und das vor dreißig Jahren! Sie wurde allerdings weder in einer wissenschaftlichen Forschungsstätte noch in einem Industrielaboratorium ausprobiert, sondern in einer Laubenkolonie.

In jener Zeit, als in den kapitalistischen Ländern die Zahl der Arbeitslosen eine traurige Rekordhöhe erreicht hatte und vielen tausend Familien der elektrische Strom gesperrt worden war, weil sie ihn nicht mehr bezahlen konnten, erstrahlten am Rande einer deutschen Großstadt Abend für Abend die Fenster einer Laubenkolonie in hellem Licht; hier und da hörte man sogar Radiomusik aus geöffneten Fenstern oder Türen.



Die Sache war höchst rätselhaft. Wo nahmen die „armen Leute“, von denen viele in den Lauben Dauerquartier bezogen hatten, um Miete zu sparen, das Geld für die elektrische Beleuchtung her? Hatten sie etwa das Lichtnetz angezapft? Ein besorgter Stadtvater erkundigte sich bei den städtischen Gas- und Elektrizitätswerken; aber in der Nähe der Laubenkolonie gab es weder eine Freileitung noch ein Kabel. Das einzig „Elektrische“ in der näheren Umgebung waren die Antennenmasten des Rundfunksenders. Sie waren tatsächlich die unfreiwilligen Energiespender.

Die zahlreichen Hochantennen im Laubengelände fingen einen Teil der Hochfrequenzenergie des Senders auf und speisten damit die Glühlampen der Wohnlauben.

Das gab eine Aufregung! So rasch wie möglich wurde ein Prozeß gegen die findigen „Energiediebe“ angestrengt. Aber es war gar nicht einfach, ihnen beizukommen. Nirgends war vorgeschrieben, was ein Rundfunkhörer, der seine Gebühren bezahlte, mit der frei ins Haus gelieferten Energie anfangen durfte oder nicht. Rundfunkgebühren aber waren stets pünktlich bezahlt worden, sogar von Laubenbewohnern, die überhaupt kein Rundfunkgerät besaßen. Schließlich aber schaffte man doch, das „Zweckentfremden“ von Hochfrequenzenergie zu untersagen. Seitdem darf die von Sendern ausgestrahlte Energie nur noch „für Zwecke des eigentlichen Empfanges“ benutzt werden.

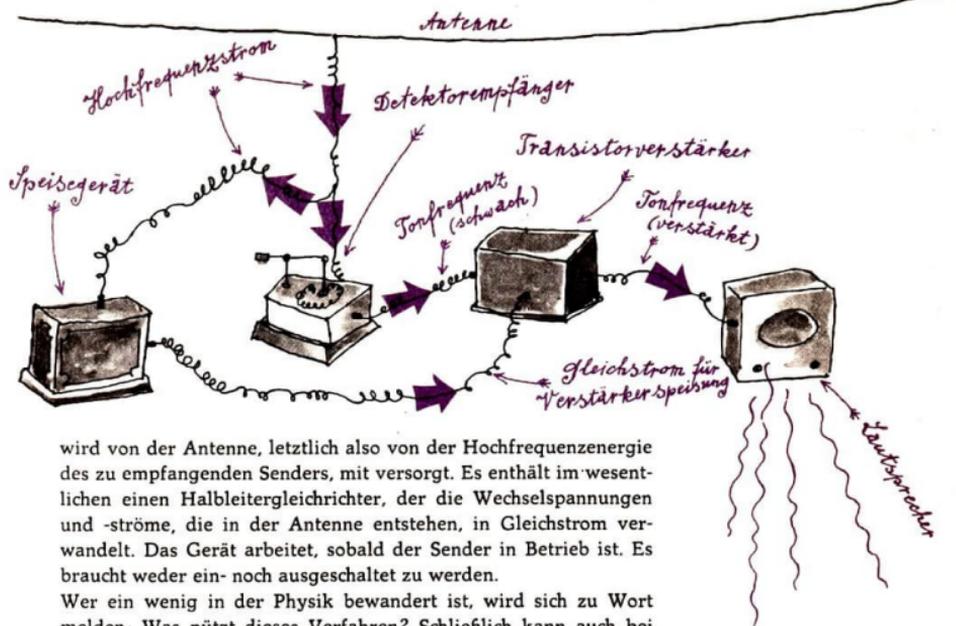
### **Strom – beim Sender geborgt**

Wir haben die kleine Geschichte nicht etwa berichtet, um den Lesern einen Tip zu geben; denn erstens ist es nach wie vor verboten, eine „drahtlose Beleuchtung“ aufzubauen, zumal es schwerwiegende technische Gründe für ein solches Verbot gibt, und zweitens steht wirklich nur in unmittelbarer Nähe der Antennen eines Großsenders ausreichend Energie zur Verfügung. Sie würde allerdings durch den beschriebenen Mißbrauch „richtigen“ Rundfunkhörern entzogen.

Mit der Halbleitertechnik und dank ihrer wenig Energie benötigten Bauelemente ist das Prinzip, Kleingeräte drahtlos mit der notwendigen Betriebsenergie zu versorgen, wieder aktuell geworden. Daher ist durchaus vorstellbar, daß es einmal größere Bedeutung erlangen wird.

Sicher wissen die meisten Leser, was ein Detektorempfänger ist: Ein einfachstes Empfangsgerät, das auf jede Verstärkung verzichtet und infolgedessen auch keine Batterie und kein Lichtnetz benötigt; es kommt mit der vom Sender gelieferten Energie aus, wodurch allerdings Lautstärke und Reichweite begrenzt bleiben.

Die sehr geringen Speiseleistungen, die ein Transistorverstärker benötigt, gestatten, den Detektorempfänger zu erweitern. Dem Detektorteil wird ein Transistorverstärker nachgeschaltet. Er erhält seine Betriebsspannung aus einem Speisegerät. Dieses aber



wird von der Antenne, letztlich also von der Hochfrequenzenergie des zu empfangenden Senders, mit versorgt. Es enthält im wesentlichen einen Halbleitergleichrichter, der die Wechselspannungen und -ströme, die in der Antenne entstehen, in Gleichstrom wandelt. Das Gerät arbeitet, sobald der Sender in Betrieb ist. Es braucht weder ein- noch ausgeschaltet zu werden.

Wer ein wenig in der Physik bewandert ist, wird sich zu Wort melden: Was nützt dieses Verfahren? Schließlich kann auch bei diesem Gerät nur die am Empfangsort von der Antenne aufgefangene Energie verarbeitet werden; es müßte also gleichgültig sein, ob man einen einfachen oder den mit Transistorverstärker erweiterten Detektorempfänger benutzt. Das stimmt, wenn wir nur die Empfangsenergie betrachten. Versuche haben jedoch gezeigt, daß die Wiedergabe nicht nur besser, sondern auch etwas lauter als mit dem normalen Detektorgerät ist. Wir können hier nicht näher auf die Ursachen eingehen. Es sei nur gesagt, daß im einfachen Detektorempfänger ein erheblicher Anteil der Empfangsenergie verlorenght und daß sich diese Verluste in der erweiterten Schaltung vermindern lassen. Solche Geräte können daher durchaus nützlich sein, z. B. für drahtlose Ruf- oder Signalanlagen, deren Empfänger dann völlig ohne Batterie betrieben werden können.

Aber es ist sogar möglich, nach diesem Verfahren Empfänger für Fernempfang zu konstruieren. Stellen Sie sich vor, Sie wohnen in der Nähe eines leistungsfähigen Rundfunksenders. In Ihre Hochantenne schalten Sie das Speisegerät. Es wird mit einem Abstimmkreis auf die Welle des nahen Rundfunksenders eingestellt. Ein Transistorempfänger, der vom Speisegerät versorgt wird, ist aber auf einen Fernsender abgestimmt. Dann benutzen Sie die Energie des nahen Senders, um einen Fernsender zu empfangen. Die technische Verwirklichung dieses Prinzips bereitet keine

Schwierigkeiten. Versuchsgeräte arbeiteten einwandfrei. Allerdings reichte ihre Leistung längst nicht an die „richtiger“ Empfänger heran. Rundfunkgeräte, die vom Ortssender Energie „stehlen“, werden wohl nie Bedeutung erlangen.

### Sender antworten von selbst

Man mag die Beispiele der vorangegangenen Abschnitte lediglich als interessante Demonstration dessen ansehen, was man mit Halbleitern alles anfangen kann. Gehen wir jedoch einen Schritt weiter, so wird jedem der Nutzen der drahtlosen Speisung von Kleingeräten sofort einleuchten.

Das Speisegerät kann nämlich nicht nur einen Empfänger, sondern auch einen kleinen Sender versorgen. Er muß nicht ein- oder ausgeschaltet werden, sondern „antwortet“ immer dann, wenn sein Speisegerät Energie liefert, wenn es also die Radiowellen eines anderen Senders empfängt. Wird das Speisegerät auf eine bestimmte Wellenlänge abgestimmt, so antwortet es nur dem Sender, der diese Wellenlänge benutzt. Anwendungsmöglichkeiten für derartige „Antwortsender“ gibt es in großer Zahl, vor allem dort, wo ein Sender nur selten oder für eine kurze Zeitspanne in Betrieb sein muß.

Denken wir z. B. an den Seenotrettungsdienst. Die heute gebräuchlichen Rettungsbootsender erhalten ihren Strom entweder aus einem mit einer Handkurbel angetriebenen Generator oder aus Batterien. Bei Einsatz eines kleinen Antwortsenders brauchte man beides nicht. Der Sender würde auf eine international vereinbarte Frequenz abgestimmt und antwortete selbsttätig immer dann, wenn ihn „Suchzeichen“ der zur Hilfe herbeieilenden Schiffe und Flugzeuge trafen. Die Antwortzeichen könnten angepeilt und der Standort der Rettungsboote ermittelt werden.

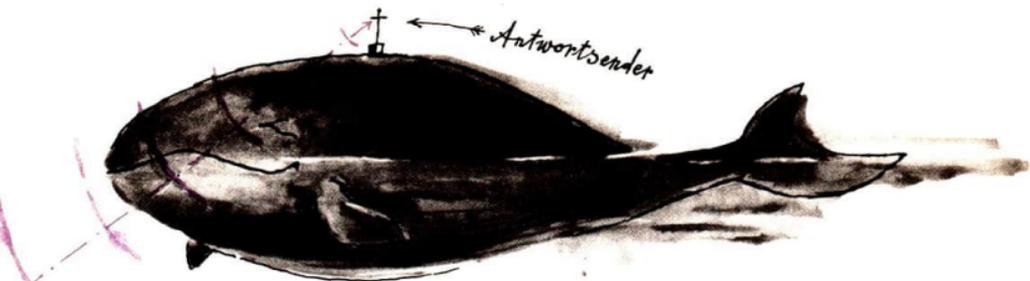
Da derartige Sender im Höchstfall zwei- oder dreihundert Pond wögen und nicht größer als eine Sardinenbüchse wären, ließen sie sich ohne weiteres in einer Schwimmweste mit unterbringen. Sogar einzelne Schwimmer könnten angepeilt und gerettet werden.

Gleiche oder nur wenig veränderte Geräte könnten das Aufsuchen von Verschütteten bei Lawinenstürzen oder Unfällen im Bergbau erleichtern.

Einer Wartung oder einer Pflege bedürften die Sender nicht. Man könnte ihre wenigen Einzelteile fest in Kunststoff einbetten und erhielte so Geräte, die auch härtesten mechanischen und klimatischen Beanspruchungen gewachsen wären. Ihr Hauptvorteil läge darin, daß es „ewige Sender“ wären. Sie würden nach zehn oder zwanzig Jahren noch ebenso auf einen Anruf antworten wie am ersten Tag.

Allerdings setzte die Anwendung derartiger Geräte voraus, daß der Unfall oder das Schiffsunglück bereits bekannt wäre; denn die Sender könnten im Gegensatz zu den derzeit üblichen Not-



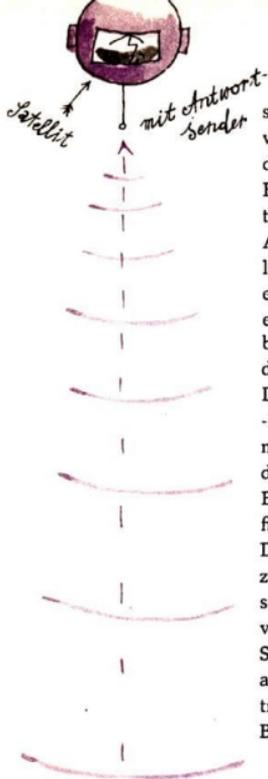


sendern und Funkbojen nicht von sich aus um Hilfe rufen. Im allgemeinen würde sich aber dieser kleine Nachteil nicht störend bemerkbar machen; denn fast immer ist auf See noch Zeit, Notrufe mit dem Bordsender auszustrahlen, und auch Bergwerks- oder Lawinenunglücke bleiben nicht verborgen.

An Hafeneinfahrten, über Untiefen und an Binnenwasserstraßen, zur Markierung von Fischnetzen, Fahrwassertonnen, Riffen und erlegten Walen ließen sich mit einem Minimum an Aufwand und Wartung Funkfeuer anbringen, die keine Spannungsquelle besäßen und nur antworteten, wenn sie auf einer vereinbarten Frequenz Funksignale empfangen. „Opferte“ man für derartige Geräte noch zwei oder drei Transistoren mehr, so könnte die Antwort sogar mit einer charakteristischen Punkt-Strich-„Kennung“ versehen werden, an der das Funkfeuer von anderen, in der Nähe befindlichen Sendern zu unterscheiden wäre. Welche Erleichterung brächten solche Anlagen nicht nur für „große Pötte“, sondern auch für Sportboote, die mit einem entsprechenden „Abfragegerät“ zum Ausstrahlen der Suchzeichen ausgerüstet wären! Auch an Luftstraßen über menschenleeren Gebieten, beispielsweise auf der Polarroute oder auf der sowjetischen Fluglinie zu den Forschungslagern in der Antarktis, könnten „ewige Funkfeuer“ wertvolle Dienste leisten.

Im Straßenverkehr könnten bei schlechten Sichtbedingungen ähnliche Kleinstgeräte das gefährliche Auffahren verhindern. Im Heck des Kraftwagens würde ein Antwortsender untergebracht, an der Vorderseite ein Abfragegerät, das bei Nacht oder im Nebel Suchzeichen in Richtung der Fahrbahn strahlte. Träfen sie auf die Antenne des vorausfahrenden Wagens, so kehrten Antwortzeichen zurück, die eine Warnlampe blinken ließen. Es wäre sogar möglich, die Anlage so einzustellen, daß sie auf eine bestimmte, von der jeweiligen Geschwindigkeit abhängige Entfernung anspräche.

Das Problem der „Abfrage“ kennt auch die Luftfahrt. Auf den Radarschirmen der Flugüberwachungsstellen erscheinen als Leuchtflecke zwar sämtliche Flugzeuge, die sich innerhalb der Reichweite der Station befinden, aber im Funksprechverkehr ist oft nicht sofort zu entscheiden, um welches der auf dem Radarschirm vorgezeichneten Flugzeuge es sich handelt. Seit Jahren ist man daher bemüht, Flugzeuge mit „Kennungsgebern“ auszurüsten, mit Antwort-



sendern, die charakteristische Funkzeichen ausstrahlen, sobald sie von den Impulsen einer Radarstation getroffen werden. An Hand dieser Zeichen wären die Flugzeuge leicht zu unterscheiden.

Bisher scheiterte die allgemeine Einführung solcher Geräte am technischen Aufwand, am Raumbedarf und auch am Gewicht. Antwortsender, wie wir sie in den letzten Abschnitten kennenlernten, besitzen diese Nachteile nicht. Sie könnten leicht in irgendeinem „freien Eckchen“ untergebracht werden und brauchten nicht einmal mit der übrigen elektrischen Anlage des Flugzeuges verbunden zu werden. Empfindliche Empfänger am Boden würden die Antwortsignale auffangen.

Das gleiche Verfahren ließe sich zur Positionsbestimmung und -kontrolle von Raketen und Satelliten anwenden. Auch könnte man den Antwortsender gewissermaßen als Notsender benutzen, der auch dann noch arbeitete, wenn das von Sonnenbatterien mit Energie versorgte Bordnetz der Rakete oder des Satelliten ausfiel.

Drahtlose Wechselsprechanlagen ließen sich ebenfalls von einem zentralen Sender aus speisen. Er führte den beweglichen Kleinstationen des angeschlossenen Funknetzes die zum Beantworten von Anrufen nötige Energie zu. Allerdings müßte der zentrale Sender ständig eingeschaltet bleiben. Verstummt er, so fehlte auch allen angeschlossenen Stationen die Möglichkeit, die Zentrale anzurufen. Dafür aber kämen die beweglichen Stationen ohne Batterie aus.

### Die Stimme als Kraftwerk

Wenn nun aber kein „Speisesender“ in der Nähe ist und Energie liefert? Für diesen Fall gibt es eine geradezu raffinierte Methode, einen Kleinstsender mit Strom zu versorgen. Beim „sprachgespeisten“ Sender ist es die Energie der Schallwellen, die nicht nur das Sendemikrophon erregt, sondern gleichzeitig auch die Stromversorgung übernimmt.

Das Sendemikrophon wandelt die Schallschwingungen in Wechselspannungen und -ströme von der Frequenz der Schallwellen um. Nur ein Teil dieser Wechselstromenergie wird benutzt, um den Sender zu modulieren, seine Hochfrequenzschwingungen also im Takte der Schallwellen zu verändern. Der andere Teil der vom Mikrophon abgegebenen Energie wird einem Transformator zugeführt, anschließend mit einem Germaniumgleichrichter gleichgerichtet und zur Speisung des Sendetransistors benutzt.

Der Sender ist in Betrieb, sobald in das Mikrophon gesprochen wird. Besaßen die ersten Versuchsausführungen schallgespeicherter Sender noch die Größe einer Taschenlampe, so sind die jüngsten Ausführungen so klein, daß man sie bequem um den Unterarm schmallen kann. Trotzdem wurden bereits Entfernungen bis zu vier Kilometern überbrückt.



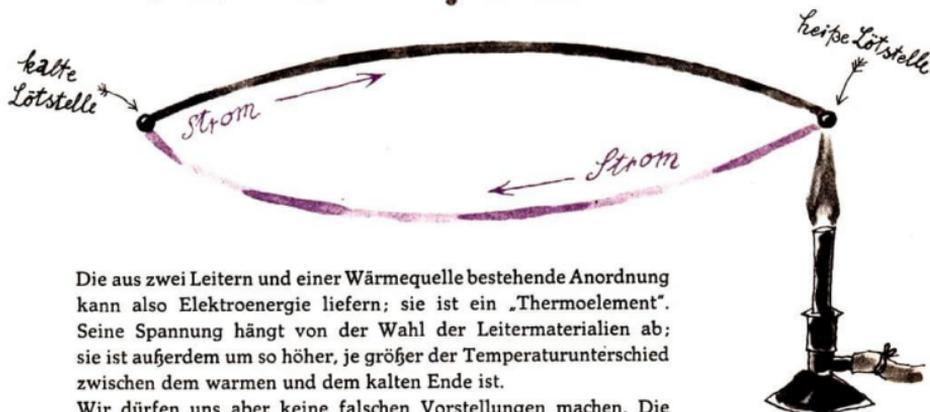
## Halbleiter zwischen warm und kalt

### Die Lötstelle als Spannungsquelle

Der größte Teil der gewaltigen Mengen an Elektroenergie, die wir täglich verbrauchen, wird auf recht umständliche Weise gewonnen. In allen Wärmekraftwerken verwandelt sich die Energie der Brennstoffe zunächst in mechanische Energie, und erst aus ihr erhalten wir durch nochmalige Umwandlung elektrischen Strom. Kesselhäuser, Turbogeneratoren und viele andere komplizierte Apparaturen und Aggregate sind dazu erforderlich; überall treten Verluste auf, so daß sich auch in den modernsten Kraftwerken nur ein verhältnismäßig kleiner Teil der Brennstoffenergie als Elektroenergie wiederfindet. Nicht einmal beim Kernkraftwerk ist das anders; denn auch in ihm kommt man bisher nicht ohne zwei Energieumwandlungen aus.

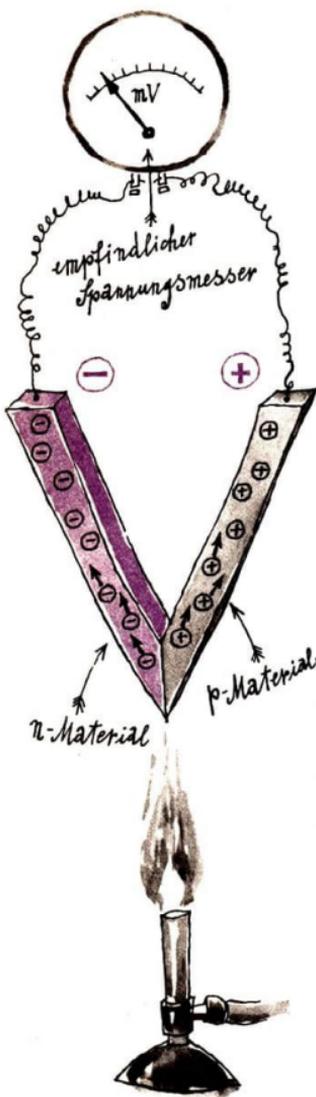
Es ist eines der großen technischen Probleme unserer Zeit, die Methoden der Energiegewinnung zu vereinfachen und wenigstens den Umweg über die mechanische Energie zu sparen, Wärmeenergie also unmittelbar in Elektroenergie zu verwandeln.

Schon vor 140 Jahren entdeckte der deutsche Physiker Seebeck (1770 bis 1831), daß Wärme einen elektrischen Strom verursachen kann. Sein „Wärmekraftwerk“ war verblüffend einfach: Lötete man zwei Drähte aus verschiedenen Metallen an beiden Enden zusammen und erhitzte man die eine Lötstelle, während die andere kühl blieb, so floß in der aus den Drahtstücken gebildeten Schleife ein elektrischer Strom. Trennte man die Schleife an der kalten Lötstelle auf, um ein Voltmeter anzuschließen, so zeigte es eine elektrische Spannung an, solange die andere Lötstelle erhitzt wurde.



Die aus zwei Leitern und einer Wärmequelle bestehende Anordnung kann also Elektroenergie liefern; sie ist ein „Thermoelement“. Seine Spannung hängt von der Wahl der Leitermaterialien ab; sie ist außerdem um so höher, je größer der Temperaturunterschied zwischen dem warmen und dem kalten Ende ist.

Wir dürfen uns aber keine falschen Vorstellungen machen. Die Spannung eines derartigen Thermoelementes zählt allenfalls nach Tausendsteln eines Volt. Um auf die niedrigsten technisch verwendeten Spannungen zu kommen, mußten zahlreiche Thermoelemente so zu einer „Thermosäule“ oder „Thermobatterie“ zu-



sammengeschaltet werden, daß sich die einzelnen Spannungen addierten. Bei einer Temperaturdifferenz von 200 Grad zwischen der heißen Lötstelle und dem „kalten“ Leiterende müßte eine Thermosäule aus 11000 Einzelementen mit Wismut und Antimon bestehen, um die übliche Netzspannung von 220 V liefern zu können.

Der Wirkungsgrad der Thermosäulen blieb sehr gering. Eine weit verbreitete Thermobatterie – sie wurde vor etwa fünfzig Jahren entwickelt – hatte eine Spannung von nur 4 V. Sie verbrauchte in einer Stunde 170 l Gas zum Heizen der Lötstellen, erreichte aber nur einen Wirkungsgrad von etwa 0,5 %. Die je Stunde gewonnene Elektroenergie entsprach damit noch nicht einmal der Verbrennungswärme von 1 l Gas. Bei anderen Ausführungen von Thermobatterien erhielt man ähnliche Ergebnisse.

Selbst ältere Elektrizitätswerke nutzten die Brennstoffe mehr als 50mal besser aus. Damit war zunächst das Todesurteil über die Thermobatterie als Energiequelle gesprochen. Als Meßfühler dagegen, zur Messung hoher Temperaturen und hochfrequenter Wechselströme, werden Thermoelemente häufig eingesetzt.

Als man lernte, Halbleitermaterialien für den Bau von Thermoelementen zu benutzen, ergab sich ein ganz anderes Bild: Der Wirkungsgrad solcher Thermoelemente liegt zwischen 5 % und 10 %. Damit erscheinen sie als Energiequelle schon eher brauchbar.

Doch wir müssen endlich erfahren, worauf überhaupt die Wirkungsweise eines Thermoelementes beruht. Daß wir dabei gezwungen sein werden, stark zu vereinfachen, soll uns nicht stören.

Wir fügen zwei Streifen aus Halbleitermaterialien verschiedenen Leitungstypus an einem Ende zusammen, lassen aber die anderen Enden zunächst unverbunden. Die Stelle, an der n- und p-Gebiet zusammenstoßen, wird erhitzt. Durch die Wärmezufuhr werden zahlreiche zusätzliche Ladungsträger freigesetzt. Weil gleichzeitig eine Sperrschicht entsteht, können sie nicht wieder rekombinieren. Die Ladungsträger werden, ähnlich wie beim Fotoelement, „sortiert“. Im n-leitenden Streifen entsteht gewissermaßen ein Überdruck, der Elektronen zum kühlen Streifenende treibt. Im p-leitenden Gebiet widerfährt den Löchern dasselbe; sie wandern zum kühlen Streifenende. Wir können daher zwischen den freien Streifenenden eine elektrische Spannung messen. Verbinden wir die Enden, so gleichen sich die unterschiedlichen Ladungen aus, es fließt Strom. Da immer neue Löcher und Elektronen in Marsch gesetzt werden und sich der Ausgleichsvorgang ständig und pausenlos vollzieht, hält der Stromfluß an, bis die Wärmequelle entfernt wird.

Nehmen wir die Wärmequelle weg, und verbinden wir statt dessen die bisher freien Schenkelenden miteinander! Müßte sich dann nicht auch an diesem Ende eine Spannung ergeben? Sie entsteht tatsächlich. Doch sie ist, wenn beide Enden die gleiche Temperatur aufweisen, der Spannung am ehemals heißen Ende gleich, aber

entgegengesetzt gerichtet. Die Spannungen heben sich auf. Nur wenn ein Schenkelende wärmer als das andere ist, wird dieses Gleichgewicht gestört, und wir erhalten eine Spannung und einen Strom.

### Der stumme Generator

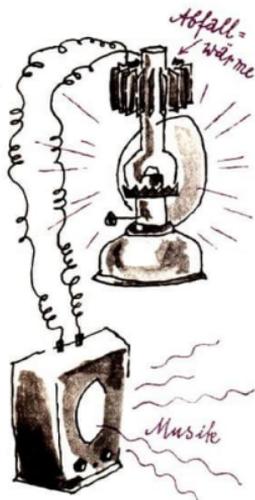
Halbleiterthermoelemente werden gleichfalls zu Thermo Säulen und Thermobatterien zusammengefügt. Zahlreiche Materialien dafür sind inzwischen erprobt worden. Besonders häufig greift man zu halbleitenden Indium-Antimon- und Blei-Tellur-Verbindungen. Die Bauformen richten sich nach dem Verwendungszweck der Thermobatterie. Man kann die Thermoelemente sternförmig um ein von innen geheiztes Rohr anordnen. Sämtliche „heißen“ pn-Übergänge liegen innen, sämtliche „kalten“ Enden dagegen außen. Dort werden sie durch einen Wasserstrom oder durch ein Gebläse gekühlt.

Ein Großkraftwerk auf der Basis von Thermoelementen hätte viele Vorzüge. Die Umwandlung in mechanische Energie fiele weg, es gäbe weder Turbinen noch Generatoren; man brauchte keine beweglichen Teile zu schmieren und zu warten, könnte auf massive Fundamente und auf das große Kesselhaus verzichten.

Zwei Voraussetzungen müßten erfüllt sein, ehe man daran gehen könnte, solche Kraftwerke zu bauen. Der Wirkungsgrad der Thermoelemente müßte gesteigert und der Temperaturunterschied zwischen den heißen und kalten Stellen der Thermoelemente erhöht werden. Gelänge es beispielsweise, Werkstoffe für Thermoelemente zu finden, die die Temperaturen im Inneren eines Kernreaktors aushielten und auch durch die intensive Strahlung nicht ungünstig verändert würden, so könnte das der Ausgangspunkt für sehr wirkungsvolle Thermobatterien werden. Sowjetische Wissenschaftler sind auf der Suche nach hitzebeständigen Werkstoffen für Thermoelemente bereits recht erfolgreich gewesen. Indem sie pn-Übergänge in Kohle-Graphit-Materialien herstellten, glückte es ihnen, Thermoelemente für Arbeitstemperaturen bis 2000 °C zu schaffen.

Aber auch mit den bisher bekannten Stoffen konnte man größere elektrische Leistungen erzielen, wenn auch mit bescheidenem Wirkungsgrad. So gibt es einen Thermogenerator für Militärflugzeuge, der mit Propangas geheizt wird. Das Versuchsmodell eines mit Leuchtöl betriebenen Thermogenerators erreicht sogar eine Leistung von 5 kW. Auch das ist allerdings nur ein winziger Bruchteil dessen, was moderne Turbogeneratoren leisten.

Im Bereich kleiner elektrischer Leistungen können Thermogeneratoren für verschiedene Zwecke eingesetzt werden. Bereits im zweiten Weltkrieg waren sowjetische Partisanenverbände mit Thermogeneratoren ausgestattet, die mit Petroleum geheizt wurden und Strom für Kleinfunkstationen erzeugten. Auf den Wir-



kungsgrad konnte man dabei keine Rücksicht nehmen. Batterien oder Akkumulatoren waren schwer heranzuschaffen, doch die Bevölkerung opferte dem Kampf gegen die Faschisten gern ihr Petroleum. Heute dienen verbesserte Ausführungen der Generatoren dem friedlichen Aufbau. In den Neulandgebieten und auf abgelegenen Kolchosen erzeugen sie Strom für Fernsprecher und Radiogeräte. Das Versuchsmuster eines japanischen Transistorempfängers wird von einer Thermobatterie gespeist, die die Körperwärme in Elektroenergie verwandelt.

Bei vielen technischen Prozessen werden erhebliche Energiemengen als „Abfallwärme“ frei. In Kraftwerken fließen sie mit dem Kühlwasser oder in den Rauchgasen ab; in Fahrzeugen entweichen sie durch den Auspuff oder werden im Kühler „vernichtet“. Als Reibungswärme und bei chemischen Reaktionen können sie besonders unangenehm werden.

Alle Methoden, wenigstens einen Teil der Abfallwärme in Nutzenergie zurückzuverwandeln, sind für die Energiewirtschaft von größter Bedeutung. Vor Jahren erregte ein sowjetischer Thermogenerator Aufsehen, der die Abfallwärme einer Petroleumlampe in Strom für ein Rundfunkgerät verwandelte. Die Thermoelemente sind sternförmig um den Lampenzylinder verteilt; die kalten Enden werden durch die vorbeistreichende Zimmerluft gekühlt.

Um den Eigenstrombedarf kleiner Kraftwerke zu decken oder zu senken, entwickelten sowjetische Techniker eine größere Thermobatterie. Sie gibt eine Leistung von 100 W bis 200 W ab, wenn sie an Abgas- oder Kühlwasserleitungen montiert wird. Man denkt auch daran, die Auspuffgase von Fahrzeugen auf ähnliche Weise zur Elektrizitätsgewinnung heranzuziehen. Mögen diese Einsparungen im einzelnen auch bescheiden sein, so kann ihre Summe der Volkswirtschaft eines Landes jährlich doch viele Güterzüge voll wertvoller Brennstoffe sparen.

### Kühlschrank in der Aktentasche

Die Lötstelle zwischen zwei Metallen, deren Erhitzen einen Strom hervorrufen kann, hat noch eine andere Überraschung für uns bereit. Schicken wir von außen Gleichstrom durch die Lötstelle, statt ihr einen Strom zu entnehmen, so kühlt sie sich ab oder erwärmt sich, je nach der Stromrichtung.

Elektrischer Strom kann also nicht nur Wärme erzeugen, sondern auch kühlen. Das war ein erstaunliches Phänomen, aber anzufangen wußte man für mehr als hundert Jahre nichts damit. Es gab andere Kühlverfahren, die zwar umständlicher, dafür aber ungleich wirkungsvoller und wirtschaftlicher als die Kühlung mit einem „umgedrehten“ Thermoelement waren.

Wie bei der Elektrizitätsgewinnung aus Thermoelementen änderte sich auch beim Kühlen die Situation, als Halbleitermaterialien

eingeführt und Halbleiterkühlemente entwickelt wurden. Besonders besticht ihr einfacher Aufbau: Ein Stück p-Material und ein Stück n-Material, beide durch einen Kontaktschenkel aus Metall verbunden – das ist alles. Wie kompliziert ist dagegen das Aggregat eines Kühlschranks!

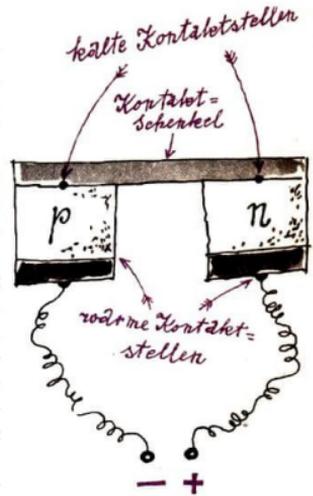
Als Ausgangsstoffe für Halbleiterkühlemente haben sich Wismut-Tellur- und Wismut-Antimon-Verbindungen bewährt. Sie brauchen längst nicht in der Reinheit vorzuliegen wie die Ausgangsmaterialien für Gleichrichter und Transistoren.

Gegenwärtig werden Temperaturerniedrigungen um 80 Grad mit Halbleiterkühlementen erreicht. Der Wirkungsgrad ist gut; mitunter wird mehr als die Hälfte der zugeführten elektrischen Leistung in „Kälteleistung“ verwandelt. Damit dieser Wirkungsgrad erreicht wird, ist es nötig, den Schenkeln einen verhältnismäßig großen Querschnitt zu geben. Andernfalls würde die Erwärmung durch den im Schenkel fließenden Strom dem Kühleffekt zu sehr entgegenwirken.

Ihre ersten Anwendungen fanden Halbleiterkühlemente in Laboratorien und Forschungsstätten. Dort brauchte man häufig kleine, einfach zu handhabende Kühleinrichtungen, etwa um eine Stoffprobe zu kühlen oder ein Präparat auf einer bestimmten Temperatur zu halten. Gerade diese örtliche Kühlung läßt sich mit Kühlmaschinen oder Kältemitteln schlecht, mit Halbleiterkühlementen dagegen sehr gut bewerkstelligen. Bald entwickelten man Kühlkammern von nur wenigen Kubikzentimeter Rauminhalt, sozusagen Miniaturkühlschränke, mit denen sich solche Aufgaben erfüllen ließen.

Auch „in eigener Sache“ bedient sich die Halbleitertechnik der Kühlemente. Bekanntlich sind Dioden und Transistoren gegen Temperaturänderungen empfindlich. Die Leistung eines Transistors sinkt rasch mit zunehmender Erwärmung. Mit Kühlblechen und Kühlfahnen kann man Halbleiterbauelemente nicht einmal bis auf die Umgebungstemperatur kühlen; vereint man sie aber mit einem Halbleiterkühlement, so ist ohne weiteres ein Kühlen bis weit unter die Umgebungstemperatur möglich. Da sich Halbleiterkühlemente sehr klein ausführen lassen, kann man sie mit einem Transistor zu einer konstruktiven Einheit zusammenfügen, die auch bei hoher Außentemperatur verwendbar ist. Sowjetischen Technikern gelang es, die Leistung von Transistoren auf diese Weise zu verdreifachen.

Die Verwendung von Halbleiterkühlementen für größere Kühleinrichtungen, beispielsweise für Haushaltskühlschränke oder Klimaanlage, stieß zunächst auf Schwierigkeiten. Ein Halbleiterkühlement braucht Spannungen von Bruchteilen eines Volt, aber Stromstärken von mehreren zehn Ampere und arbeitet nur mit Gleichstrom. Die Lichtleitungen führen jedoch Wechselstrom höherer Spannung. Ein Halbleiterkühlement läßt sich daher nicht einfach aus der Steckdose speisen, sondern es muß ein Transformator



mator mit einem leistungsfähigen Gleichrichter zwischengeschaltet werden. Das verteuert die Kühlanlage.

Einen Ausweg eröffnen Kühlbatterien, die aus mehreren hintereinandergeschalteten Kühlelementen bestehen. Bei ihnen darf die Betriebsspannung höher gewählt werden, weil sie sich auf die einzelnen Elemente verteilt. Gleichzeitig sinkt die Stromstärke. Ein Gleichrichter ist allerdings auch diesmal nötig.

„Kühlblöcke“, die nach diesem Prinzip zusammengesetzt sind, werden bereits serienmäßig gefertigt. Eine verbreitete Ausführung ist  $4\text{ cm} \cdot 4\text{ cm} \cdot 1\text{ cm}$  groß und enthält zehn hintereinandergeschaltete Kühlelemente. Man setzt sie in Japan bereits in Kühlschränke ein, die nur noch wenige Kilopond wiegen. Auch Kühlgefäße gibt es, die so klein und leicht sind, daß man sie ohne Mühe in einer großen Aktentasche verstauen kann. Vom Physikalischen Institut der Polnischen Akademie der Wissenschaften wurde ebenfalls ein sehr kleiner „Halbleiter-Kühlschrank“ entwickelt. Man führte außerdem Servierwagen vor, die unter Ausnutzung der thermoelektrischen Erscheinungen zu gleicher Zeit Getränke kühlen und Speisen warm halten.

Wie wichtig die Arbeiten auf diesem Gebiet sind, verstehen wir besser, wenn wir einen Blick in unseren Kühlschrank werfen. Nicht einmal die Hälfte seines Volumens ist „Nutzraum“. Alles andere bleibt dem Kühlaggregat reserviert. Dieses aber ist kompliziert, teuer und nicht so immun gegen Störungen, wie es wünschenswert wäre.

Es besteht alle Aussicht zu der Annahme, daß mit fortschreitender Entwicklung der Halbleitertechnik Kühlschränke und andere Kühlaggregate ihr Aussehen gründlich verändern werden. Das Aggregat wird aus drei oder vier Kühlblöcken von der Größe einer Schokoladentafel bestehen, ein Thermistor-Regler wird die Temperatur im Kühlfach überwachen. Störungen werden selten sein, und bei gleichem Nutzraum werden die Abmessungen so schrumpfen, daß auch in der kleinsten Küchennische noch Platz für einen Kühlschrank ist.

Kehren wir die Stromrichtung im Halbleiterkühlelement um, so heizt es. Welche Möglichkeiten zur wirkungsvollen Temperaturregelung oder Temperaturstabilisierung schließt dieser Effekt ein! Die gleichen Bauelemente können je nach Bedarf wärmen oder kühlen. Vielleicht stehen in Gegenden mit großen Temperaturunterschieden eines Tages „Öfen“ in den Wohnungen, die sich durch einen Knopfdruck von „Heizen“ auf „Kühlen“ umschalten lassen. Wissenschaftler haben bereits demonstriert, daß das möglich wäre. Aufgabe der Techniker wird es sein, die praktische Nutzenanwendung aus diesen Versuchen zu ziehen.



*Halbleiter-  
Kühl-, Schrank!*

## Forschungsauftrag Weltraum

### Die Sterne rücken näher

Man nennt mitunter den „Forschungsauftrag Weltraum“ das bisher größte wissenschaftlich-technische Unternehmen der Menschheit. Das ist nicht übertrieben, denn noch nie zuvor konnte der Mensch auf so überzeugende Weise zeigen, welcher Leistungen er fähig ist, wenn er die Naturgesetze erkennt und ausnutzt. Welch ein Triumph der Wissenschaft, der Technik, der Menschheit ist es, in den Weltraum vorzustoßen, nicht, um das „irdische Jammerthal“ zu verlassen, sondern um zu beweisen, daß es für den menschlichen Erkenntnisdrang keine Grenzen gibt!

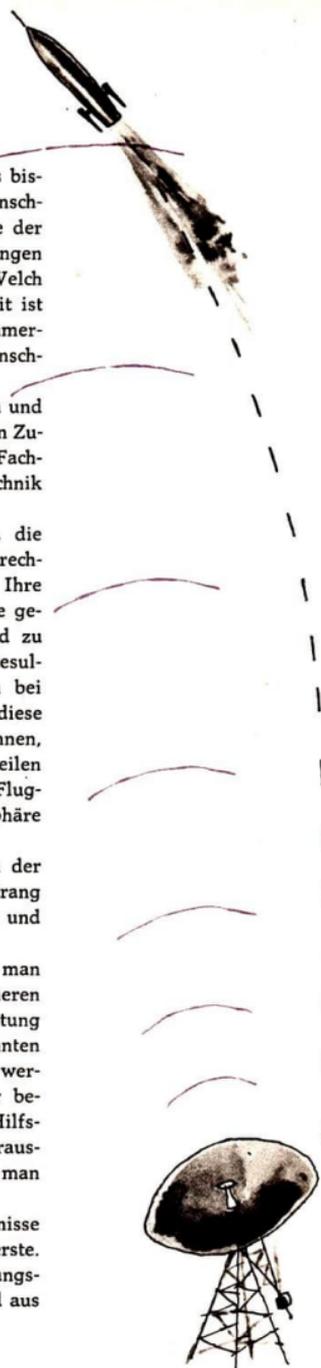
Selten auch ist so deutlich geworden, daß alle Wissenschaften und alle technischen Disziplinen in einem unlöslichen gegenseitigen Zusammenhang stehen und daß nur die Zusammenarbeit von Fachleuten verschiedener Spezialgebiete Wissenschaft und Technik vorantreiben kann.

Mathematiker und Physiker zeigten, daß es möglich ist, die Schwerkraft unseres Heimatplaneten zu überwinden; sie errechneten die Kräfte und Energien, die dazu gebraucht werden. Ihre Zahlen wurden Grundlage für die Arbeit der Chemiker, die geeignete Treibstoffe für kosmische Raketen zu schaffen und zu erproben hatten. Die Technologen wieder nahmen sich die Resultate der Chemiker vor; sie fanden Werkstoffe, die auch bei höchsten Verbrennungstemperaturen nicht versagen. Als diese Werkstoffe die Gestalt von Flugkörpern anzunehmen begannen, ging man die Aerodynamiker um Rat an. Sie konnten beurteilen und festlegen, welche Form und welche Geschwindigkeit ein Flugkörper haben muß, damit er ungefährdet die Erdatmosphäre durchstoßen kann.

Vor allem aber benötigte und nutzte man die Fähigkeiten der Elektro- und Hochfrequenztechniker; denn sie schafften den Strang aus unsichtbaren Fäden, die Raumschiff und Erde verbinden und niemals abreißen dürfen.

Der erfolgreiche Start einer Rakete wäre unmöglich, wenn man nicht den Anfang ihrer Flugbahn durch Radargeräte kontrollieren könnte. Ihr Flug müßte scheitern, gelänge es nicht, seine Richtung durch Funksignale zu korrigieren. Nicht einmal die ausgebrannten Raketenstufen könnten pünktlich vom Flugkörper getrennt werden, wenn nicht elektronische Geräte den Zeitpunkt dafür bestimmten. Nehmen wir aber an, der Flug sei ohne dieses Hilfsmittel ermöglicht worden, das Raumschiff habe seine vorausbestimmte Bahn erreicht. Welchen Sinn hätte der Flug, wenn man nicht erführe, was unterwegs geschieht?

Nur *der Weg* in den Weltraum nützt uns, der unsere Kenntnisse bereichert. Die sowjetische Wissenschaft beschritt ihn als erste. Sputnik I, gestartet am 4. Oktober 1957, übermittelte Beobachtungsdaten, und seine Nachfolger beobachteten mehr, genauer und aus



größeren Entfernungen. Das Verhalten der Ionosphäre, den Strahlungsgürtel um die Erde, das ständige Bombardement durch die kosmische Strahlung, das Magnetfeld der Erde und anderer Himmelskörper, Teilchen im interplanetaren Raum – das alles müssen wir heute beobachten und messen, damit wir morgen weiter in den Raum vorstoßen können.

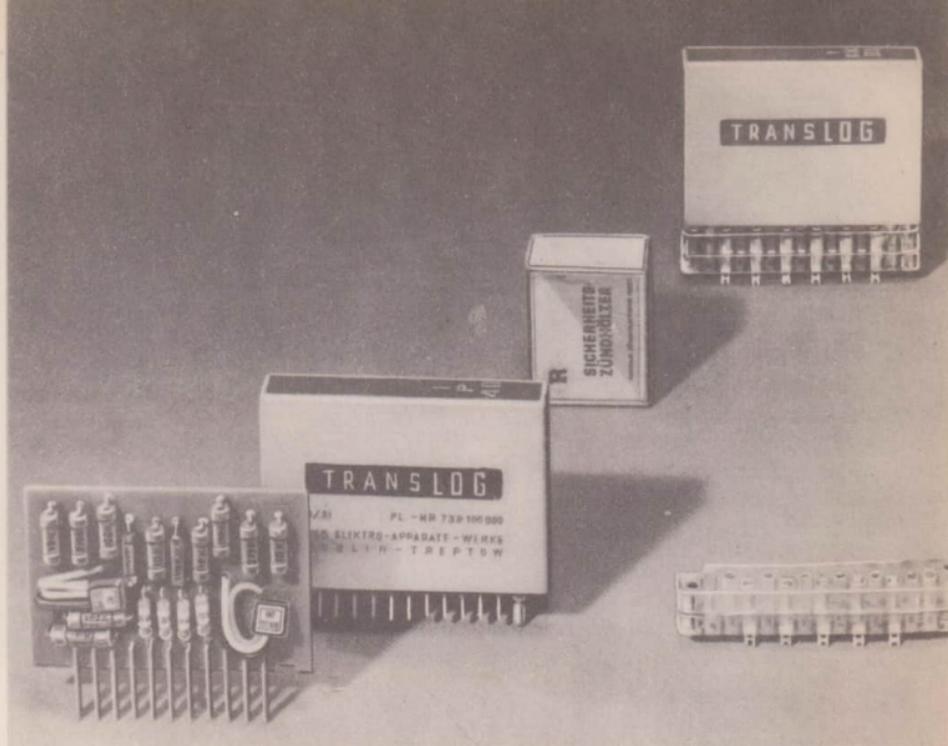
So finden wir an Bord jedes Raumfahrzeugs, gleich, ob bemannt oder unbemannt, eine Fülle von elektronischen Apparaturen, die unsere Sinne bis „hinter den Mond“ und in Zukunft um ein Vielfaches weiter „verlängern“ werden. Zahl und Umfang der elektronischen Einrichtungen werden von Raumflug zu Raumflug größer. Auch der Mensch als Raumpilot macht sie nicht überflüssig, im Gegenteil: In bemannten Raumkörpern müssen zusätzliche Möglichkeiten für die persönliche Verständigung mit den Erdstationen und zur Übermittlung medizinischer Meßwerte geschaffen werden.

Je umfangreicher die elektronische Ausrüstung an Bord der Raumfahrzeuge wird, desto härter sind die Anforderungen, die sie erfüllen muß. Kleine, leichte, betriebssichere, robuste Geräte sind auf der Erde wünschenswert und oft auch notwendig. Für die Raumfahrt sind sie entscheidend. Nirgends zählt jedes Gramm soviel wie in einem kosmischen Flugkörper.

Kleine, leichte, betriebssichere, robuste Geräte – nur die Halbleitertechnik kann sie zur Verfügung stellen. Daraus erklärt es sich, daß bei der Ausstattung aller kosmischen Flugkörper Halbleiter eine entscheidende Rolle spielen. In Sendern und Empfängern sichern sie die Verbindung zu den Bodenstationen. In Steuer- und Regelgeräten führen sie die Kommandos von der Erde oder die Befehle des Kosmonauten aus. Sie messen die kosmische Strahlung und die Strahlung der Sonne, registrieren aufprallende Partikel und regeln die Temperatur an Bord. Sie tun es, obwohl noch längst nicht alle technischen Probleme ihres Einsatzes gelöst sind. Noch wissen wir nicht genug darüber, wie weit die kosmische Strahlung die Tätigkeit von Dioden und Transistoren beeinflusst. Noch ist die Temperaturempfindlichkeit der Halbleiter ein ernsthaftes Problem, das nur mit verhältnismäßig großem Aufwand zu meistern ist.

Doch auf die Dauer werden das keine Hemmnisse sein. Es gibt bereits Transistoren, die bei Temperaturen über dem Schmelzpunkt von Blei voll funktionsfähig bleiben; ihr Grundmaterial ist Siliziumkarbid. Es gibt ebenso Transistoren, die bei Temperaturen von  $-271^{\circ}\text{C}$  nicht versagen. Manche Halbleiterbauelemente sind so widerstandsfähig, daß man sie in ein Geschöß einbauen könnte, ohne daß sie bei dessen Aufschlag zerstört würden. Wenn wir bedenken, wie jung die Halbleitertechnik ist, haben wir allen Grund, über diese Erfolge stolz zu sein.





Aufbau eines Translog-Bausteins

Translog-Bausteine, zu einem elektronischen Gerät vereinigt





Großrechenanlage

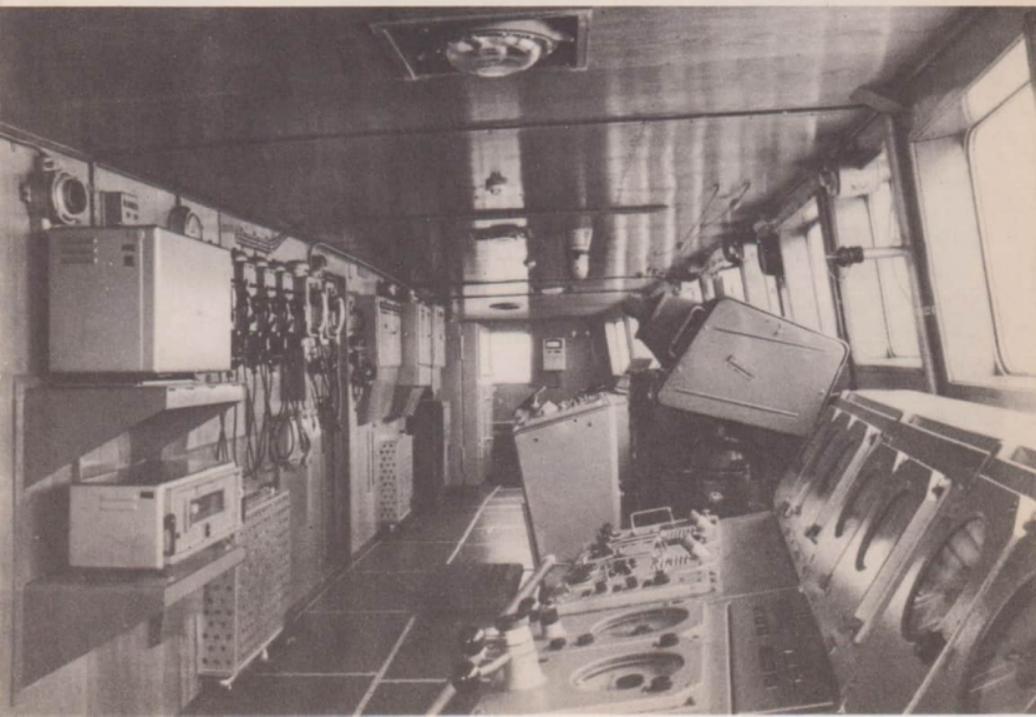
Strahlenindikator „Aktifon D“

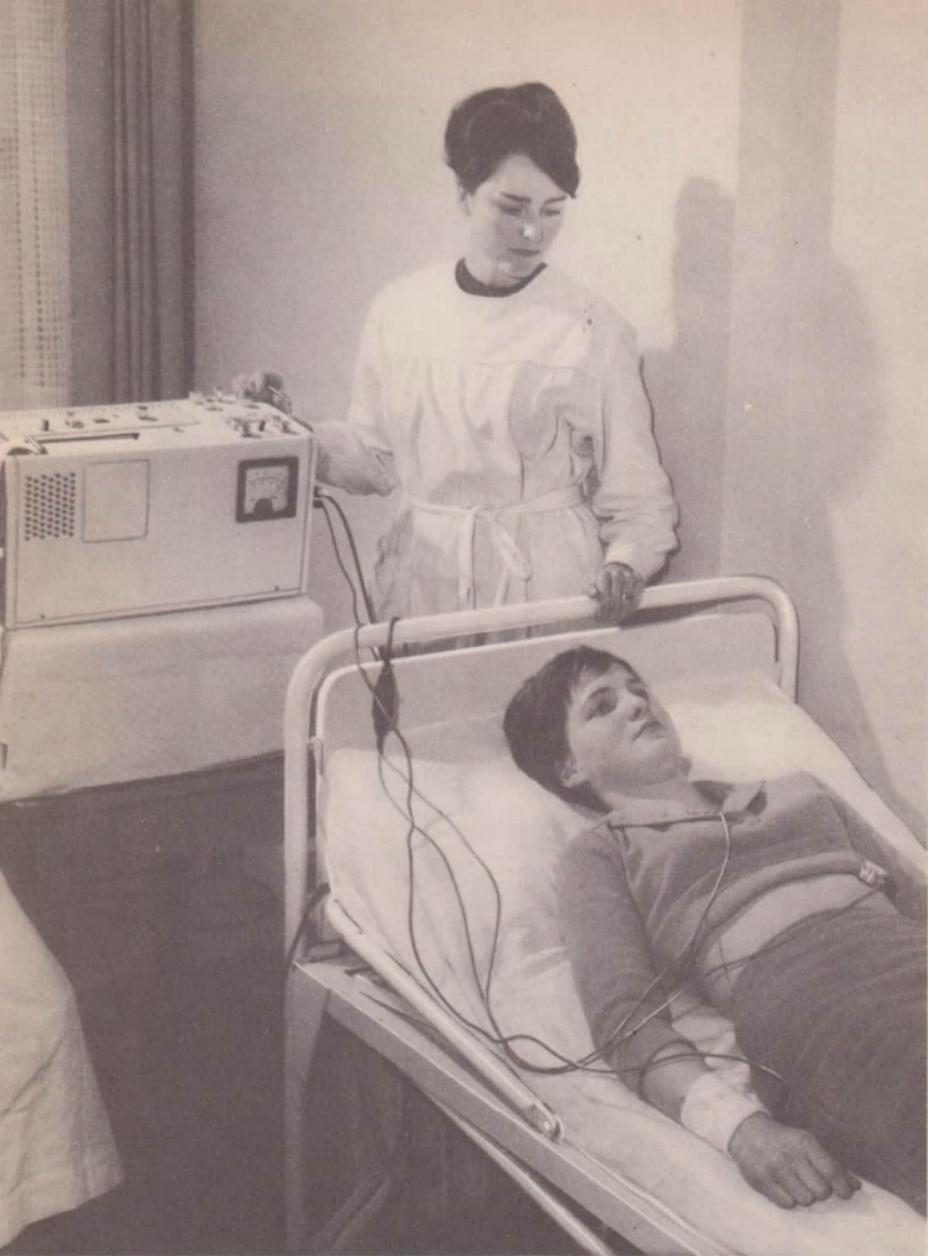




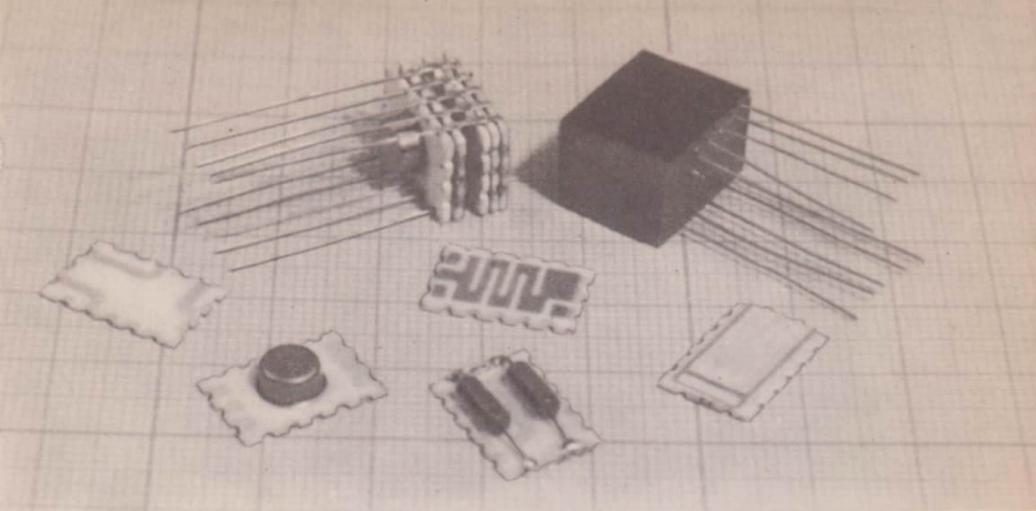
Transistor-Hörhilfe H 30

Brücke eines Fang- und Verarbeitungsschiffes für Tropenfischerei



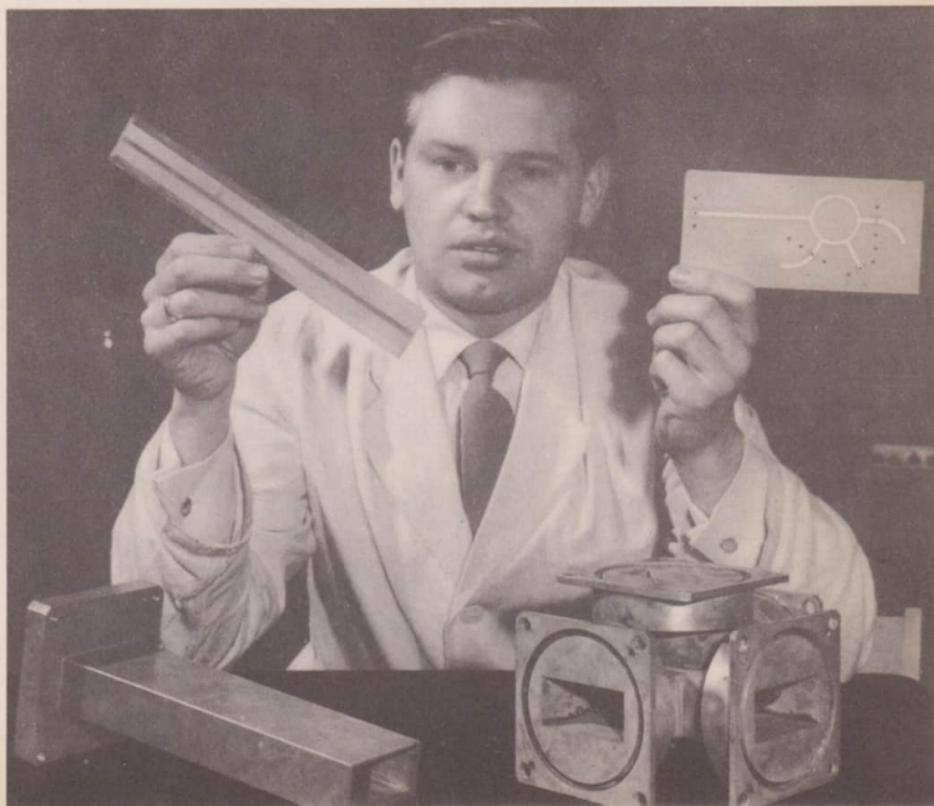


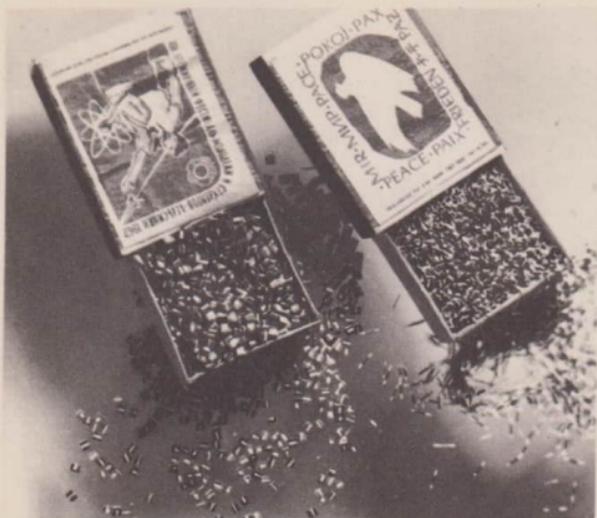
Elektronik hilft heilen



Mikromodul-Bausteine (unvergossen und vergossen); darunter Einzelblät-  
chen mit verschiedenen Bauelementen

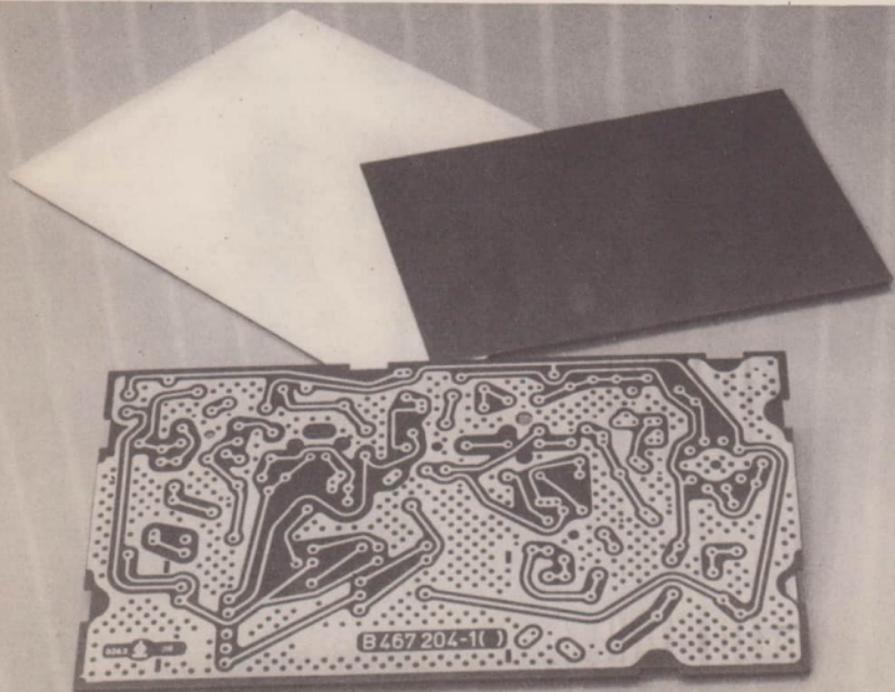
#### Gedruckte Schaltung

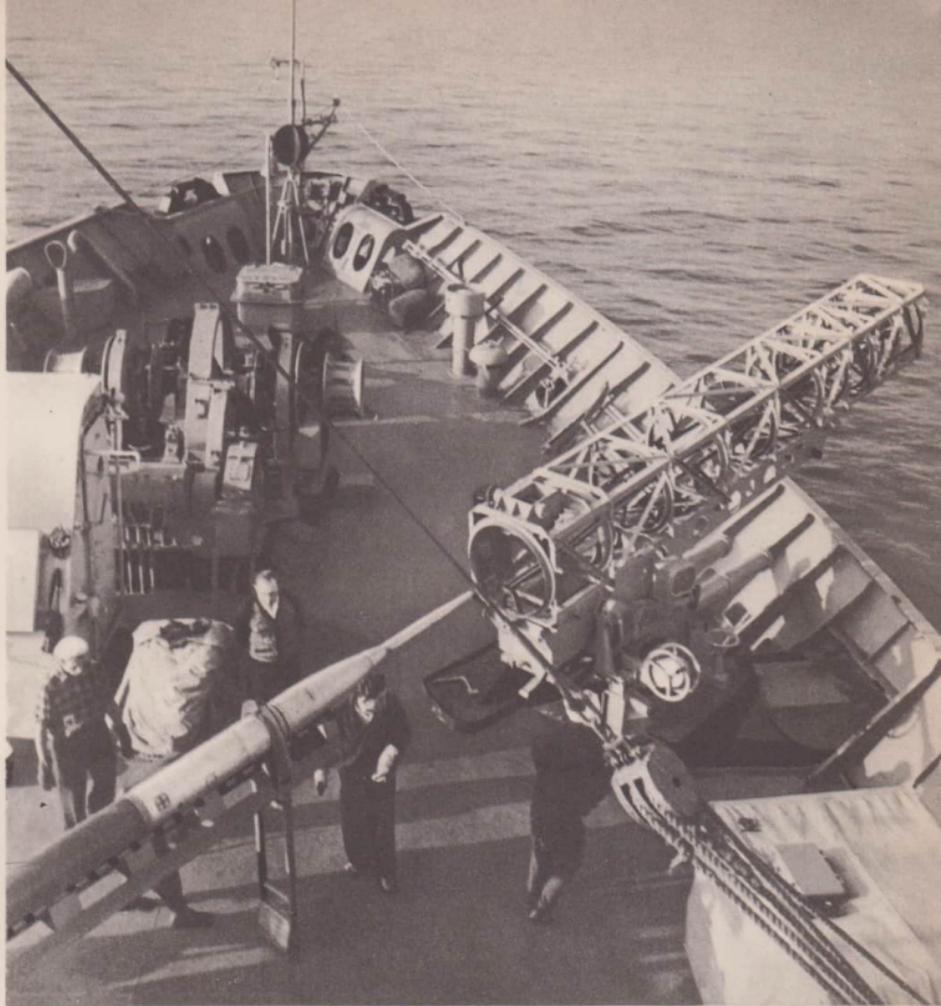




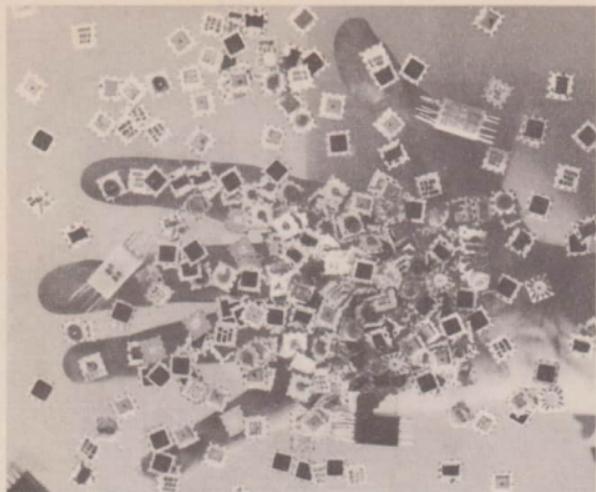
Mikrotransistoren und Mikrowiderstände, deren Menge für den Bau einer elektronischen Rechenmaschine ausreichen würde

Material und Leiterplatte für eine gedruckte Schaltung



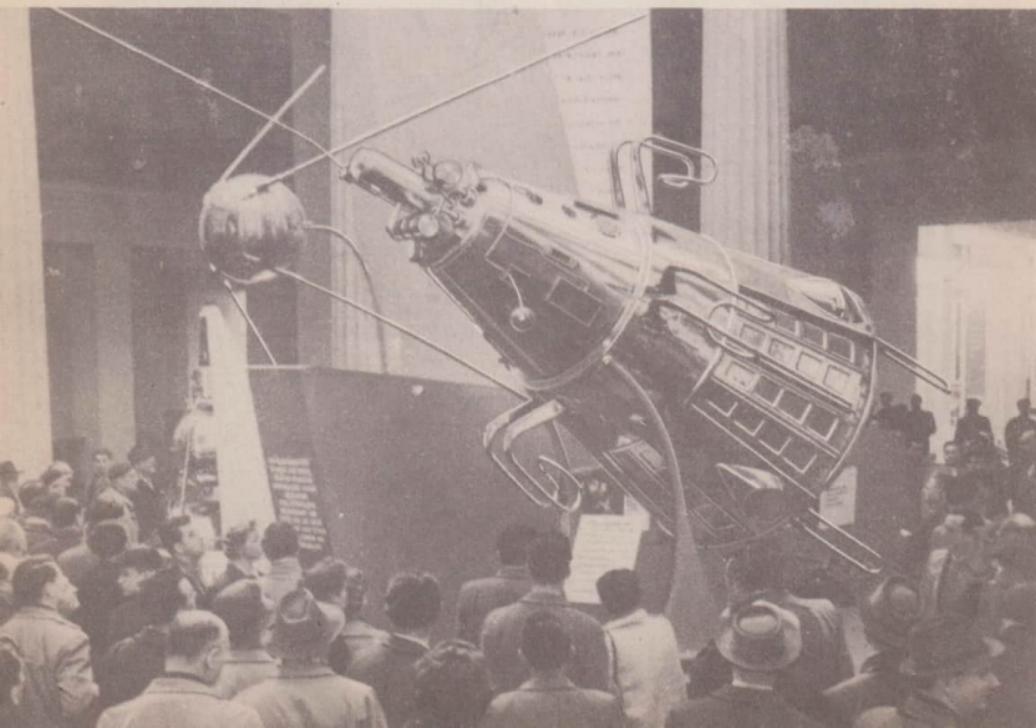


An Bord eines sowjetischen Expeditionsschiffes. Das Abschufgestell wird mit einer meteorologischen Rakete geladen. Auch zur Erforschung des Meeres, der Wettererscheinungen und noch wenig bekannter Gebiete sind Halbleiter heute unentbehrlich



Helle Blättchen, die winzige Kondensatoren, Widerstände und Transistoren tragen, und drei „Würfel“ – sogenannte Mikromoduln –, die als fertige Baugruppen für neue elektronische Geräte verwendet werden

Halbleiter helfen bei der Eroberung des Weltraumes



## Noch einmal: Sonnenbatterien

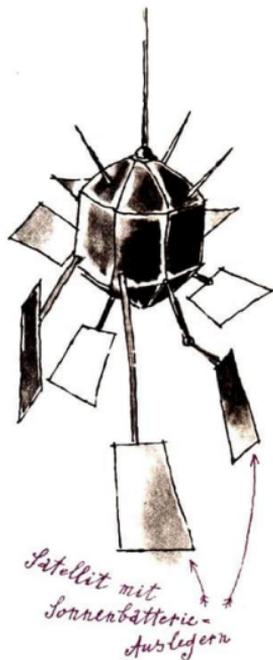
Alle elektronischen Geräte brauchen Strom; die Energieversorgung kosmischer Flugkörper ist daher eine der wichtigsten Aufgaben der Raumfahrttechnik. Sollen die Instrumente und Nachrichten-geräte eines Raumfahrzeugs längere Zeit arbeiten, so scheidet eine Energieversorgung aus „klassischen“ Quellen aus. Zwar gibt es kleinste Batterien und Akkumulatoren, aber sie wären nicht in der Lage, ein Raumfahrzeug für Wochen, Monate oder gar Jahre mit Strom zu versorgen.

Auf Flügen innerhalb des Planetensystems werden daher – mindestens für die nächste Zukunft – Sonnenbatterien eine hervorragende Rolle spielen. Für sie herrschen im Weltraum günstige Bedingungen: Befindet sich das Raumfahrzeug außerhalb des Erdschattens, so können sie ununterbrochen und ungestört von Wolken oder anderen meteorologischen Erscheinungen arbeiten. Die Schwächung der Sonnenstrahlung durch die Erdatmosphäre entfällt, und durch entsprechende Konstruktion der Sonnenzellen kann man die über der Atmosphäre sehr energiereiche Ultraviolettstrahlung zur Energiegewinnung heranziehen.

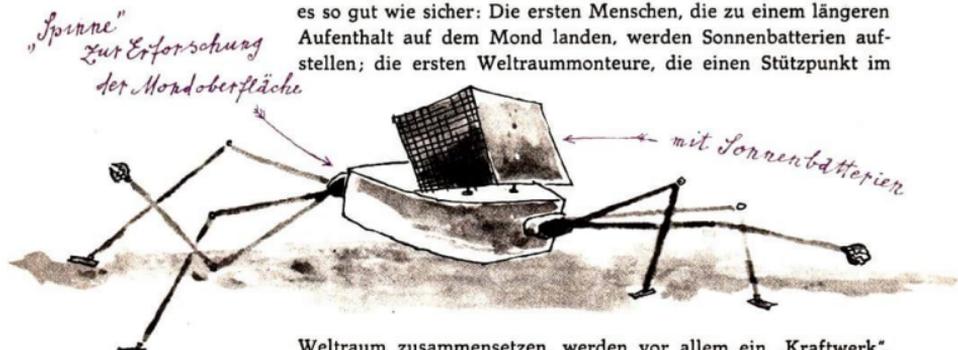
Deshalb wurden bisher fast alle Satelliten und Raumfahrzeuge mit Sonnenbatterien ausgerüstet. Die Zellen werden entweder auf der Außenhaut des Flugkörpers befestigt (wie bei den Sputniks), oder sie sitzen auf paddelähnlichen Auslegern, die vom Satellitenkörper abstehen. Wie bei „irdischen“ Sonnenbatterien werden zahlreiche Siliziumfotoelemente zusammengeschaltet (beim Satelliten TELSTAR z. B. 3600). Sie sind so angeordnet, daß wenigstens ein Teil von ihnen bei jeder Stellung des Flugkörpers der Sonne zugewandt ist. Andere Projekte sehen vor, den Flugkörper oder die „Paddel“ durch eine fotoelektrische Steuervorrichtung ständig so zu drehen, daß die Zellen voll vom Sonnenlicht getroffen werden.

Die Sender der meisten kosmischen Flugkörper arbeiten nur zeitweise, sollen dann aber eine möglichst große Leistung ausstrahlen, um auch über große Entfernungen Nachrichten und Beobachtungsdaten übermitteln zu können. Auch in Satelliten wird daher Pufferbetrieb angewandt. Allerdings brauchen die Pufferbatterien nur kurzzeitig große Leistungen herzugeben, denn längere sonnenlose Perioden gibt es nicht für ein Raumschiff, das die Erde umkreist oder unser Planetensystem durchmißt.

Ernst zu nehmende Pläne für Weltraumstationen und für Expeditionen zum Monde oder zu den Planeten existieren seit den Veröffentlichungen des russischen Forschers Konstantin Eduardowitsch Ziolkowski (1857 bis 1935). Vor allem die Leistungen der sowjetischen Wissenschaft haben sie in greifbare Nähe gerückt. Für die elektronische Ausrüstung von Weltraumstationen oder von Expeditionen nach fremden Himmelskörpern gelten die gleichen Bedingungen wie für die Ausstattung eines Raumschiffs. Denn jeder Sender, jeder Empfänger, jedes Instrument muß von der Erde auf den anderen Himmelskörper transportiert werden.



Auch über die Energieversorgung bei diesen Vorstößen weiß man inzwischen Genaueres zu sagen als vor ein, zwei Dutzend Jahren. Damals begnügte man sich mit der Feststellung, die notwendige Elektrizität werde man „aus Sonnenstrahlen“ gewinnen. Heute ist es so gut wie sicher: Die ersten Menschen, die zu einem längeren Aufenthalt auf dem Mond landen, werden Sonnenbatterien aufstellen; die ersten Weltraummonture, die einen Stützpunkt im



Weltraum zusammensetzen, werden vor allem ein „Kraftwerk“, große, leistungsfähige Sonnenbatterien, in den Weltraum „hängen“, um den nötigen Strom für ihre Arbeit und zum Leben zu erhalten. Ob es allerdings immer Siliziumsonnenbatterien sein werden, wagen wir nicht zu entscheiden. Die Halbleitertechnik dürfte auch auf diesem Gebiet noch manche Überraschung bereithalten.

### Die Raumfahrt hilft der Erde

Die Weltraumforschung hat nicht allein die Aufgabe, uns Kenntnisse von immer entfernteren Teilen des Kosmos zu vermitteln. Auch was Raumschiffe oder künstliche Satelliten in unmittelbarer Nachbarschaft unseres Planeten „erfahren“ und wie sie technisch ausgerüstet sind, ist sehr wichtig.

Werfen wir zunächst einen Blick auf eine Randerscheinung, die in Berichten über Weltraumerfolge verständlicherweise meistens etwas stiefmütterlich behandelt wird.

Lebewesen, die in den vergangenen Jahren eine Reise in den Weltraum antraten, halten neben anderen auch einen „medizinischen Rekord“. Noch nie zuvor hat man wichtige Körperfunktionen auf so große Entfernungen gemessen. Herzschlag, Atmung, Körpertemperatur der Raumfahrer wurden ständig überwacht. So erstaunlich es auch klingt: Die Mediziner in den Bodenstationen waren über das körperliche Befinden der Astronauten ebenso informiert wie bei einer Untersuchung im Sprechzimmer auf der Erde.

Die leuchtenden Linien, die, über Bildschirme huschend, die Körperfunktionen des Astronauten registrieren, sind nicht nur Erfolge der Weltraum- und der Nachrichtentechnik, sondern auch der medizinischen Elektronik; denn die Bedingungen, die wir an elektronisch-medizinische Geräte stellten, wurden für Zwecke der Raum-

fahrt bereits zum größten Teil erfüllt. Die Kosmonauten tragen am Körper die leichten, nicht hindernden Meßgeräte und Meßfühler, die wir uns für „irdische“ Patienten wünschen. Es sind zwar noch Spezialanfertigungen, die aus vielerlei Gründen für die Praxis des Klinikbetriebes nicht in Frage kommen; aber die Erfahrungen, die man an diesen Geräten sammelt, werden auch dem „Patienten auf der Erde“ zugute kommen.

Andere Bordgeräte, seien es Miniaturfunkanlagen, Druck-, Temperatur- und Feuchtigkeitsregler oder Präzisionsuhren, werden sich ebenfalls fruchtbar auf viele Zweige der Technik auswirken. Aus der Übertragung vieler Meßwerte kann man lernen, wie sich auch komplizierte Probleme der Fernsteuer- und Fernwirktechnik lösen lassen.

Die Hilfe, die uns die Raumfahrt geben kann, reicht noch viel weiter. Mehrere unbemannte, mit Sendern ausgerüstete Satelliten auf bekannter Bahn könnten zur Grundlage eines sehr genauen Navigationsverfahrens für Luft- und Seefahrt werden. Sie könnten außerdem selbsttätig Notrufe auffangen und weiterleiten. Diese Satelliten müßten jahrelang kreisen, störungsfrei arbeiten und keinen Energiemangel leiden, Forderungen, die sich nur mit Hilfe der Halbleitertechnik erfüllen lassen.

In den sowjetischen Raumschiffen arbeiten Fernsehkameras. Wie gut sie ihre Aufgaben erfüllten, wurde aller Welt durch die ersten Bilder der Mondrückseite und die Direktübertragungen schon aus den Raumschiffen „Wostok III“ und „Wostok IV“ demonstriert. Solche Fernsehübertragungen dürften schon in naher Zukunft ein selbstverständliches Hilfsmittel der Forschung sein. Sie werden es nicht nur möglich machen, andere Himmelskörper durch unbemannte Raumsonden aus der Nähe betrachten zu lassen; auch Fernsehungen in erdnahen Satelliten können sehr wertvoll sein. Sie werden aus dem Weltraum die Erdoberfläche beziehungsweise die darüberliegende Wolkendecke beobachten und die Aufnahmen über Funk sofort oder auf ein drahtloses Kommando zu den Bodenstationen übermitteln. Die Wetterkunde hätte großen Nutzen von diesen Bildern. Luftmassengrenzen, Gewitterfronten und entstehende Wirbelstürme ließen sich früher als mit anderen Methoden erkennen.

Angeblich dienen die amerikanischen „Tiros“-Satelliten ausschließlich diesem Zweck; Forschungsstellen und Sprecher der USA versichern es immer wieder. Aber auch die Spionageflugzeuge „Lockheed U 2“ wurden, solange es möglich war, als harmlose Wetterflugzeuge deklariert. Außerdem war es ein offenes Geheimnis, daß USA-Satelliten, z. B. der Typ „Samos“, dessen Ausrüstung ängstlich geheimgehalten wurde, da einspringen sollten, wo die „U 2“ dank der Wachsamkeit und Leistungsfähigkeit der sowjetischen Luftabwehr versagt hatte. Jüngste Meldungen jedoch lassen uns hoffen, daß es auf dem Gebiet der „Wettersatelliten“ schon bald zu einer internationalen Zusammenarbeit kommen wird.



## Fernamt im Weltraum

Besonders weitreichende Auswirkungen dürften Erdsatelliten auf das Nachrichtenwesen haben. In sechzig Jahren Funktechnik hat der interkontinentale drahtlose Nachrichtenverkehr ständig zugenommen; das Netz der Funklinien wurde immer dichter. Was zunächst niemand auch nur geahnt hatte, ist längst Tatsache: Für den zunehmenden drahtlosen Verkehr fehlen Frequenzen, auf denen Sender und Empfänger arbeiten können.

Nur auf Ultrakurzwellen und besonders auf Dezimeter- und Zentimeterwellen gibt es noch Platz. Leider sind Wellen dieser Bereiche aber nicht ohne weiteres für Fernverbindungen geeignet. Die Strahlung eines Ultrakurzwellensenders oder einer Dezimeterstation folgt weder der Erdkrümmung noch wird sie, wie Kurzwellen, in hohen Atmosphärenschichten zur Erde zurückgespiegelt. Sie verläßt den Sender geradlinig und geht im Weltraum verloren.

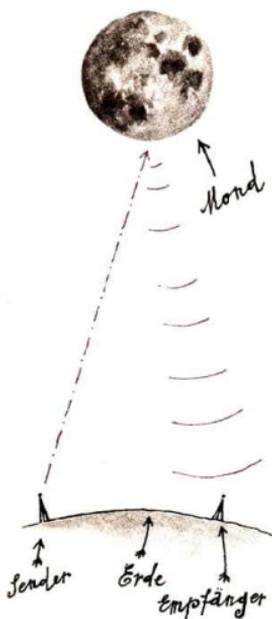
Um die Wellen zur Rückkehr zu zwingen, müßte man hoch über der Erde Spiegel anbringen, die die Strahlung zum Empfangsort reflektieren. Ein solcher Spiegel könnte gleichzeitig 600 oder 1000 Ferngespräche oder mehrere Fernsehprogramme von Kontinent zu Kontinent übertragen, und zwar ohne atmosphärische Störungen und ohne Belästigungen durch Sender auf benachbarten Frequenzen. Ein großer Teil des internationalen Nachrichtenverkehrs könnte über diese Spiegel laufen.

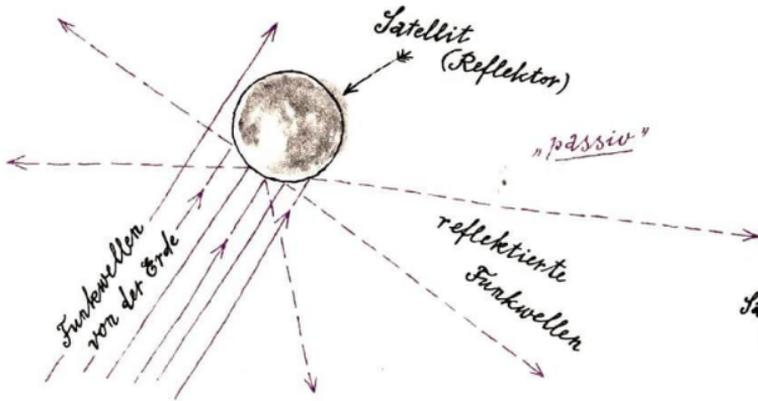
Der Raketentechnik verdanken wir die Möglichkeit, solche Spiegel anzubringen. Sie heißen Fernmeldesatelliten und verraten damit schon einiges über ihre Funktion; es sind künstliche Erdtrabanten, die vor allem dafür bestimmt sind, das Nachrichtennetz der Erde zu unterstützen.

„Passive“ Fernmeldesatelliten sind wirklich nichts anderes als Spiegel, die von der Erde kommende Signale zur Erdoberfläche zurücklenken. Der erste derartige Satellit wurde übrigens nicht von einer Rakete hochgetragen und kostete keinen Pfennig. Es war der Mond, der irdische Funkzeichen reflektierte. Später folgte ihm der Satellit „ECHO I“, ein gasgefüllter Ballon mit metallisierter Oberfläche und 30 m Durchmesser. Die Experimente mit dem Mond und mit „ECHO I“ erwiesen die Möglichkeit einer Nachrichtenverbindung über passive Satelliten, zeigten aber auch, daß sich beim heutigen Stand der Technik vor allem „aktive“ Satelliten behaupten werden.

Aktive Satelliten fangen die Funkzeichen der Bodenstation mit einem Spezialemitter auf, verstärken sie, übersetzen sie auf eine andere Frequenz und strahlen sie über einen Sender und eine Antenne zur Erde zurück. Es ist das gleiche Verfahren wie bei Fernsehsumsetzern, die Gebirgstäler mit dem Programm des nächsten Fernsehsenders versorgen.

In der technischen Ausführung jedoch kann sich der aktive Fernmeldesatellit kaum mit dem Fernsehsumsetzer vergleichen. Zehn oder mehr Jahre soll der Satellit ohne Störung arbeiten und „oben



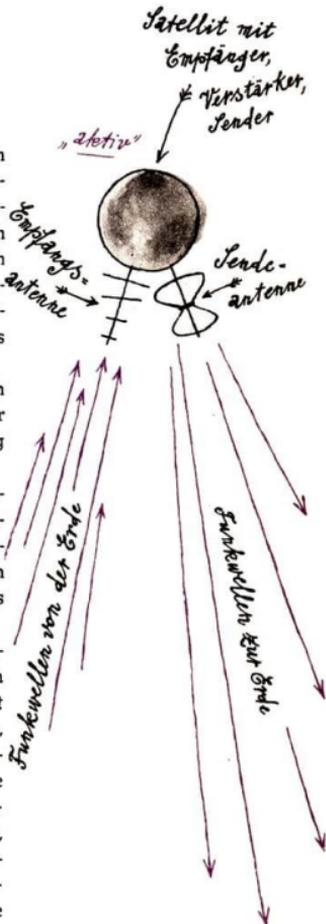


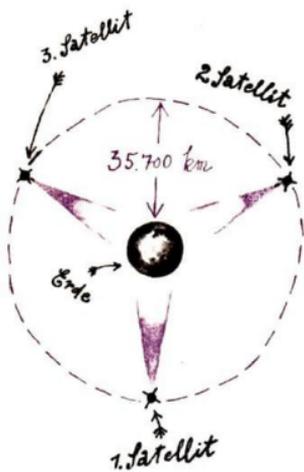
bleiben". Was diese Forderung bedeutet, wird klar, wenn man bedenkt, daß eine derartige Anlage aus Tausenden von Bauelementen besteht, daß der Ausfall eines einzigen Bauelementes sie lahmlegen kann und daß Reparaturen vorläufig noch ausgeschlossen sind. Die Stromversorgung muß für den gleichen Zeitraum durch Sonnenzellen und eine Pufferbatterie gewährleistet sein. Die Antennen der Fernmeldesatelliten sind selbsttätig in einer für Empfang und Sendung möglichst günstigen Richtung zu halten; das macht weitere komplizierte Steuergeräte erforderlich.

Dieser ganze technische Apparat aber soll so klein wie möglich sein und möglichst wenig wiegen. Damit ist entschieden, daß nur eine konsequente Verwendung von Halbleitern die Verwirklichung eines derartigen Projekts gestattet.

Zahlreiche Pläne für Fernmeldesatelliten wurden bisher ausgearbeitet. Am 10. Juli 1962 wurde TELSTAR, der erste aktive Fernmeldesatellit, auf eine Umlaufbahn gebracht. Zu seiner Bordausrüstung gehören allein 1064 Transistoren und 1464 Dioden. Zum erstenmal konnten mit seiner Hilfe Fernsehsendungen drahtlos über den Atlantik geschickt werden.

Wie die künftigen Nachrichtennetze mit Fernmeldesatelliten aussehen werden, ist noch ungewiß. Satelliten in Flughöhen von wenigen Hunderten oder Tausenden Kilometern kämen zwar mit verhältnismäßig geringer Sendeenergie von einigen Watt aus, könnten aber nur einen verhältnismäßig kleinen Teil der Erdoberfläche „übersehen“. Wegen ihrer kurzen Umlaufzeit wäre eine Nachrichtenverbindung zwischen zwei weit voneinander entfernten Punkten immer nur für kurze Zeit möglich, so lange nämlich, wie der Satellit – theoretisch – von beiden Endpunkten der Übertragungsstrecke gesehen werden kann. So dauerten die Übertragungen über TELSTAR immer nur etwa 20 Minuten. Für eine





ständige Nachrichtenverbindung über Satelliten brauchte man eine Art „Perlenkette“, so daß keine Unterbrechung durch das „Untergehen“ eines Satelliten einträte. Amerikanische und britische Pläne nennen dreißig bis fünfzig Satelliten.

Je höher sich ein Satellit über der Erde befindet, desto größer ist das von ihm „erfaßte“ Gebiet. Gleichzeitig nimmt seine Umlaufzeit zu. Besonders wichtig ist dabei die Entfernung von 35700 km. Ein Satellit, der in dieser Höhe über dem Äquator und parallel dazu fliegt, hat eine Umlaufzeit von 24 Stunden. Er wird zum „Synchronsatelliten“ und steht, von der Erde aus gesehen, immer über dem gleichen Punkt. Mit drei Synchronsatelliten könnte man ein weltumspannendes Nachrichtennetz aufbauen. Es ist kein Zufall, daß man sich besonders in der Sowjetunion für Synchronsatelliten interessiert. Darin spiegelt sich nicht nur die führende Stellung der sowjetischen Raketentechnik wider, sondern auch der Grundsatz, technische Erfolge mit dem geringsten Aufwand zu erringen, aber allen zugute kommen zu lassen.

### Fernsender Erdsatellit

Fernmeldesatelliten werden vielleicht schon bald dazu führen, daß ein Ferngespräch von Wladiwostok oder Santiago de Cuba ebenso klar verständlich ist und so schnell „kommt“ wie ein Ortsgespräch von heute. Die Verwirklichung eines anderen Projekts wird sich sogar auf jede Familie auswirken, die einen Fernsehapparat besitzt. Wir meinen das „Weltfernsehen“.

Es ist allgemein bekannt, daß eine direkte Fernsehübertragung immer nur über begrenzte Entfernungen möglich ist. Ultrakurzwellen, die beim Fernsehen verwendet werden müssen, reichen nur bis zum Horizont des Senders und ein Stückchen darüber hinaus. Wer weiter entfernt von einer Fernsehstation wohnt, weiß das nur zu gut. Er muß nicht nur eine komplizierte Antenne erwerben, sondern sie auch möglichst hoch anbringen und genau auf den Sender ausrichten, wenn er ein einwandfreies Bild sehen möchte.

Das würde sich schlagartig ändern, wenn ein Fernsender hoch über der Erde, an der Tür zum Weltraum, arbeitete. Stünde er in der Flughöhe des sowjetischen Raumschiffes „Wostok II“ (340 km), so wären seine Sendungen von Murmansk bis Kairo, von Portugal bis zum Ural zu empfangen. Befände er sich in Höhen von vielen Tausenden Kilometern, so könnte er fast eine Erdhalbkugel überstrahlen.

Es wird in Zukunft daher nicht nur Fernmelde-, sondern auch Fernsehsatelliten geben. Wahrscheinlich kombiniert man beide, so daß ein Satellit Träger einer ganzen Nachrichtenzentrale würde.

Zur Ausstattung eines Fernsehsatelliten gehört vor allem ein empfindlicher Empfänger. Er nimmt die Programme auf, die in Studios auf der Erde gestaltet und über einen Zentimeterwellen-



sender emporgeschickt werden. Ein Frequenzumsetzer überträgt das empfangene Programm in den Frequenzbereich des Ferns Rundfunks. Vom Sender des Satelliten wird es zur Erde zurückgestrahlt.

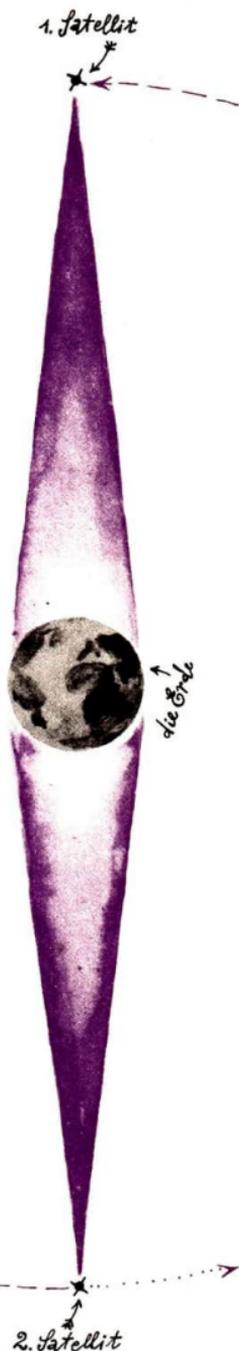
Die Forderungen an die Sendeleistung werden bei Fernsehsatelliten größer als bei Fernmeldesatelliten sein; denn man muß mit normalen Fernsehempfängern und einfachen Antennen die Programme aus dem Weltraum aufnehmen können. Daß ein Fernsehsatellit auch über eine leistungsfähige Sonnen- und Pufferbatterie verfügen muß, ist selbstverständlich. Drei, unter Umständen zwei Fernsehsatelliten in großer Höhe würden genügen, um überall auf der Welt ein Fernsehprogramm zu empfangen.

Die Fernsehversorgung eines großen Landes erfordert zahlreiche Fernsehsender und teure Spezialkabel oder Richtfunkstrecken, die diesen Sendern das Programm zuführen. Dieser technische Apparat würde überflüssig, wenn man die Fernsehversorgung des Landes einem Satelliten überließe. Besonders zweckmäßig dafür wäre ein Synchronsatellit, der seinen Standort gegenüber der Erdoberfläche nicht verändert.

Um ein Land mit einem Fernsehprogramm zu versorgen, werden mehrere Fernsehkanäle benötigt. Ihre Zahl ist jedoch begrenzt, und es ist nicht einfach, diese Kanäle so aufzuteilen, daß die Sender sich nicht gegenseitig stören. Bei Verwirklichung des Satellitenprojekts brauchte man für ein Land je noch einen Fernsehkanal. Man könnte die Kanäle verbreitern und die Zeilenzahl erhöhen. Die Bilder würden schärfer. Die „freien“ Kanäle jedoch könnte man mit weiteren Fernsehprogrammen belegen. Auch ein Teil der Schwierigkeiten, die zur Zeit noch der Einführung des Farbfernsehens entgegenstehen, fielen bei breiteren Fernsehkanälen weg.

Großartige Möglichkeiten würden sich dem internationalen Programmaustausch eröffnen; denn man könnte Programme von Fernsehsatellit zu Fernsehsatellit weiterreichen. Zur Zeit ist der internationale Programmaustausch noch recht umständlich. Besonders wichtige Ereignisse aber könnten von allen Fernsehteilnehmern auf der Welt gleichzeitig verfolgt werden.

Es gibt sowjetische Pläne, die noch weiter gehen: Ein aus zwei Satelliten bestehendes Weltfernsehsystem soll den Fernsehton mehrsprachig übertragen. Angehörige verschiedener Nationen brauchen nur noch die Frequenz ihrer Sprache einzustellen und können dem Programm folgen. Man hat sogar an die Übergangszeit gedacht, in der auf der Welt noch verschiedene Fernsehnormen gebräuchlich sind. Die Fernsehsatelliten sollen die Programme zu gleicher Zeit in drei verschiedenen Normen ausstrahlen. Bereits mit den jetzt üblichen Empfängern wäre daher der Fernsehsatellit zu empfangen.





### Klein, kleiner, noch kleiner

#### Neue Bauelemente . . .

In der ganzen Welt sind beim Entwurf und bei der Ausführung elektronischer Geräte zwei Tendenzen festzustellen: Die Geräte sollen kleiner werden, ihre Zuverlässigkeit soll zunehmen.

Die „Miniaturisierung“ ist für die elektronische Technik bittere Notwendigkeit. Wir brauchen nur an elektronische Anlagen der Raumfahrt, an Nachrichtenkleinstgeräte oder an die medizinische Elektronik zu erinnern. Auch die industrielle Elektronik wäre ohne Miniaturisierung bald am Ende; denn bei den immer komplizierteren Aufgaben, die die fortschreitende Automatisierung der Elektronik stellt, wären die Werkhallen bald dermaßen mit Steuer-, Regel-, Meß- und Kontrolleinrichtungen vollgestopft, daß kein Raum mehr für Maschinen und Fertigungsstraßen bliebe.

Kein Haus stürzt zusammen, wenn eine Fensterscheibe eingeschlagen wird oder ein Ziegel vom Dach fällt. Versagt aber nur ein Bauelement in einem elektronischen Gerät, so kann dieses meistens seine Aufgaben nicht mehr erfüllen. In elektronischen Anlagen wirken oftmals Tausende Bauelemente zusammen; Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit jedes einzelnen Bauelements haben daher überragende Bedeutung.

„Einbauen und dann vergessen“ – mit diesem Schlagwort umschreiben Techniker ihr Wunschbild von zuverlässigen, langlebigen, keiner Wartung bedürftigen Bauelementen.

Auf dem Wege zur Verwirklichung dieses Wunsches hat uns die Halbleitertechnik schon ein gutes Stück vorangebracht. Das liegt zunächst daran, daß Transistoren und Dioden selbst klein, leicht und zuverlässig sind. Nicht weniger wichtig ist, daß ihr sparsamer Energieverbrauch und die dadurch bedingte geringe Wärmeentwicklung es ermöglichen, die Teile elektronischer Geräte viel dichter zusammenzurücken als in Geräten mit Röhren. Daß bei Halbleiterbestückung umfangreiche Stromversorgungsgeräte wegfallen, wirkt sich gleichfalls günstig auf die Abmessungen der Geräte aus.

Die Miniaturisierung haben Halbleiterbauelemente zwar ermöglicht, aber sie allein genügen nicht, die Miniaturisierung zu ver-





wirklichen. Es hieße auf halbem Wege stehenbleiben, wenn man Röhren durch Transistoren und Dioden ersetzte, während alle übrigen Bauelemente in ihrer bisherigen Größe erhalten blieben. Das erkennt bereits jeder Radiobastler, der sich einen Transistorempfänger aus Teilen eines „ausgeschlachteten“ Röhrengerätes zusammenbaut. Die Transistoren verschwinden geradezu gegenüber den anderen Bauelementen wie Kondensatoren, Widerständen, Schaltern, Spulen.

Wenn die Miniaturisierung Sinn haben soll, muß sie sich möglichst auf alle Bauelemente erstrecken. Zahlreiche Laboratorien und Produktionsbetriebe arbeiteten zusammen, ehe Miniaturteile zur Verfügung standen, die in ihrer Größe den Transistoren und Dioden angemessen waren.

So war es, um Spulen und Transformatoren verkleinern zu können, erforderlich, neuartige magnetische Werkstoffe zu entwickeln. Man mußte nicht nur lernen, für diese Transformatoren Drähte von nur 0,003 mm Stärke herzustellen, sondern auch, sie ohne Reifstellen zu verarbeiten. Transformatoren und Spulen von der Größe einer Murmel sind das Ergebnis dieser Bemühungen.

Auch die zahlreichen Kondensatoren, die in allen elektronischen Geräten unentbehrlich sind, bereiteten Sorgen. Mit den herkömmlichen Werkstoffen war es nicht möglich, sie beliebig zu verkleinern. Neuartige Kondensatormaterialien und Isolierstoffe mußten gefunden werden. Das Görlitzer volkseigene Kondensatorenwerk brachte Miniaturkondensatoren heraus, deren kleinster nur 0,3 p wiegt, 10 mm lang und 3 mm dick ist.

Sogenannte Tantalkondensatoren, ein für Miniaturgeräte besonders wichtiger Kondensatortyp, mußten bis vor kurzem eingeführt werden. Das war mit großen Schwierigkeiten verbunden, weil diese Kondensatoren auf den Embargolisten der „freien“ Welt stehen und nicht in sozialistische Länder exportiert werden dürfen. In Gemeinschaftsarbeit zwischen dem VEB Kondensatorenwerk Freiberg, dem EKB Bitterfeld, dem VEB Berliner Glühlampenwerk und dem Institut für Nichteisenmetalle der Bergakademie Freiberg wurden Tantal-Kleinstkondensatoren entwickelt; sie ersparen uns Importe und machen Erpressungsversuche kapitalistischer Staaten wirkungslos. Die Widerstände wurden ebenfalls verkleinert. In Miniaturgeräten sind sie oft nur 6 mm oder 8 mm lang und 0,5 mm bis 1 mm stark. Regelbare Widerstände – ihr uns bekanntester Vertreter ist der Lautstärkereglern im Rundfunkempfänger – schrumpften auf ein Zehntel ihres bisherigen Volumens.

Nicht einmal vor Schaltern, vor Kupplungen, Steckern und Relais konnte die Miniaturisierung haltmachen; denn bereits ein einfacher Kippschalter war so groß wie drei oder vier aneinandergelegte Transistoren. Inzwischen stehen winzige Schalter und Kontaktvorrichtungen zur Verfügung. Es gibt sogar Miniaturrelais, die nicht größer als ein halbes Streichholz sind; als Schaltzunge dient in ihnen ein dünner Quecksilberfaden.

Alle diese Bauelemente müssen, gemäß unserer Forderung, nicht nur klein, sondern sehr zuverlässig sein. Sie sollen in feuchter Luft ebenso wie in trockener, in tropischer Hitze ebenso wie in arktischer Kälte funktionieren. Schließlich soll ihre Herstellung billig sein und sich automatisieren lassen. Wir können der Bauelementeindustrie bescheinigen, daß sie in wenigen Jahren Miniaturbauelemente schuf, die diesen Forderungen im wesentlichen genügen.

## Neue Technologie

Selbst die zuverlässigsten Bauelemente schließen Gerätestörungen und -ausfälle nicht aus. Zahlreiche Fehlermöglichkeiten sind nämlich nicht durch die Bauelemente bedingt, sondern durch die Art und Weise, wie man diese bisher zur fertigen „Schaltung“ zusammenfügte.

Jedes Bauelement wurde mit seinen Anschlüssen oder mit Hilfe besonderer Schaltdrähte in das entstehende Gerät eingelötet. Schritt für Schritt entstand dabei am Montageband das Draht- und Einzelteilgewirr, das jahrzehntelang für das Innere elektronischer Geräte typisch war.

Sehen wir von der Möglichkeit ab, daß bei diesem schrittweisen „Verdrahten“ ein Bauelement falsch angeschlossen werden kann, so stellen vor allem „kalte Lötstellen“ Fehlerquellen dar. Sie können durch geringfügig verschmutzte oder oxydierte Schaltdrähte oder durch unsachgemäßes Löten entstehen und verhindern eine einwandfreie elektrische Verbindung zwischen Bauelement und übriger Schaltung. Da einer Lötstelle jedoch nicht anzusehen ist, ob sie „kalt“ ist, muß man oft recht lange nach einem Lötstellenfehler suchen.

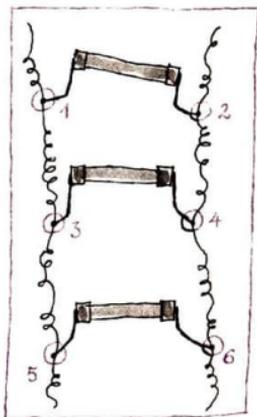
Die Verbindungsdrähte einer Schaltung sind niemals völlig starr. „Freitragend“ eingelötete Bauelemente können schwingen oder vibrieren. Das führt auf die Dauer manchmal zu Leitungsunterbrechungen oder zu Wackelkontakten.

Vor allem aber ist die bisherige Methode des Verdrahtens im Zeitalter der Mechanisierung und Automatisierung zu primitiv. Was nützen uns Maschinen und Automaten, die täglich Hunderttausende Bauelemente, Tausende Gehäuse und Chassis herstellen, wenn es beim Montieren und Löten durch die Handarbeit zu einem Stau kommt und wenn Lötfehler Ausschußquote und Nacharbeitszeit erhöhen?

Hier mußte gründlich Wandel geschaffen werden. Ziel der Techniker war es, sämtliche Leitungen einer Schaltung auf einmal herzustellen und alle Lötungen in *einem* Arbeitsgang und unter günstigsten Bedingungen durchzuführen. Durch „gedruckte Schaltungen“ wurde dieses Ziel erreicht. Wir wollen sie an einem einfachen Beispiel kennenlernen: Es seien drei Widerstände parallel zu schalten, wie wir sie in jedem Rundfunkempfänger finden. In her-



3 Widerstände =  
6 Lötstellen!



kömmlicher Weise würde das geschehen, wie die Skizze zeigt. Dabei wären nacheinander sechs Lötungen auszuführen.

Ausgangspunkt einer gedruckten Schaltung bildet eine dünne Platte aus Isoliermaterial, die mit einer dünnen Kupferfolie überzogen ist. Auf die Kupferseite zeichnen wir die gewünschte Leitungsführung. Wir wählen dazu eine ätzfeste Farbe, die Laugen oder Säuren widersteht.

Legen wir die so vorbereitete Platte in ein Ätzbad, so wird das von der Badflüssigkeit benetzte Kupfer aufgelöst. Nur unter den Farbstreifen bleibt das Metall stehen. Entfernen wir anschließend die Farbe, so trägt die Platte das aufgezeichnete Leitungsbild als elektrisch leitenden Kupferbelag.

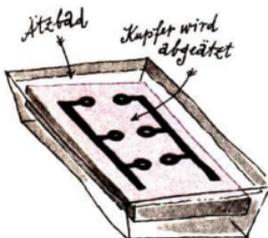
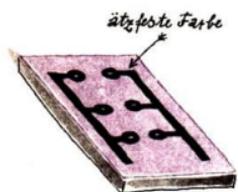
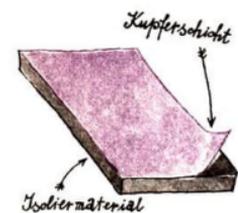
Dort, wo die Widerstände angeschlossen werden sollen, wird die Platte durchbohrt, und in die Bohrungen werden von der Rückseite der Platte die Widerstände mit ihren Anschlußdrähten eingeführt. Wir brauchen die mit den Widerständen bestückte Platte nur noch so nahe an die Oberfläche eines Lötzinnbades heranzubringen, daß die Kupferstreifen und die Anschlüsse der Widerstände mit dem geschmolzenen Zinn in Berührung kommen, und alle sechs Lötstellen würden auf einmal hergestellt.

Das Verfahren ist nicht auf drei Widerstände und sechs Lötstellen beschränkt. Wir könnten auf die Platte eine beliebig komplizierte Schaltung übertragen und ausätzen. Bei der industriellen Fertigung gedruckter Schaltungen wird das Leitungsbild nicht aufgezeichnet – das würde viel zu lange dauern –, sondern mit ätzfester Farbe aufgedruckt. Innerhalb kurzer Zeit können auf diese Weise viele Platten hergestellt werden. Auch ist es möglich, mehrere Platten gleichzeitig zu bedrucken, indem man Ausgangsmaterial großer Fläche wählt, das nach dem Drucken oder Ätzen auseinander-geschnitten wird. Man hat schon über 1000 kleine Leitungsplatten in einem Arbeitsgang hergestellt.

Nachdem die Platten bedruckt und geätzt sind, werden sie mit Bauelementen bestückt. Dazu werden an den entsprechenden Stellen Löcher in die Platten gestanzt. Lochdurchmesser und Lochabstände sind genormt, so daß das Einführen der gleichfalls genormten Anschlüsse der Bauelemente keine Schwierigkeiten bereitet.

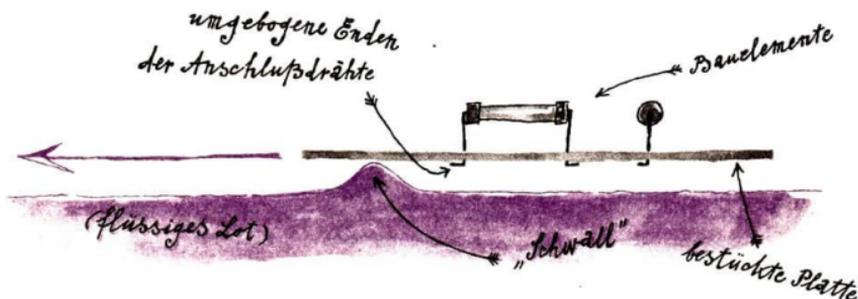
Die Bestückung der Platten mit Bauelementen erfolgt noch auf verschiedene Weise. Bei der Bestückung von Hand werden die Vorzüge der gedruckten Schaltung teilweise dadurch zunichte gemacht, daß in jeder Minute nur wenige Bauelemente eingesetzt werden können (im besten Falle acht bis zehn). Bei halbautomatischer Bestückung werden die Platten von Hand in die Bestückungsmaschine eingelegt. Die Maschine entnimmt die Bauelemente Magazinen und setzt sie in die Platte ein.

Erfolgt die Bestückung durch eine automatische Apparatur, so übt der Mensch nur noch eine Kontrollfunktion aus. Er übertrifft dabei die Stückleistung seines mit der Hand arbeitenden Kollegen mit



Leichtigkeit um das Hundertfache. Die Verwendung standardisierter Baugruppen und die hohen Arbeitsgeschwindigkeiten, die sich mit dem Verfahren der gedruckten Schaltungen erreichen lassen, könnten dazu führen, daß eines Tages die Fernseh- und Rundfunkempfänger eines ganzen Landes auf ein oder zwei Taktstrahlen „verschaltet“ werden.

Das Festlöten der Bauelemente kann gleichfalls automatisiert werden. In jüngster Zeit setzt sich das „Schwallöten“ durch. Die Oberfläche des Lötbades ist dabei nicht eben, sondern weist einen das Bad quer durchziehenden „Damm“ aus flüssigem Lot auf. Er entsteht dadurch, daß eine kleine Turbine ständig geschmolzenes Lötzinn nach oben treibt. Die bestückten Platten werden so über die „Dammkronen“ gezogen, daß ihre Unterseite in einer 2 cm bis 4 cm breiten Zone vom Lot bespült wird. Dadurch werden die Bauelemente angelötet. Da ständig von unten her neues Lot nach oben befördert wird, können sich keine störenden Oxydhäute ausbilden.



Die Vorschubgeschwindigkeit der Platten erreicht zur Zeit etwa 120 cm/min.

Gedruckte Schaltungen sind sehr zuverlässig. Untersuchungen an „gedruckten“ Fernsehempfängern haben ergeben, daß unter 5000 defekten Fernsehgeräten nur eines wegen eines Fehlers in der Leitungsplatte ausgefallen war; bei „verdrahteten“ Geräten dagegen wurde jeder 50ste Ausfall durch einen Leitungsdefekt verursacht.

Gedruckte Schaltungen benötigen das bisher allgemein übliche Metallchassis nicht; sie können auch auf vielerlei Kleinmontagebauteile wie Schrauben, Nieten, Winkel, Lötösen usw. verzichten. Bei der Serienproduktion werden dadurch erhebliche Materialmengen eingespart.

Größe und Gewicht gedruckter Schaltungen sind geringer als die gleichwertiger Geräte in verdrahteter Ausführung. Dieser Unterschied wird dadurch noch deutlicher, daß man gedruckte Schaltungen so ausführen kann, daß sie sich nach der Fertigstellung zusammenfallen oder zusammenrollen lassen. Ganz besonders bei Kleinstgeräten hat sich dieses Verfahren gut bewährt.

Zahlreiche elektronische Geräte – unter ihnen Rundfunkempfänger und die TRANSLOG-Bausteine – beweisen, daß in unserer Republik die Vorteile der gedruckten Schaltungen frühzeitig erkannt wurden.

### Baustein auf Baustein

In vielen Zweigen der Technik setzt sich das Baukastensystem immer mehr durch. Anlagen und Apparaturen entstehen aus vorgefertigten, standardisierten und leicht auswechselbaren Bausteinen, die nicht nur für eine, sondern – in entsprechender Kombination – für viele verschiedene Aufgaben zu verwenden sind.

Auch in der Elektro- und Nachrichtentechnik, in der Steuer-, Regel- und Rechentechnik bedient man sich dieses Systems. Wegen der Möglichkeit, die Bausteine teilweise oder völlig automatisch herzustellen, kann es die Arbeitsproduktivität vervielfachen.

Rundfunk- und Fernsehempfänger werden heute schon oft aus standardisierten Bausteinen zusammengesetzt. Für andere Zwecke werden ähnliche Bausteine produziert. So haben einige ausländische Firmen Bausteine herausgebracht, die zur Stromversorgung verschiedenartigster elektronischer Geräte dienen können. Auch Verstärkerstufen in Bausteinform gibt es. Die Bauelemente werden, um sie gegen Beschädigungen zu schützen, in Plaste eingebettet, so daß nur noch die Anschlüsse zugänglich sind. Bei einem Defekt innerhalb des Bausteins wird – wie meistens bei Anwendung des Baukastensystems – der ganze Baustein ausgetauscht.

Einen etwas anderen Aufbau für elektronische Bausteine wählte man in der CSSR: Die Bauelemente sind auf schmalen Plättchen aus Isoliermaterial befestigt. Die Verbindungsleitungen werden entweder gedruckt oder durch „Lötunkte“ ersetzt, an denen die Anschlüsse der Bauelemente enden. Um den Baustein vor äußeren Einflüssen zu bewahren, bringt man ihn in einem Glaskolben unter, der dem einer Röhre ähnlich ist. Ein Bausteinsystem dieser Art wird auch in England benutzt.

Damit ein defekter Baustein mit einem Griff ausgetauscht werden kann, wird er mit Kontaktstiften oder -leisten versehen, die in Gegenstücke am Gerät passen. Man kennt steckbare Bausteine für elektronische Rechenmaschinen, die nur die Größe eines Taschenbuches haben und in denen neben anderen Bauelementen allein über dreißig Dioden und fünf Transistoren untergebracht sind. Wollte man gleiche Bausteine mit Röhren aufbauen, so benötigte man dafür so große Gehäuse, wie sie für Reiseschreibmaschinen verwendet werden.

Gedruckte Schaltungen sind flächenhaft, „zweidimensional“. Eine noch bessere Raumausnutzung läßt sich erreichen, wenn man eine gedruckte Schaltung in mehrere Platten unterteilt, die zu einem



Stapel übereinandergesetzt werden. Normt man die Abmessungen der Platten, begnügt man sich ferner damit, sie mit nur wenigen Bauelementen zu bestücken, so kann man die Herstellung der Platten automatisieren.

Diese Gedanken sind in der „Modultechnik“ verwirklicht; sie wurde in den fünfziger Jahren als „Projekt Tinkertoy“ in den USA bekannt. Jedes elektronische Gerät wird in mehrere Baugruppen aufgeteilt. Ein Funkempfänger z. B. besteht aus fünf oder sechs solcher „Moduln“. Ein Modul ist aus mehreren keramischen Trägerplättchen von  $25\text{ mm} \cdot 25\text{ mm} \cdot 0,5\text{ mm}$  aufgebaut. Auf den Plättchen sind jeweils ein oder mehrere Bauelemente befestigt. Die Leitungszüge werden nicht aufgedruckt, sondern als dünner Silberbelag „eingebrennt“ – nach einem Verfahren, das die Keramikindustrie seit langem zur Verzierung ihrer Erzeugnisse anwendet. Die Leitungszüge enden an metallisierten Kerben an den Plattenrändern.

Vier bis sechs Plättchen gehören zu einem Modul. Die elektrische Verbindung zwischen ihnen wird durch steife Drähte hergestellt, die in die Kerben gelegt und verlötet werden. Gleichzeitig halten diese Drähte den Modul zusammen.

Die Produktion der Plättchen ist automatisiert. Bereits ein Versuchswerk lieferte in jeder Stunde 5000 Modulplättchen. Später wurde der Ausstoß beträchtlich erhöht. Mit Hilfe eines Lochkartenautomaten werden die Plättchen einzeln geprüft und fehlerhafte Stücke sofort ausgeschieden.

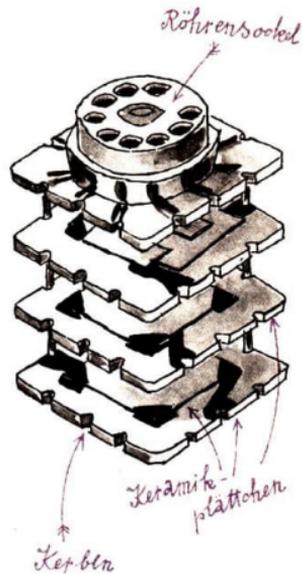
Die „Bauelementendichte“ erreicht 400 Stück je Kubikdezimeter. Ein nach dem Modulsystem konstruiertes Gerät mit 400 Bauelementen beansprucht also nur soviel Raum wie 1 l Wasser. Dieses Ergebnis ist um so bemerkenswerter, als das „Projekt Tinkertoy“ noch Elektronenröhren verwendete.

Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit der Moduln litten durch die aufgesetzten Röhren. Man versuchte deshalb, auch diese der neuen Technik anzupassen. Es wurden „Keramikröhren“ erprobt, die gleichfalls aus genormten Keramikplättchen „gestapelt“ waren. Die Plättchen enthalten Bohrungen für die Elektroden und den notwendigen Hohlraum; sie liegen mit eingebrennten Metallringen übereinander. Diese werden verschweißt, während die Röhre luftleer gepumpt wird.

Eine weitere Verkleinerung wurde möglich, als die Halbleiterelemente einsatzreif waren. Die großen, empfindlichen Röhren störten nun nicht mehr, die Bausteine schrumpften zusammen, aus der Modultechnik wurde die „Mikromodultechnik“, die keine Elektronenröhren benutzt.

Auch beim Mikromodulsystem werden einzelne Trägerplättchen gestapelt. Ihre Abmessungen betragen aber in den meisten Fällen nur  $8\text{ mm} \cdot 8\text{ mm} \cdot 0,25\text{ mm}$ .

Für derart kleine Plättchen sind selbst Miniaturbauelemente viel zu groß. Deshalb werden beim Mikromodulsystem nicht nur die



Trägerplättchen  
der Mikromodul-  
bauteile

(nur  
als Größenvergleich!)



Leitungszüge, sondern auch die Bauelemente selbst aufgedruckt oder aufgebrannt.

Drückt man eine mäanderförmige Linie aus Widerstandsmaterial auf ein Mikromodulplättchen, so verhält sich das Plättchen wie ein Widerstand. Kammartig ineinandergreifende Leitungsstücke bilden einen Kondensator, eine aufgedruckte Spirallinie ergibt eine Spule. Die meisten Bauelemente der Elektronik lassen sich auf diese Weise gewinnen. Zu reparieren ist freilich ein solches Bauelement nicht, da es mit dem Plättchen eine untrennbare Einheit bildet.

Die Halbleiterbauelemente werden ebenfalls in die Plättchen einbezogen. Transistoren und Dioden werden in Vertiefungen eines Plättchens eingelassen und luftdicht abgeschlossen. Die Anschlüsse führen zu Kerben am Rand des Plättchens. Der Mikromodulbaustein wird wieder an den Rändern „verdrahtet“ und anschließend in schützenden Kunststoff eingebettet. Das Ergebnis ist ein Kunststoffwürfel, aus dem nur noch die Enden der durch die Kerben führenden Drähte herausragen.

Die Bauelementendichte ist naturgemäß viel größer als beim „einfachen“ Modulsystem: Über 25000 Bauelemente finden im Kubikdezimeter Platz.

Immer wieder ist man überrascht, wie sich die Abmessungen uns gewohnter Geräte durch das neue Verfahren verringern. Im Forschungsinstitut für Nachrichtentechnik in Prag entstand ein mit drei Transistoren bestückter Empfänger, der – ohne Kopfhörer und Batterie – nur so groß wie ein Stück Würfelzucker ist. Ein Flugzeugspezialempfänger, der aus sieben Mikromoduln zusammengesetzt ist, benötigt soviel Platz wie zwei übereinandergelegte Streichholzschachteln.

In unserer Republik befaßt sich besonders der VEB Keramische Werke Hermsdorf mit der Mikromodultechnik. Die keramischen Trägerplättchen sind 10 mm · 15 mm · 0,8 mm groß und werden ebenfalls zu Bausteinen übereinandergesetzt. Neben der Entwicklung von Standardbausteinen, die sich zu den verschiedenartigsten Schaltungen kombinieren lassen, ist man um die Konstruktion einer vollautomatischen Taktstraße bemüht, die alle Arbeitsgänge von der Heranführung des Rohmaterials bis zur Prüfung und Verpackung des fertigen Bausteines übernimmt.

Man kann sich kaum vorstellen, daß es „noch kleiner“ geht. Doch schon bahnt sich eine Technik an, die auch Mikromodulbausteine noch als „Riesen“ erscheinen läßt. Wir werden dieser Technik, die gleichfalls ein „Kind der Halbleiterphysik“ ist, ein besonderes Kapitel vorbehalten.



## Neue Bauelemente – andere Materialien

### Noch einmal die Diode

Eines der in der Elektronik am häufigsten verwendeten Bauelemente ist der Kondensator. Er kann eine gewisse Elektrizitätsmenge speichern, wird in „elektrischen Weichen“ zur Trennung von Gleich- und Wechselströmen benutzt und ist hauptsächlich für alle Abstimmkreise der Hochfrequenztechnik unentbehrlich.

Ein Kondensator besteht aus zwei elektrisch leitenden Platten, den „Belägen“, die einander in gewissem Abstand gegenüberstehen, aber durch ein isolierendes „Dielektrikum“ voneinander getrennt sind.

Größe und Abstand der Platten sowie die Art des gewählten Dielektrikums sind entscheidend für das elektrische Verhalten des Kondensators. Man beschreibt es vor allem mit dem Begriff der „Kapazität“ des Kondensators, wobei wir die Kapazität als Fassungsvermögen für elektrische Ladung deuten können.

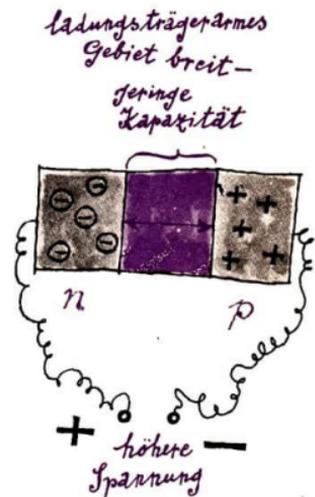
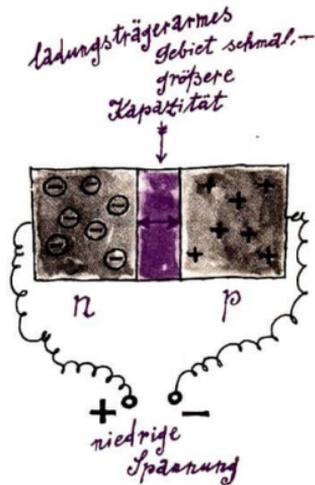
Wenden wir uns nach diesem erläuternden Abstecher wieder den Halbleitern zu. Wir haben erfahren (siehe S. 49), daß ein Flächengleichrichter bei sehr hohen Frequenzen „undicht“ wird und einen Teil des gleichzurichtenden Wechselstroms „durchsickern“ läßt. Dies kommt daher, daß die Diode nebenbei als Kondensator wirkt. p- und n-Gebiet sind seine Beläge; die sehr schlecht leitende Sperrschicht ist das Dielektrikum. Auch dieser Kondensator besitzt eine gewisse Kapazität, die „Sperrschichtkapazität“.

Die Sperrschichtkapazität ist bei Halbleitergleichrichtern sehr unerwünscht. Erst in jüngster Zeit gelang es, sie durch Verbesserung der Technologie zu verringern. Nebenbei jedoch fragte man sich, ob nicht die Kondensatorwirkung der Diode auch zu etwas nütze sein könne. Ausgangspunkt dieser Überlegungen war folgende Beobachtung:

Wird eine Gleichspannung in Sperrrichtung an eine Flächendiode gelegt, so hängt die Sperrschichtkapazität von der Größe dieser Spannung ab. Wachsende Spannungen lassen die Kapazität sinken, abnehmende Spannungen verursachen eine Kapazitätzunahme. Dieser Effekt ist nicht schwer zu erklären:

Bei kleiner Spannung ist die Sperrschicht dünn, die „Beläge“ des „Kondensators“ stehen einander nur in geringem Abstand gegenüber; das bedeutet eine verhältnismäßig große Kapazität. Steigt die an der Diode liegende Spannung, wird die Sperrschicht breiter. Die Beläge des Kondensators entfernen sich voneinander, die Kapazität sinkt. Die in Sperrrichtung an eine Gleichspannungsquelle angeschlossene Flächendiode verhält sich also wie ein Kondensator mit veränderlicher Kapazität.

An vielen Stellen der Technik werden Kondensatoren gebraucht, deren Kapazität veränderbar ist. Wie das möglich ist, zeigt ein Blick in einen Rundfunkempfänger. Wenn wir am Abstimmknopf drehen, schwenken wir die Plattenpakete der „Drehkondensatoren“





gegeneinander. Wir sehen aber noch mehr: Drehkondensatoren sind verhältnismäßig komplizierte und nicht gerade kleine Bauelemente. Selbst bei Spezialanfertigungen kommt man nicht unter die Größe einer Kastanie. Außerdem ist die Fernbedienung eines Drehkondensators umständlich, da sie nur mit einem Motor oder einem anderen mechanischen Stellglied zu erreichen ist.

Heute können „Kapazitätsdioden“ veränderliche Kondensatoren schon bei manchen Anwendungen ersetzen. Überdies sind sie nur so groß wie eine Erbse oder eine Kaffeebohne; ihre Kapazitätsänderung erfolgt ausschließlich auf elektrischem Wege. Eine Fernbedienung wird damit zum Kinderspiel, denn die Steuerspannung kann der Diode auch über große Entfernungen zugeführt werden. Schaltungen, bei denen die Kapazität eines Kondensators ständig selbsttätig nachgeregelt werden muß, sind mit Kapazitätsdioden sehr einfach auszuführen. Das gilt z. B. für die „automatische Scharfabstimmung“, die in Fernseh- und Rundfunkgeräten darüber wacht, daß das Gerät stets haargenau auf die empfangene Station eingestellt bleibt. Es lassen sich außerdem Einrichtungen zusammenstellen, die in Funkempfängern selbsttätig einen bestimmten Wellenbereich absuchen und den Empfänger immer dann „aufdrehen“, wenn ein Signal empfangen wird.

Wir hätten die Kondensatorwirkung der Diode nicht so ausführlich besprochen, wenn sie nicht im „parametrischen Verstärker“ eine noch viel wichtigere Anwendung gefunden hätte. Wir wollen uns nicht den Kopf zerbrechen, woher der Name rührt und wie ein solcher Verstärker funktioniert. Wichtig ist zu wissen: Der parametrische Verstärker schließt dort an, wo Transistor- und auch Röhrenverstärker Schwierigkeiten zu machen beginnen, im Gebiet der höchsten Frequenzen, im Dezimeter- und Zentimeterwellenbereich.

Der parametrische Verstärker ist klein, einfach aufgebaut, wenig temperaturabhängig und vor allem hochempfindlich. Gerade solche Verstärker kommen für die weitere Entwicklung der Nachrichtentechnik wie gerufen: Die Reichweite eines Radargerätes wird um so größer, je empfindlicher sein Empfänger ist. Nachrichtenverbindungen mit kosmischen Flugkörpern funktionieren um so sicherer und auf um so größere Distanz, je schwächere Signale noch einwandfrei aufzunehmen sind. Die „Lauscher am Weltraum“, die Radioastronomen, werden um so hellhöriger, je empfindlichere Geräte ihnen zur Verfügung stehen.

Seit drei Jahren gibt es noch eine weitere Diode für Höchstfrequenzen. Sie heißt nach einem japanischen Physiker, der an ihrer Entwicklung großen Anteil hat, „Esakidiode“. Auch der Ausdruck „Tunneldiode“ ist üblich. Eine Erklärung ihrer Wirkungsweise setzt umfangreiche Kenntnisse in der Atomphysik voraus; daher müssen wir auf sie verzichten. Nur soviel sei gesagt:

p- und n-Gebiet einer Tunneldiode sind mit viel mehr Fremdatomen dotiert als die entsprechenden Gebiete einer normalen

Diode; außerdem ist die Sperrschicht extrem dünn. Elektronen, die normalerweise bei entsprechenden Spannungen an der Diode die Sperrschicht nicht überschreiten könnten, „bohren“ sich sozusagen einen „Tunnel“ durch die Sperrschicht, so daß Strom fließen kann.

Eine Tunneldiode braucht zum Betrieb eine äußerst geringe elektrische Leistung; sie „rauscht“ nur sehr wenig, ist in einem weiten Bereich unempfindlich gegen Temperaturschwankungen und gegen radioaktive Strahlung. Sie ist sehr klein und verhältnismäßig einfach herzustellen. Sie kann als Verstärker und als Sender, wobei vorerst die Sendeleistung noch sehr gering ist, bis zu höchsten Frequenzen benutzt werden.

Es gibt bereits „drahtlose Mikrophone“, die statt eines Transistors eine Tunneldiode enthalten. Sie sind nur so groß wie eine Zigarre; selbst ihre Antenne ist nur 8 cm lang. Die Reichweite beträgt etwa 30 m.

Was Tunneldioden-Verstärker leisten, zeigte sich bei Fernsehversuchen. Während das Bild eines auf Dezimeterwellen arbeitenden Testsenders mit einem herkömmlichen Empfänger nur völlig „verregnet“ zu empfangen war, zeigte das Gerät, dessen erste Stufe man gegen einen Esakidioden-Verstärker ausgetauscht hatte, ein klares, einwandfreies Bild.

Auch abseits der Höchsthochfrequenztechnik gibt es Aufgaben für Esakidioden. Ihr Einsatz als „superschneller Schalter“ wird die Arbeitsgeschwindigkeit von elektronischen Rechenmaschinen weiter erhöhen.

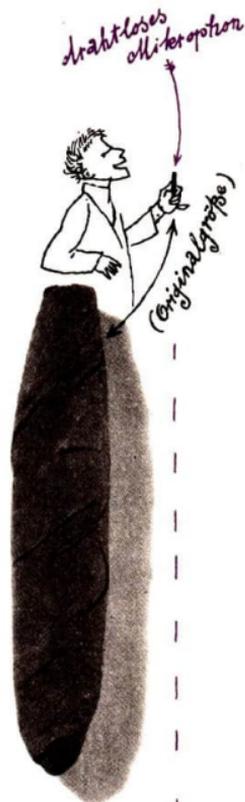
### MESA, TECNETRON und andere

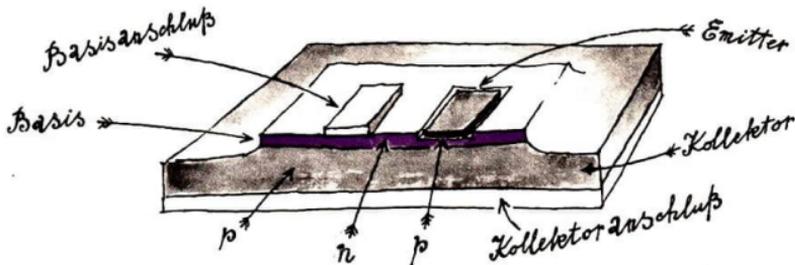
Immer wieder tauchten während der vergangenen Jahre in Fachzeitschriften und Firmenmitteilungen die Namen neuer Transistorarten auf. Manche davon kennt heute jeder Techniker, manche sind wieder in Vergessenheit geraten, weil sie sich nicht bewährten. Die Gründe für diese Neuentwicklungen haben wir bereits genannt: Frequenz- und Leistungsgrenzen des Transistors müssen „nach oben“ verschoben werden.

Daß unsere Skizze einen Transistor darstellt, ist auf den ersten Blick kaum zu erkennen. Eher ähnelt das Gebilde einem Tafelberg oder einem Tisch, und dem spanischen Wort für Tisch verdankt dieser in vielen Ländern produzierte Transistor auch seinen Namen: Mesatransistor.

Bei der Herstellung des Mesatransistors werden kleine, p-leitende Germaniumscheiben – man kann auch Silizium als Ausgangsmaterial nehmen – Arsen- oder Antimondampf ausgesetzt. Dabei diffundieren Arsen- oder Antimonatome in das Germanium. Sie bilden die n-leitende Basisschicht, die nur  $1 \mu\text{m}$  bis  $2 \mu\text{m}$  stark ist.

Basisanschluß ist ein schmaler Goldstreifen. Er wird durch die Aussparung einer aufgelegten Maske aufgedampft. Dicht neben





dem Goldstreifen wird auf gleiche Weise ein Aluminiumstreifen aufgebracht. Unter ihm entsteht durch eindiffundierende Aluminiumatome ein p-leitendes Gebiet, der Emitter des Mesatransistors. Nach dem Aufbringen von Emitter- und Basisanschluß wird das überstehende Germanium durch einen Ätzprozeß abgetragen. So entsteht die charakteristische Mesaform.

Die Herstellung von Mesatransistoren wird dadurch erleichtert, daß die Bearbeitung im wesentlichen nur von einer Seite her erfolgt. Außerdem lassen sich die Emitter- und Basisanschlüsse für mehrere Hunderte Mesatransistoren gleichzeitig herstellen.

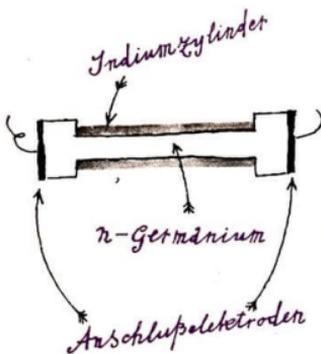
Trotzdem ist auch die Fertigung von Mesatransistoren alles andere als einfach. Wir dürfen uns durch die Skizze nicht täuschen lassen; sie ist gegenüber der Wirklichkeit stark vergrößert. Ein Mesasystem ist ein Plättchen von nur etwa 0,1 mm Seitenlänge. Die Streifen sind etwa 20  $\mu\text{m}$  breit, 50  $\mu\text{m}$  lang und haben einen gegenseitigen Abstand von nur 10  $\mu\text{m}$ .

Der Mesatransistor ist damit ein Halbleiterbauelement, das den Forderungen der Miniaturisierung besonders nachkommt. Allerdings wollen wir hier einflechten, daß es noch kleinere Transistoren gibt. Den Rekord hält gegenwärtig ein Transistorsystem, von dem sich 20000 Stück auf einer Briefmarke unterbringen ließen.

Die Ladungsträger brauchen nur eine sehr geringe Zeitspanne, um die dünne Basis des Mesatransistors zu durchqueren. Deswegen kann der Mesatransistor bis in den Ultrakurzwellenbereich eingesetzt werden. Wir finden ihn bereits hier und da in Ultrakurzwellen- und Fernsehempfängern.

Man kann auch Halbleiterbauelemente konstruieren, bei denen die Verstärkung nicht nach dem Transistorprinzip, sondern auf andere Weise erfolgt. Eines dieser Bauelemente ist der „Spacistor“, der sogar Zentimeterwellen verstärken kann. Wir wollen aber auf seine Wirkungsweise nicht näher eingehen.

Ein weiteres verstärkendes Halbleiterbauelement ist das „Tecnatron“. Es besteht aus einem nur 2 mm langen und 0,5 mm starken Stäbchen aus n-Germanium, das in der Mitte von einem Indiumzylinder umschlossen wird. Beide Enden des Stäbchens tragen Anschlußelektroden. Die Verstärkung kommt dadurch zustande, daß Strom, der durch das Stäbchen fließt, durch eine Spannung am Indiumzylinder beeinflusst werden kann. Sie drängt die Ladungs-

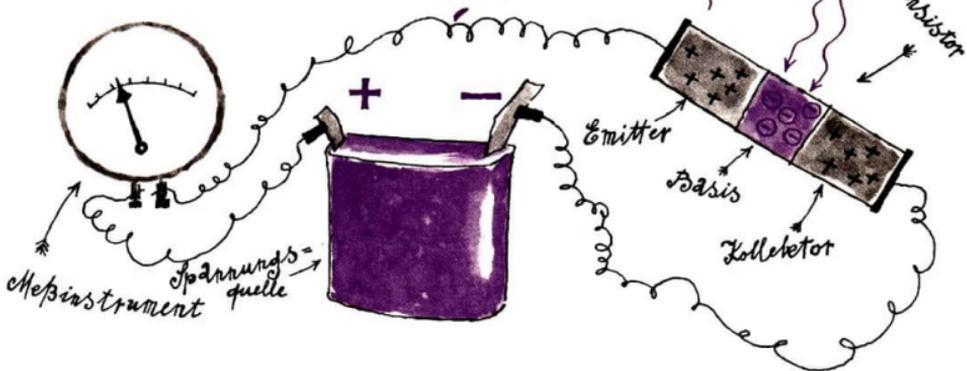


träger zur Mitte, die durch das Stäbchen wandern. Es ist fast, als würde das Stäbchen in Abhängigkeit von der Steuerspannung dünner oder dicker. Diese scheinbare Querschnittsveränderung bewirkt ein entsprechendes Schwanken der Stromstärke. Auch das Tectron ist noch auf sehr hohen Frequenzen arbeitsfähig.

Fotodioden erzeugen, wenn sie dem Licht ausgesetzt werden, eine elektrische Spannung. Sie ist für viele Zwecke zu niedrig. Man kann sie durch einen nachgeschalteten Transistorverstärker erhöhen. Da auch der Transistor lichtempfindlich ist, taucht die Frage auf, ob sich Fotodiode und Verstärketransistor nicht zu einem Bauelement vereinen ließen.

Im Fototransistor hat diese Frage ihre Antwort erhalten. Er ist fünfzig- bis hundertmal lichtempfindlicher als Fotodioden und spricht noch auf schwächste Lichteindrücke an.

Die Skizze zeigt einen Stromkreis, bestehend aus einer Batterie, einem Meßinstrument und der Emitter-Kollektor-Strecke eines pnp-Transistors. Der Basisanschluß bleibt frei. Wird der Transistor nicht belichtet, so fließt nur ein sehr schwacher Strom; denn der Übergang Basis-Kollektor ist in Sperrrichtung geschaltet. Fällt Licht auf den pn-Übergang Emitter-Basis, so werden wie in einer Fotodiode oder einem Fotoelement Elektronen und Löcher freigesetzt. Die Basis wird dabei negativ, der Emitter positiv. Wir haben damit die gleichen Verhältnisse, als wäre eine Batterie zwischen Basis und Emitter geschaltet. Die freiwerdenden Löcher durchqueren die Basis und werden vom Kollektor aufgesammelt. Damit wächst der Strom stark an.



### Es muß nicht immer Germanium sein

Wir haben uns angewöhnt, stets gleich an Germanium oder Silizium zu denken, wenn von Halbleitermaterial die Rede ist. Warum auch nicht? Germanium und Silizium sind schließlich die gegenwärtig mit großem Vorsprung am häufigsten benutzten Halbleiter. Immerhin wissen wir bereits, daß auch andere Halbleitermaterialien verwendet werden: Kupferoxydul und Selen bei Gleichrichtern,

Metalloxyde bei Thermistoren, Kadmium-, Bleisulfid und andere Stoffe bei Fotowiderständen und Fotoelementen.

Heute sucht man systematisch nach weiteren Stoffen mit Halbleitereigenschaften. Die Gründe dafür sind verschiedener Natur. Wer sich des langen und komplizierten Weges von der Germaniumbeziehungswise Siliziumverbindung bis zum Einkristall erinnert, wird verstehen, wie wertvoll für die Technik Halbleiterstoffe wären, deren Herstellung nicht solche Schwierigkeiten bereite.

Die mit der Temperatur stark zunehmende Eigenleitfähigkeit des Germaniums und des Siliziums ist oft hinderlich, da sie zu besonderen Kühlmaßnahmen zwingt oder den Anwendungsbereich der Bauelemente einengt. Vor allem die Raketentechnik braucht Halbleiterbauelemente, die noch bei Temperaturen um  $500^{\circ}\text{C}$  arbeitsfähig sind. Auch Leistung, Frequenz und die Spannung, die zwischen Basis und Kollektor angelegt werden darf, hängen vom Ausgangsmaterial ab.

Die Forschung ist hier auf der ganzen Welt noch in vollem Fluß. Bemerkenswerte Resultate sind bereits bekannt geworden. So zeigt der sehr temperaturfeste Kohlenstoff in seiner Modifikation als Diamant Halbleitereigenschaften. Man erzeugt derartige „Halbleiterdiamanten“ aus Graphit und dotiert sie mit Bor, Beryllium oder Aluminium; sie werden vielleicht eines Tages für die Halbleitertechnik sehr wichtig werden. Für Spezialaufgaben gibt es bereits Diamantthermistoren.

Eine bekannte Verbindung zwischen Silizium und Kohlenstoff ist das Siliziumkarbid, das unter dem Namen „Karbörundum“ als Schleifmittel, für feuerfeste Auskleidungen und zur Herstellung von Heizstäben für Elektroöfen verwendet wird. Siliziumkarbid kann, wie bereits erwähnt, ebenfalls für Halbleiterbauelemente benutzt werden, wobei man mit Arbeitstemperaturen bis zu  $500^{\circ}\text{C}$ , teilweise darüber, rechnet.

Für höhere Temperaturen sind auch verschiedene Stoffe aus der großen Gruppe der „intermetallischen Verbindungen“ geeignet. Die Liste der untersuchten und für die Halbleitertechnik brauchbaren intermetallischen Verbindungen ist bereits recht lang und enthält Verbindungen wie Aluminiumantimonid, Indiumphosphid, Galliumantimonid und Indiumantimonid. Auch die bekannten Verbindungen Kadmiumsulfid und Bleisulfid gehören dazu.

Alle Stoffe, die wir nannten oder näher kennenlernten, sind anorganischer Natur. In der wissenschaftlichen Welt fanden daher Meldungen aus der Sowjetunion große Beachtung, die besagten, daß sich die Halbleiterforschung dort auch intensiv mit organischen Ausgangsmaterialien befaßt. Im Frühjahr 1959 berichtete auf dem 8. Mendelejew-Kongreß Akademiemitglied Nikolai Semjonow über diese Arbeiten. Allerdings waren Halbleitereigenschaften, nämlich fotoelektrisches Verhalten, an einigen organischen Stoffen bereits am Anfang unseres Jahrhunderts beobachtet, aber wenig beachtet worden.

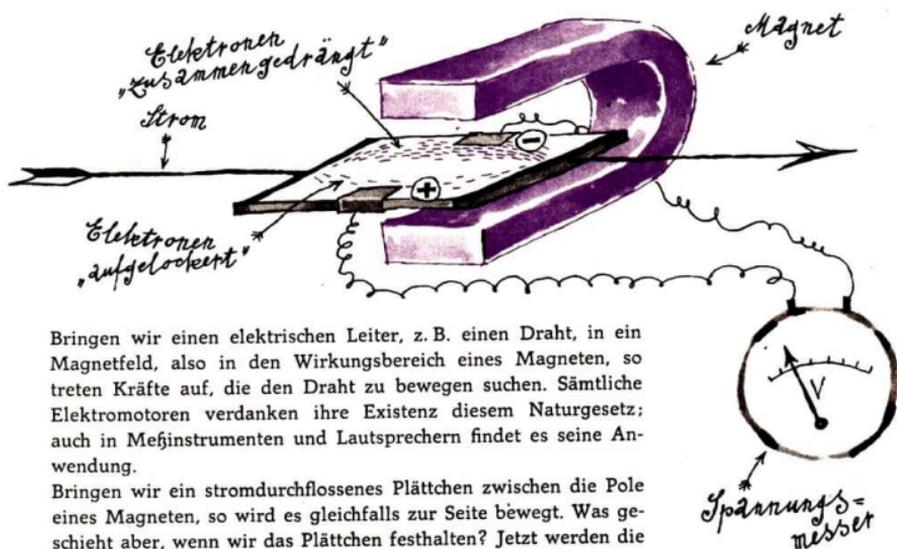


Als man sich in der westlichen Welt noch stritt, ob es eines Tages möglich sein würde, „Plastetransistoren“ herzustellen, deren Ausgangsstoffe denen ähneln, die heute für die Herstellung synthetischer Fasern eine so große Bedeutung erlangten, kam eine neue, überraschende Meldung aus sowjetischen Laboratorien: Man hatte einen Transistor entwickelt, dessen Grundmaterial Polyakrylnitril ist. Die Halbleitereigenschaften waren dadurch erreicht worden, daß man das Ausgangsmaterial mit Strahlen radioaktiver Stoffe „bombardiert“ hatte.

Es ist das Verdienst der sowjetischen Wissenschaft, der Halbleiterforschung hier ein neues, großes Aufgabengebiet zugewiesen zu haben. Seine Bedeutung liegt vor allem darin, daß „Plastetransistoren“ verhältnismäßig leicht herzustellen und zu bearbeiten wären. Wenn wir zur Zeit auch erst die Anfänge der Kunststoff-Halbleiterforschung miterleben, so ist doch nicht ausgeschlossen, daß eines Tages nicht nur das Gehäuse, sondern auch die Transistoren unseres Taschenempfängers aus Plasten bestehen werden.

### Halbleiter als Kompaß

Im Kapitel über Thermoelemente haben wir gelesen, wie ein den Physikern seit langem bekannter Effekt durch die Halbleitertechnik auf einmal technische Bedeutung erhielt. Ähnliches wiederholte sich beim „Halleffekt“, so genannt nach seinem Entdecker, dem amerikanischen Physiker E. H. Hall.



Bringen wir einen elektrischen Leiter, z. B. einen Draht, in ein Magnetfeld, also in den Wirkungsbereich eines Magneten, so treten Kräfte auf, die den Draht zu bewegen suchen. Sämtliche Elektromotoren verdanken ihre Existenz diesem Naturgesetz; auch in Meßinstrumenten und Lautsprechern findet es seine Anwendung.

Bringen wir ein stromdurchflossenes Plättchen zwischen die Pole eines Magneten, so wird es gleichfalls zur Seite bewegt. Was geschieht aber, wenn wir das Plättchen festhalten? Jetzt werden die Elektronen, die den elektrischen Strom bilden, durch das Magnetfeld zur Seite gedrängt – in der Skizze nach hinten –, der Elek-

tronenstrom wird hinten dichter, während er nahe der vorderen Kante aufgelockert wird. Könnten wir eine Momentaufnahme der Elektronenbewegung machen, so würde diese zeigen, daß in der hinteren Hälfte des Plättchens mehr Elektronen als in der vorderen zu finden sind. Anders ausgedrückt: An der Hinterkante herrscht Elektronenüberfluß, an der Vorderkante Elektronenmangel. Wir wissen, was das bedeutet: Zwischen Hinter- und Vorderkante tritt eine elektrische Spannung auf, deren negativer Pol (Elektronenüberschuß) hinten liegt. Diese Spannung heißt nach ihrem Entdecker Hallspannung.

Die Größe der Hallspannung hängt von der Stärke des im Plättchen fließenden Stromes, von der Stärke des Magnetfeldes, von der Dicke und dem Werkstoff des Plättchens ab. Bei Metallplättchen ist die Hallspannung selbst bei starken Strömen und kräftigen Magnetfeldern niedrig. Sie liegt höchstens bei einigen Millivolt und kann daher nur mit empfindlichen Meßinstrumenten nachgewiesen werden.

Eine bis tausendfach höhere Hallspannung bekommt man, wenn das Plättchen aus Halbleitermaterial besteht. Wählt man Indiumarsenid, so sind bei Strömen um 1 A und kräftigen Magnetfeldern Hallspannungen von etwa 1 V zu erreichen.

Anordnungen, die den Halleffekt nutzen, heißen Hallgeneratoren, weil in ihnen durch die Wechselwirkung zwischen Strom und magnetischen Kräften eine elektrische Spannung entsteht. Die Plättchen sind sehr klein. Ihre Fläche liegt zwischen wenigen Quadratmillimetern und einem Quadratzentimeter.

Da die Hallspannung vom Magnetfeld abhängt, können Sonden konstruiert werden, mit denen magnetische Felder auszumessen sind. Derartige Messungen haben für den Elektromaschinenbau und für die Prüfung und Kontrolle magnetischer Werkstoffe große Bedeutung. Bei „Feldsonden“ wird der durch den Hallgenerator fließende Strom konstant gehalten und die Hallspannung gemessen; die Sonde wird in das zu untersuchende Magnetfeld eingeführt. Da sie sehr klein ist, lassen sich auch Magnetfelder an Stellen ausmessen, die sonst schwer zugänglich wären. Form und Abmessungen unbekannter Magnetfelder können ermittelt werden.

Unsere Erde besitzt ein magnetisches Feld; der Kompaß ist das bekannteste Gerät, das dieses Magnetfeld ausnutzt. Hallgeneratoren mit Halbleiterplättchen können so empfindlich gemacht werden, daß es mit ihnen möglich ist, das magnetische Erdfeld unmittelbar zu messen und zu kontrollieren. Dreht man einen Hallgenerator im Erdfeld, so ändert sich die Hallspannung in Abhängigkeit von der Richtung des Plättchens zu den magnetischen Kraftlinien des Erdfeldes. Man kann daher mit dem Hallgenerator nicht nur Änderungen des erdmagnetischen Feldes beobachten und registrieren, sondern darüber hinaus einen Halleffekt-Kompaß konstruieren, der empfindlicher als gewöhnliche Magnetkompassse ist.



Jede Änderung des durch den Hallgenerator fließenden Stromes und jede Änderung des Magnetfeldes verursachen eine Änderung der Hallspannung. Diese Änderungen sind den Schwankungen des Magnetfeldes und des Stromes proportional. Verdopplung der Stromstärke bewirkt Verdopplung der Hallspannung, Verdreifachung der Stärke des Magnetfeldes verdreifacht die Hallspannung. Verdoppeln wir die Stromstärke bei gleichzeitiger Verdreifachung der magnetischen Feldstärke, so steigt die Hallspannung auf den  $2 \cdot 3$ -fachen, also 6fachen Wert. Der Hallgenerator bildet demnach ein Produkt aus zwei Größen, man kann mit ihm elektrisch multiplizieren.

Häufig soll die Leistung an einem elektrischen Gerät bestimmt werden. Man erhält sie als Produkt aus Spannung und Stromstärke. Mit dem Hallgenerator ist es möglich, einfache „Wattmeter“ zu bauen, die diese Multiplikation selbsttätig ausführen und die Leistung sofort anzeigen.

Zum Multiplizieren von drei Größen werden zwei Hallgeneratoren hintereinandergeschaltet. Die Ergebnisse sind so genau, daß sich Hallgeneratoren in Rechenmaschinen einsetzen lassen.

Wenn die Stärke von Magnetfeldern selbsttätig und genau eingehalten werden muß, kann man mit Hallgeneratoren Stabilisierungseinrichtungen aufbauen, die das Magnetfeld überwachen und regeln. In der Höchstfrequenztechnik, in kernphysikalischen Laboratorien und für die Elektronenoptik sind derartige Stabilisierungsschaltungen sehr oft erforderlich.

## Weites Feld für neue Technik

### Was ist Molekularelektronik?

Die Methode der Miniaturisierung, die wir bisher kennenlernten, läßt sich kurz so charakterisieren: Die Bauelemente werden kleiner und rücken dichter zusammen. Es leuchtet ein, daß sich dieses Verfahren nicht beliebig fortsetzen läßt. Mit der Mikromodul技术 dürfte man der Untergrenze des Möglichen recht nahe gekommen sein.

Nicht verstimmt aber ist die Forderung nach weiterer Verkleinerung elektronischer Geräte. Von Tag zu Tag stellen wir ihnen kompliziertere Aufgaben, sei es in der Produktionstechnik, im Verkehrswesen, bei der Weltraumfahrt oder zur Nachrichtenübermittlung. Gleichzeitig müssen wir aber verlangen, daß die Geräte nicht in gleichem Maße mitwachsen, sondern eher noch kleiner und leichter werden. Auch darf keinesfalls ihre Zuverlässigkeit durch die Verkleinerung leiden.

Da die bisherigen Methoden keine Lösung bringen konnten, blieb nichts anderes übrig, als sich in der Elektronik völlig neu zu orientieren. Man fragte sich: Muß denn ein Gleichrichter, ein Ver-

*immer kleiner  
und  
leichter!*



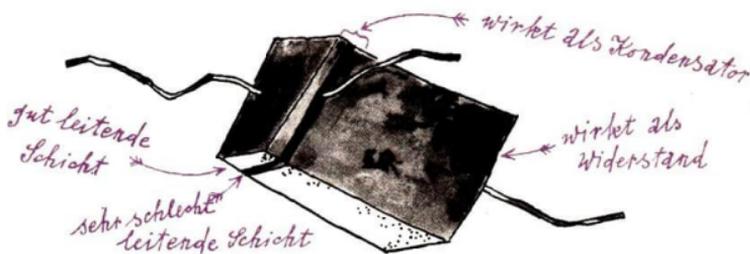
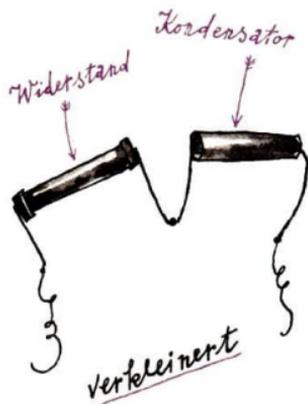
stärker, ein lichtelektrisches Steuergerät aus zahlreichen einzelnen Bauelementen, Verbindungen und Lötstellen bestehen? Könnte man auf die meisten Bauelemente nicht verzichten und an ihre Stelle „aus einem Guß“ gefertigte Bausteine setzen, die die gleichen Funktionen erfüllen wie der aus einzelnen Elementen aufgebaute Baustein?

Diese Überlegungen führten zur Molekularelektronik, von der wir schon im ersten Kapitel des Buches behaupteten, sie „vereinige die jüngsten Ergebnisse der Atom- und Halbleiterforschung“.

Kleinste Einheit der Molekularelektronik ist der sogenannte Funktionsblock, ein Baustein, der die Funktion einer ganzen elektronischen Baugruppe, eines Gleichrichters, Verstärkers, Spannungswandlers und Rechenbausteins übernimmt, in dem es aber keine einzelnen Bauelemente mehr gibt.

Ein Funktionsblock ist ein Stück – oft nur ein Splitter – aus Halbleitermaterial, in dem die entsprechenden Effekte durch chemische oder physikalische Behandlung, nicht aber durch Einsetzen anderer Bauteile erzielt werden. Der Halbleiterkristall ist als Funktionsblock nicht nur Diode, Transistor oder Fotowiderstand, sondern übernimmt die Aufgaben anderer Bauelemente mit.

Wir wissen bereits, daß Halbleitermaterial gleichzeitig mehrere Funktionen ausüben kann: Die Halbleiterdiode war – manchmal erwünscht, manchmal unerwünscht – gleichzeitig ein Kondensator. Sie „verarbeitet“ außerdem nicht nur den hindurchfließenden Strom, sondern auch Lichtstrahlung, die auf sie fiel. Im Fototransistor war die Wirkung eines Fotoelements mit der Verstärkerwirkung des Transistors vereint.



Überlegen wir uns den Aufbau eines einfachen Funktionsblockes! Sehr oft werden in der Elektronik sogenannte Widerstands-Kondensatorglieder benötigt, um beispielsweise gleichgerichteten Wechselstrom zu „glätten“. Im einfachsten Fall besteht ein solches Glied aus einem Widerstand und einem Kondensator.

Ein entsprechend behandeltes Stück Halbleitermaterial kann dieses Glied ersetzen. Durch Fremdstoffe läßt sich die Leitfähigkeit von Halbleitern in weiten Grenzen verändern. Es ist daher nicht allzu schwer, das untere Stück des Halbleiterkristalls so zu dotieren,

daß es gerade den verlangten elektrischen Widerstand aufweist. Bringen wir zwischen unteres und oberes Ende eine dünne, sehr schlecht leitende Schicht, so können wir die Grenzflächen des oberen, gut leitenden Kristallteils und des Widerstandsteils als Beläge eines Kondensators ansehen, dessen Dielektrikum die schlecht leitende Zwischenschicht ist. Sehen wir noch die entsprechenden Anschlüsse vor, so ist das Kondensator-Widerstandsglied fertig.

Auf ähnliche Weise lassen sich Funktionsblöcke mit viel komplizierteren Einzelheiten und Eigenschaften aufbauen. Man erzeugt in dem Halbleitermaterial Zonen, die sich beispielsweise wie Spulen, wie Transistoren oder andere Bauelemente verhalten. Dabei werden in sinnvoller Kombination alle Verfahren genutzt, die wir im Laufe unserer Lektüre kennengelernt haben:

Fremdstoffe in genau bemessener Dosis werden einlegiert und eindiffundiert. Halbleitermaterial wird mit elektrisch geladenen Fremdatomen „beschossen“ oder radioaktiver Strahlung ausgesetzt, dünne Schichten werden weggeätzt, Kerben mit feinsten Elektronenstrahlen in das Material „gefräst“; Anschlüsse werden aufgedampft oder durch fotolithografische Methoden hergestellt.

Die Elektronikfachleute aber müssen gründlich umdenken. Sie arbeiten nicht mehr wie bisher mit Stromkreisen und „Netzwerken“. Sie müssen die Effekte und Erscheinungen der Halbleiter- und Atomphysik zu ihrem Handwerkszeug machen: die Vorgänge an pn-Übergängen, die thermoelektrischen Erscheinungen, den Halleffekt, die lichtelektrischen Wirkungen und viele andere. Sie müssen, wie ein amerikanischer Physiker es bildhaft ausdrückte, „lernen, die in Festkörpern umherschwirrenden Elektronen so zu dressieren, daß diese sich nur noch auf genau festgelegten Straßen und in exakt berechneten Bezirken bewegen“. Es ist nicht übertrieben, zu behaupten, daß der Elektronikingenieur von übermorgen mehr Atom- und Quantenphysiker als Elektrotechniker sein wird. Eine Begründung mehr für die Richtigkeit der im sozialistischen Teil der Welt erhobenen Forderung, allen Menschen eine gute Allgemeinbildung und ein umfassendes, fundiertes Fachwissen zuteil werden zu lassen!

Eine bedeutende Hilfe für die Molekularelektronik wird ein neuartiges Gewinnungsverfahren für Halbleitermaterial sein. Es befindet sich seit drei Jahren in der Erprobung. Beim „Dendritverfahren“ wachsen, wie schon der Name andeutet, die Ausgangsstoffe für Halbleiterbauelemente fortlaufend aus dem Schmelztiegel, und zwar in Form eines schmalen Streifens, der nur so dick wie eine Seite dieses Buches ist. Der Streifen entsteht mit einer Wachstumsgeschwindigkeit von 15 cm/min bis 30 cm/min.

Am wichtigsten aber ist, daß der beim Dendritverfahren entstehende Kristallstreifen von vornherein so „sauber“ ist, daß eine nachträgliche Oberflächenbehandlung wegfallen kann. Das Einbringen bestimmter Zonen oder Schichten wird in Zukunft schon





während des Wachstumsprozesses erfolgen; bereits heute gelingt es, auf diese Weise Folgen von drei Schichten zu erzeugen. Das würde z. B. bedeuten, daß sich Transistoren im wahrsten Sinne des Wortes am laufenden Band herstellen ließen. Das Ziel ist aber noch viel weiter gesteckt: Durch Verfeinern der Dendritmethode will man komplizierte Funktionsblöcke wachsen lassen, so daß etwa ein Streifen aus der Schmelze käme, der aus vielen einzelnen Verstärkern oder gar Funkempfängern bestünde. Wie sehr sich das auf die Produktivität von Elektronikbetrieben auswirken würde, bedarf keiner Erörterung. Daß auch der Preis elektronischer Geräte dadurch erheblich sinken könnte, wäre eine gewiß nicht unangenehme Folge der neuen Verfahren. Schätzungsweise werden sich bei Einführung des Dendritverfahrens die Preise von Transistoren auf ein Viertel vermindern.

### Was kann die Molekularelektronik ?

Die Molekularelektronik steht heute etwa da, wo die Halbleitertechnik um 1950 stand, an einem Anfang, der bereits die ersten Erfolge aufzuweisen hat. Daß diese Erfolge nicht gering sind, sei an einigen Beispielen vorgeführt.

Ein Baustein für Rechenggeräte hat die Abmessungen von 6 mm · 3 mm · 1 mm und ersetzt zwei Transistoren, acht Widerstände und zwei Kondensatoren. Würde man den gleichen Baustein mit Röhren zusammenstellen, so beanspruchte er etwa den Platz einer Kleinbildkamera „Pentä“; als Mikromodulbaustein wäre er immerhin noch so groß wie ein Stück Würfelzucker. Inzwischen wurde von einem Molekularbaustein für den gleichen Zweck berichtet, der nur noch die Größe eines Stecknadelkopfes hat.

Ein Tonfrequenzverstärker, der einen normalen Zimmerlautsprecher versorgt, ist nicht größer als ein Weizenkorn, ein Verstärker für größere Leistungen erreicht die Größe eines Pfennigs.

Oszillatoren, mit denen Wechselströme hoher Frequenz erzeugt werden, bestehen aus einem Dutzend Bauelemente und erfordern etwa vierzig Lötstellen. Ein Funktionsblock gleicher Leistung ist so groß wie eine Erbse und besitzt lediglich zwei Anschlußdrähte.

Die Verkleinerung elektronischer Geräte durch Anwendung der Molekularelektronik ist wahrhaft erstaunlich. Selbst Mikromoduln beanspruchen häufig tausendmal mehr Raum als ein gleichwertiger Funktionsblock, wie sehr deutlich ein Lichtstärkemeßgerät zeigt, das für den Einsatz in Satelliten gedacht ist. Stellen wir die technischen Daten in Stichworten zusammen:

**Mikromodulausführung:** Rauminhalt 15,6 cm<sup>3</sup>, Gewicht 7 p, drei Transistoren, ein Fotoelement, vierzehn sonstige Bauteile, fünfzehn Lötstellen.

**Funktionsblockausführung:** Rauminhalt 0,015 cm<sup>3</sup>, Gewicht 0,02 p, zwei Anschlüsse, keine Lötstellen.

Ein Vorverstärker für Fernsehempfänger mißt nur 3 mm · 6 mm

und wiegt 0,3 p. Es sollen jedoch schon Verstärker existieren, die nur so groß sind wie ein Lagerstein für eine Armbanduhr.

Um die Wirkungsweise und die Möglichkeiten der Molekularelektronik zu demonstrieren, brachte die Westinghouse-Electric-Corporation einen „Waffel-Empfänger“ heraus. Er besteht aus sechs kleinen, waffelähnlichen Siliziumscheiben, die etwa so stark sind wie drei Blatt Schreibmaschinenpapier. Sie ermöglichen es, Sender des Mittelwellenbereichs zu empfangen und in einem angeschlossenen Lautsprecher hörbar zu machen. Er ist übrigens das einzige, was uns an diesem Empfänger bekannt vorkäme. Allen anderen Teilen ist nicht anzusehen, welche Aufgabe sie erfüllen. Die jüngsten Entwicklungen gehen bereits über das Stadium der Demonstration hinaus; denn man arbeitet an einem Kurzwellen-Weitverkehrsempfänger, der mit sämtlichen Bestandteilen kaum größer als eine Streichholzschachtel sein wird.

Bekannte und verbreitete Aufgaben der Elektronik lassen sich durch Funktionsblöcke auf ganz neue Weise lösen. Für elektronische Geräte ist Gleichspannung erforderlich, die meistens durch Gleichrichtung aus dem Netzwechselstrom gewonnen werden muß. Zu einem solchen Gleichrichter gehören ein Transformator, eine Halbleiterdiode und ein Kondensator. Das ist nicht wenig, und dabei haben wir noch einige Bauteile weggelassen!

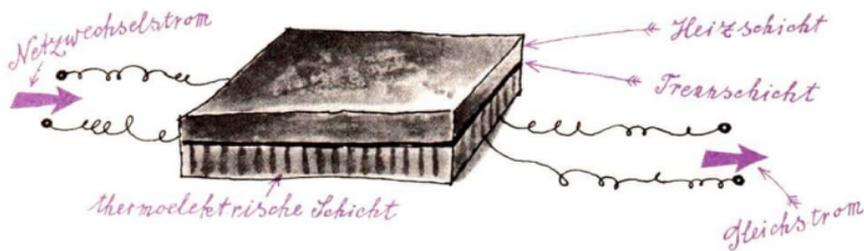
Um so verblüffender ist, daß der dargestellte Funktionsblock, der in Wirklichkeit etwa so groß wie ein Dame-Stein ist, dasselbe leistet. Er besteht aus einem Halbleiterstück mit drei verschiedenen Schichten. Der Netzwechselstrom wird der oberen Schicht zugeführt. Ihre einzige Aufgabe ist es, sich durch den hindurchfließenden Strom zu erwärmen. Die Wärme durchdringt die Trennschicht, die nur zur elektrischen Isolierung zwischen den beiden äußeren Schichten da ist, und erreicht den unteren Teil des Funktionsblockes. Er wurde so bearbeitet, daß er wie eine Thermobatterie wirkt. An ihm kann eine Gleichspannung abgenommen werden. Der Funktionsblock stellt also einen Stromversorgungsteil dar, der weder einen Transformator noch ein anderes bekanntes Bauelement enthält.

Gleichzeitig erfüllt er einen alten Wunsch der Elektrotechniker: Während sich Wechselspannungen und Wechselströme leicht herauf- und herabsetzen lassen, gibt es bisher keinen „Gleichstromtransformator“, der eine einfache und verlustarme Verwandlung

*Kurzwellen-Weitverkehrsempfänger*



*(Originalgröße)*





von Gleichströmen gestattet. Der gezeigte Funktionsblock aber ist gleichzeitig ein Gleichstromtransformator. Es ist nämlich völlig gleichgültig, ob wir der Heizschicht Wechsel- oder Gleichstrom zuführen; Wärme entsteht auf jeden Fall.

Man denkt aber noch an ganz andere Möglichkeiten, z. B. an Funktionsblöcke, die aus einer Sonnenbatterie und einem von ihr gespeisten Kühlelement bestehen, an elektronische Rechenmaschinen im Format eines Rechenschiebers, die ihren Strom durch Umwandlung der Handwärme erhalten, an Kleinstfunkgeräte, die als Knopf angenähert werden, an Radargeräte im Taschenlampenformat, mit denen sich Blinde sicher bewegen können, an Übersetzungsmaschinen für den Hausgebrauch, die nicht größer sind als heutzutage ein Wörterbuch, und an vieles andere.

Bis heute sind fast alle aus Funktionsblöcken aufgebauten Geräte Versuchsmuster. Ehe sie in die Massenfertigung überführt werden können, ist noch ein gerüttelt Maß an Arbeit zu vollbringen. In Forschungsstätten wird man tiefer in die Halbleiterphysik eindringen, in den Laboratorien und Versuchsabteilungen der Betriebe wird man bemüht sein, das, was die Forscher entdeckten und ersannen, möglichst rasch auch technologisch zu meistern, damit die Ergebnisse der Molekularelektronik bald allgemeinen Eingang in die Technik finden können. Man schätzt, daß es zwischen 1965 und 1970 soweit sein wird. Wenige Jahre später könnten die Auswirkungen der Molekularelektronik bereits in vielen Geräten des täglichen Lebens zu spüren sein. Die kürzlich in der Deutschen Demokratischen Republik gegründete „Arbeitsstelle für Molekularelektronik“ wird an den künftigen Entwicklungen beteiligt sein.

### Kein Ende für die Halbleitertechnik

Unser Buch geht dem Ende entgegen. Wir haben uns bemüht, einen Querschnitt dessen zu geben, was uns die Halbleitertechnik gebracht hat. Wir müssen zugeben, daß diese Technik inzwischen zahlreiche weitere Leistungen aufzuweisen hat, die wir nicht berücksichtigen.

Das ist nicht unsere Schuld. Die Technik schreitet heute so rasch fort, daß derjenige, der es unternimmt, sie zu beschreiben, stets nachhinkt. Nicht nur für den an der Technik Interessierten ist das von Nachteil, sondern vor allem für den Techniker und den Forscher selbst: Es ist ihnen so gut wie unmöglich, sich ein lückenloses Bild vom gegenwärtigen Stand eines Fachgebietes und von den Arbeiten der Fachkollegen zu machen. Damit sind wir bei einer der großen Zukunftsaufgaben, die ohne Halbleiter nicht zu lösen wären: Wir müssen das System der technischen Unterrichtung und des Informationsaustausches auf eine ganz neue Grundlage stellen. Das mühsame Aufsuchen von Literaturstellen und Quellen, das Übersetzen fremder Texte, das Zusammenstellen von Informationen muß elektronischen Geräten übertragen werden, die diese

mehr oder weniger mechanischen Arbeiten viel schneller erledigen können als der Mensch und sich weder irren noch ermüden. Was „Elektronenhirne“ heute leisten, grenzt bereits ans Wunderbare. Die konsequente Anwendung der Halbleitertechnik und insbesondere der Molekularelektronik aber wird diese „Wunder“ weit in den Schatten stellen, was die Vielseitigkeit, das „Gedächtnis“, die Größe und auch den Preis solcher Anlagen betrifft.

Weitere, große Aufgaben sind der Halbleitertechnik bereits gestellt: Da wäre beispielsweise die unmittelbare Umwandlung von Kernenergie in Elektrizität. Die Kernkraftwerke von heute sind im wesentlichen verbesserte Wärmekraftwerke. Die Ausnutzung des Brennstoffes ist nach wie vor schlecht – daß er als Uran vorkommt, ändert daran im Prinzip nichts –, die Verluste sind hoch. Kraftwerke, bei denen die Kernenergie unmittelbar in Elektrizität verwandelt wird, gibt es noch nicht. Sogar die „Kernkraft-Taschenlampenbatterie“ fehlt noch. Doch vielleicht werden wir diese bald kaufen können. Man experimentiert bereits eifrig mit Halbleiter-Atom-Batterien. So nutzt man die Sperrschicht einer Diode, um Elektronen zu „sammeln“, die von einem radioaktiven Präparat ausgehen. Eine andere Ausführung einer Miniaturbatterie, die etwa so groß wie ein Pfennigstück ist, beruht auf einer doppelten Energieumwandlung: Ein radioaktives Präparat ist mit einem Stoff gemischt, der bei Bestrahlung aufleuchtet. Das Licht wird von zwei Siliziumfotoelementen in Elektrizität verwandelt. Sie decken das radioaktive Präparat von beiden Seiten ab. Ein Strahlenschutz der Batterie ist, wie berichtet wird, nicht nötig. Sie gibt für mehrere Jahre Strom ab, bei einer Leistung, die für Hörhilfen, drahtlose Mikrophone und andere Kleinstgeräte ausreicht.

Daß zahlreiche Stoffe, unter ihnen Halbleiter, durch Bestrahlen oder unter der Einwirkung elektrischer Kräfte zum Leuchten angeregt werden können, wird gleichfalls eines Tages große Bedeutung erlangen. Diese Art der Lichterzeugung – der Physiker nennt sie Lumineszenz – vollzieht sich ohne die bei unseren gegenwärtigen Lichtquellen so unangenehme, energieverzehrende Wärmeentwicklung. Die Lumineszenzerscheinungen werden uns vielleicht eines Tages das „kalte Licht“ bescheren, nach dem die Technik schon lange sucht.

Kristalle, die ein äußerst intensives Licht ausstrahlen, wenn sie „angeregt“ werden, könnten die drahtlose Nachrichtentechnik revolutionieren. Würde man solches Licht, das wegen seiner Intensität auch in größten Entfernungen wahrnehmbar wäre, zur Nachrichtenübermittlung heranziehen, so wäre die „Frequenznot“, die beim Einsatz von Funkwellen immer fühlbarer wird, auf Jahrzehnte beseitigt. Radargeräte, die mit Lichtwellen statt mit Funkwellen arbeiten, könnten viel genauer „sehen“ und wären trotzdem leichter und kleiner als die Radargeräte von heute.

Die Wechselwirkungen zwischen elektromagnetischen Wellen und den Schwingungen der Atome und Moleküle werden nicht nur ge-



naueste Zeitmessungen ermöglichen, sondern auch den Bau von Verstärkern größter Empfindlichkeit.

Große Aufgaben sind es, die vor den Halbleiterphysikern und Halbleitertechnikern stehen; neue werden hinzukommen und gelöst werden. Solange Menschen die Erde bewohnen, werden sie der Natur Geheimnis um Geheimnis abringen; und in der Welt von morgen und übermorgen werden die Ergebnisse dieses Ringens allen Menschen helfen, das Leben leichter, sicherer und schöner zu gestalten.



*(noch ein Größenvergleich)*

# SACHWÖRTERVERZEICHNIS

## A

Abfrage 167  
Abfragegerät 167  
Aktifon D 151  
aktive Fernmeldesatelliten 180  
Akzeptoren 20  
Antwortsender 166  
Armbanduhr, transistorisierte 154  
Auge, elektrisches 56  
Auge, künstliches 156, 163  
automatische Scharfabstimmung 194

## B

Bardeen 81  
Basis 81  
Bauelementendichte 191  
Baukastensystem 190  
Bausteinsystem 131  
Belichtungsmesser, fotoelektrischer 54  
Berzelius 9  
Bestückung, gemischte 106  
bioelektrische Steuerung 162  
Brandwächter 60  
Brattain 81  
Braun 11  
Brückenschaltung 26, 65

## C

Chronometer 154  
Compactron 100  
Cristodynschaltung 13

## D

Dämmerungsschalter 60  
Datenverarbeitungsanlage 140  
Defektelektron 18

Dehnungsmessstreifentechnik 150  
Dendritverfahren 203  
Detektor 11  
Detektorempfänger 164  
Diamanthermistor 198  
Dielektrikum 193  
Diffusionstransistor 91  
Dolmetscheranlage 119  
Donatoren 20  
dotieren 19  
drahtloses Mikrofon 122, 195  
Drehzahlmesser, transistorisierter 149  
Durchlaßrichtung 34

## E

ECHO 180  
Echolot 152  
Eigenleitung 20  
Einkristall 39  
elektrisches Auge 56  
Elektronen 14  
Elektronengehirn 140, 207  
Elektronenröhre 80  
Elektronik, industrielle 95  
elektronische Rechenmaschine 140  
elektronische Rechentechnik 141  
elektronischer Summer 135  
Emitter 81  
Emitterkreis 81  
Endoradiosonde 158  
Energieversorgung kosmischer Flugkörper 177  
ENIAC 140  
Esakidiode 194

## F

Fehlerortungsgerät 148  
Fernmeldesatelliten, aktive 180

Fernmeldesatelliten, passive 180  
Fernsehen, industrielles 113  
Fernsehkamera, transistorisierte 113  
Fernsprechweitverehrstechnik 138  
Festkörperthyatron 133  
Flächentransistor 81  
Flammenwächter 58  
Fotodiode 57, 68  
fotoelektrischer Belichtungsmesser 54  
fotoelektrischer Steuerkreis 54  
fotoelektrischer Türöffner 61  
Fotoelement 55  
Fotometer, objektives 10  
Fototransistor 58, 197  
Fotowiderstand 53, 68  
Freisprechtelefon 136  
Frequenzgrenze des Transistors 90  
Füllhöhenmessung 63  
Funkalarm-Anlage 127  
Funkführungsanlage 120  
Funktionsblock 202

## G

gedruckte Schaltung 187  
gemischte Bestückung 106  
Gerät, schnurloses 111  
Germanium 16, 36  
Germaniumdetektor 48  
Germaniumgleichrichter 42  
Germaniumkristall 16  
gezogener Transistor 86  
Gleichrichter 32  
Gleichrichterlokomotive 45  
Gleichrichterröhre 33  
Gleichspannungswandlung 106  
Gleichstrom 31  
Gleichstromtransformator 205

## H

Halbleiter 11  
Halbleiterdiamant 198  
Halbleiter-Fernthermometer 22  
Halbleiterkühlelement 173  
Halbleiterkühlschrank 174  
Halbleiter, organische 198  
Halbleiterrechenanlage 141  
Halbleiterschalter 130  
Halbleiterstimulator 162  
Halbleiterthyatron 133  
Halbleiterwiderstand 22  
Hall 199  
Halleffekt 199  
Halleffekt-Kompaß 200  
Hallgenerator 200  
Heißläufersuchgerät 68  
Heißleiter 22  
Hittorf 10  
Hörbrille 156  
Hörbügel 156  
Hörhilfe 155

## I

Ignitron 133  
Impfkristall 39  
Indium-Emitterpille 87  
industrielle Elektronik 95, 128  
Infrarotdetektor 68  
Infrarotstrahlung 68  
intermetallische Verbindungen 198  
Intestinalsender 158  
Ionenröhre 133  
Isolator 15

## K

Kabelsuchgerät 147  
Kabelverstärker 138  
Kadmiumselenid 55  
Kadmiumsulfid-Fotowiderstand 54  
Kapazitätsdiode 194  
Karbonium 198  
Kennungsgeber 167  
Keramikröhren 191  
Kleinrechner 142  
Kleinstfunkgerät, transistorisiert 124

## Kleinst-Sonnenkraftwerk 77

Kofferempfänger 105  
Kollektor 82  
Kollektorkreis 82  
Kollektorpille 87  
Kollisionsschutzgerät 68  
Kondensator 193  
kontaktlose Schalteinheit 139  
Kristalldetektor 12, 48  
Kristallziehvorrichtung 39  
Kühlblock 174  
Kühlgefäß 174  
Kühlmethoden für Gleichrichter 47  
künstliches Auge 156, 163  
künstliches Sprechen 156  
Kupferoxydulgleichrichter 13

## L

Ladebügel 154  
Ladungsträger 20  
Lebensdauer des Transistors 96  
Legierungsfront 87  
Legierungstransistor 86  
Leistungsgrenze des Transistors 90  
Leistungstransistor 92  
Leiter 15  
Leitungsselektoren 15  
Lesegerät 156  
Leuchtboje 73  
Lichtschanke 61, 63, 67  
Loch, positives 18  
Lossew 13

## M

Magen-Darm-Sonde 158  
MANIAC 141  
Mendeleejew 16  
Mesatransistor 195  
Mikromodultechnik 191  
Mikrofon, drahtloses 122, 195  
Miniaturisierung 185  
Miniaturkamera für Fernsehen 113  
Modul 191  
Modultechnik 191  
Molekularelektronik 6, 202  
Multivibrator 146, 156

## N

n-leitendes Germanium 20  
Notfunkanlage 126  
Notrufsender Diana 126  
npn-Kristall 81  
Nuvistor 100

## O

Oberflächeneffekte 97  
organische Halbleiter 198

## P

parametrischer Verstärker 194  
passive Fernmeldesatelliten 180  
Personenrufanlage 117  
Plastetransistor 199  
p-leitendes Germanium 20  
pnp-Kristall 81  
pn-Übergang 33  
positives Loch 18  
Projekt Tinkertoy 191  
Protonen 14  
Prüfsignal 146  
Prüfsignalgeber 145  
Pufferbetrieb 73, 177

## Q

Quarzoszillator 152  
Quarzuhr 153  
Quecksilberdampf-Gleichrichter 33

## R

Randschichttransistor 90  
Rauchgasprüfung 25  
Raumfahrzeug 176  
Raumladung 33  
Raumsonde, unbemannte 179  
Rechenmaschine, elektronische 140  
Rechentchnik, elektronische 141  
Regiekommandoanlage 122  
Relais 23  
Relaisröhre 99  
Rettingsbootsender 166

## S

Satelliten 177  
 Schalteinheit, kontaktlose 139  
 Schalltransistor 130  
 Schaltungen, gedruckte 187  
 Scharfabstimmung, automatische 194  
 schnurlose Geräte 111  
 Schrittmacher 7  
 Schutzatmosphäre 88  
 Schwallöten 189  
 Seebeck 169  
 Selektivruf 118  
 Selen 9  
 Selenfotoelement 70  
 Selengleichrichter 13  
 Sender, sprachgespeicher 168  
 Shockley 81  
 Siemens, W. 10  
 Signalverfolger 146  
 Silizium 37  
 Siliziumdetektor 48  
 Siliziumfotoelement 57  
 Siliziumgleichrichter 42  
 Siliziumkarbid 198  
 Siliziumtransistor 88  
 Smith 10  
 Sonnenauto 75  
 Sonnenbatterie 71, 108, 177  
 Sonnenenergie 69  
 Sonnenenergie-Großkraftwerk 75  
 Sonnenkraftwerk 70, 77  
 Sonnenzelle 71  
 Spacistor 196  
 Spannungsverstärker 83  
 Speisegerät 166  
 Sperrichtung 34  
 Sperrschicht 34  
 Sperrschichtkapazität 193  
 Sperrschichttemperatur 92  
 Sperrspannung, maximale 44  
 Sperrstrom 35  
 Spitzendiode 49  
 Spitzentransistor 85  
 sprachgespeicher Sender 168  
 Sprechen, künstliches 156  
 Steuerkreis, fotoelektrischer 54  
 Steuerung, bioelektrische 162  
 Steuerungsanlage 131  
 Stimulator 161  
 Störstellen 20

Störstellenleitung 20  
 Strahlungsnachweisgerät 151  
 Strombrücke 28  
 Stromdichte 44  
 Stromkreis 15  
 Summer, elektronischer 135  
 Synchronsatellit 182

## T

Taschenempfänger 107  
 Tastkopf 146  
 Tecnetron 196  
 Telefonspule 155  
 TELSTAR 177, 181  
 Temperaturbereich des Transistors 97  
 Temperaturfühler 23  
 Temperaturgrenzen des Gleichrichters 47  
 Thermistor 22, 198  
 Thermobatterie 169  
 Thermoelement 169  
 Thermosäule 169  
 Thyatron 133  
 tiegelfreies Zonenschmelzen 38  
 Tiros-Satelliten 179  
 Tonbandgerät 115  
 Trägerfrequenztechnik 137  
 Transistor 80  
 Transistor-Armbanduhr 154  
 Transistor-Fernsehgerät 112  
 Transistor, Frequenzgrenze des 90  
 Transistor, gezogener 86  
 Transistor-Hörhilfe 155  
 transistorisierter Drehzahlmesser 149  
 transistorisierte Fernsehkamera 113  
 Transistor-Kleinstfunkgerät 124  
 Transistor, Lebensdauer des 96  
 Transistor, Leistungsgrenze des 90  
 Transistor-Megaphon 116  
 Transistor, Temperaturbereich des 97  
 Transistor-Uhren 153  
 Transistorverstärker 84, 114, 146, 197  
 TRANSLOG-Baustein 132, 190  
 Transverter 106, 152

Trinistor 133  
 Trockengleichrichter 43  
 Türöffner, fotoelektrischer 61  
 Tunneliode 194  
 Tunneliodenverstärker 195

## U

ultrarotes Licht 67  
 Ultrarotfilter 67  
 Ultrarot-Lichtschranke 67  
 Umschaltspannung 134  
 unbemannte Raumsonde 179  
 Unterseekabel 137

## V

Verbindungen, intermetallische 198  
 Verkehrsradargerät 150  
 Verstärker, parametrischer 194  
 Videotelefon 139  
 Vierschichtdiode 130

## W

Waldbrandmeldeanlage 73  
 Wechselspannungserzeuger 85  
 Wechselstrom 31  
 Weltraumstation 177  
 Wettersatelliten 179  
 Widerstandsthermometer 21  
 Winkler 16  
 Wirkungsgrad des Gleichrichters 44

## Z

Zenerdiode 51  
 Zenereffekt 50  
 Zielsuchkopf 68  
 Ziolkowski 177  
 Zonenschmelzapparat 38  
 Zonenschmelzen 37  
 Zonenschmelzen, tiegelfreies 38  
 ZRA 1 141  
 Zwischenschicht 34  
 Zwischenverstärker in Kabeln 138

# INHALT

## WAS SIND HALBLEITER?

*... auf Seite...*

Radios aus dem Schmelztiegel? . . . . .	5
Die Mondgöttin und der Kristalldetektor . . . . .	9
Ein Grundstoff gibt Rätsel auf . . . . .	9
Kristallsplitter helfen der Funktechnik . . . . .	11
Halbleiter leiten anders . . . . .	14
Elektronen auf Wanderschaft . . . . .	14
Was im Germanium geschieht . . . . .	16
Halbleiterphysik an der Tankstelle . . . . .	18
„Verunreinigungen“ nach Wunsch . . . . .	19
Thermometer, Temperaturen, Thermistoren . . . . .	21
Halbleiter als Temperaturfühler . . . . .	21
Temperaturen ferngemessen . . . . .	22
Ein Thermistor heizt sich selbst . . . . .	24
Halbleiter schützen und schalten . . . . .	27



## FÜR WECHSELSTROM VERBOTEN!

Ventil für Elektrizität gesucht! . . . . .	31
Gleichstrom – Wechselstrom: beide wichtig . . . . .	31
Wo p und n zusammenstoßen . . . . .	33
Wie Halbleitergleichrichter entstehen . . . . .	35
Langer Weg zum Ausgangsstoff . . . . .	35
Einmal heiß – einmal kalt . . . . .	37
Kristalle werden gezogen . . . . .	39
Mit Lupe und Pinzette . . . . .	41
Was Halbleitergleichrichter leisten . . . . .	42
Die Vorläufer sind überrundet . . . . .	42
Kleiner, leichter, sparsamer . . . . .	44
Leistungsfähigkeit groß geschrieben . . . . .	46
Alles schon einmal dagewesen? . . . . .	48
Alter Bekannter im neuen Rock . . . . .	48
Diode – auf den Kopf gestellt . . . . .	50

## AUS LICHT WIRD STROM

Löcher, Licht und Elektronen . . . . .	53
Widerstand zwischen hell und dunkel . . . . .	53
Nur ein Belichtungsmesser . . . . .	54
Diode – Widerstand und Element . . . . .	57

Der Lichtstrahl steuert . . . . .	58
Flammen unter Kontrolle . . . . .	58
Der stumme Wächter . . . . .	60
Fotoelemente sorgen für Qualität . . . . .	62
Intermezzo in Infrarot . . . . .	66
Kraftwerk im Sonnenlicht . . . . .	69
40 m Eis im Jahr . . . . .	69
Noch sind sie teuer . . . . .	72
Sonnenbatterien statt Turbogenerator? . . . . .	75

## „UNTERNEHMEN TRANSISTOR“

Was im Transistor vorgeht . . . . .	79
Kleine Spannungen vergrößert . . . . .	79
Drei Schichten – drei Anschlüsse . . . . .	81
Zwischen Emitter und Kollektor . . . . .	82
Wie sie entstehen, was sie leisten . . . . .	85
Gezogen . . . . .	85
... legiert . . . . .	86
Höhere Frequenzen . . . . .	89
... größere Leistung . . . . .	92
Transistor? Röhre? . . . . .	93
Viele Vorzüge . . . . .	93
... aber auch Mängel . . . . .	97
Die Röhre wehrt sich . . . . .	99
Unser Weg . . . . .	101

## HALBLEITER IN AKTION

Hinter Lautsprecher und Bildschirm . . . . .	105
Die Kleinen . . . . .	105
Die Kleinsten . . . . .	107
Steckdose nicht gefragt . . . . .	109
Halbleiter beim Fernsehen . . . . .	112
Allerlei von Verstärkern . . . . .	114
Es gibt nicht nur den Rundfunk . . . . .	116
Rufen Sie bitte die Zentrale an! . . . . .	116
Dolmetscher und Fremdenführer . . . . .	119
Mikrophone, Souffleure, Regisseure . . . . .	121
Transistoren für die Schwarze Pumpe . . . . .	123
Die verlängerte Stimme . . . . .	125
Maschinen, Schalter, Motoren . . . . .	128
Elektronik zwischen gestern und morgen . . . . .	128
Schalter ohne Funken . . . . .	129
Die Stromstärke steigt . . . . .	132
Im Labyrinth der Verbindungen . . . . .	135
Telefonieren wir einmal! . . . . .	135
Hallo, Fernamt! . . . . .	136
Adam Ries – elektronisch . . . . .	140

## HALBLEITER KÖNNEN MEHR

Halbleiter messen alles . . . . .	145
Wo steckt der Fehler? . . . . .	145
Kabel gesucht! . . . . .	147
Kontrolle ist besser . . . . .	148
Blitze – Streifen – Strahlen . . . . .	150
Auf die Sekunde kommt es an . . . . .	152
Es geht um die Gesundheit . . . . .	154
Hören und Sehen . . . . .	154
Funkspruch aus dem Magen . . . . .	157
In stationärer Behandlung . . . . .	159
Vom Schrittmacher zum künstlichen Auge . . . . .	161
Strom aus dem Äther . . . . .	163
Aufregung um eine Laubenkolonie . . . . .	163
Strom – beim Sender geborgt . . . . .	164
Sender antworten von selbst . . . . .	166
Die Stimme als Kraftwerk . . . . .	168
Halbleiter zwischen warm und kalt . . . . .	169
Die Lötstelle als Spannungsquelle . . . . .	169
Der stumme Generator . . . . .	171
Kühlschrank in der Aktentasche . . . . .	172
Forschungsauftrag Weltraum . . . . .	175
Die Sterne rücken näher . . . . .	175
Noch einmal: Sonnenbatterien . . . . .	177
Die Raumfahrt hilft der Erde . . . . .	178
Fernamt im Weltraum . . . . .	180
Fernsehsender Erdsatellit . . . . .	182

## NEUE WEGE – NEUE AUFGABEN

Klein, kleiner, noch kleiner . . . . .	185
Neue Bauelemente . . . . .	185
Neue Technologie . . . . .	187
Baustein auf Baustein . . . . .	190
Neue Bauelemente – andere Materialien . . . . .	193
Noch einmal die Diode . . . . .	193
MESA, TECNETRON und andere . . . . .	195
Es muß nicht immer Germanium sein . . . . .	197
Halbleiter als Kompaß . . . . .	199
Weites Feld für neue Technik . . . . .	201
Was ist Molekularelektronik? . . . . .	201
Was kann die Molekularelektronik? . . . . .	204
Kein Ende für die Halbleitertechnik . . . . .	206

## SACHWÖRTERVERZEICHNIS . . . . . 209

## **Bildquellen**

Forschungsinstitut Manfred von Ardenne, Dresden: 1; Deutsche Lufthansa, Berlin: 1; Institut für Halbleitertechnik, Teltow: 2; VEB Funkwerk Kölleda: 3; VEB Elektro-Apparate-Werke Berlin-Treptow: 2; VEB Vakutronik Dresden: 1; VEB Keramische Werke, Hermsdorf: 1; J. Bagrjanski, Moskau: 3; Foto-Brüggemann, Leipzig: 2; Karl Deutscher, Berlin: 1; Foto-Ilop, Leipzig: 1; Gerhard Kiesling, Berlin: 1; Martin Lücke, Leipzig: 17; Wilfried Swoboda, Berlin: 1; Foto-Römer, Karl-Marx-Stadt: 1; Wolfgang Schröter, Leipzig: 1; Foto-Zimmer, Leipzig: 2; Zentralbild, Berlin: 1; Archiv des Verlages: 1.

1. Auflage 1.–13. Tausend. Alle Rechte vorbehalten

Copyright 1963 by Urania-Verlag Leipzig/Jena/Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur

VLN 212–475/31/63 · 20K 1/20K 5

Lektor: Ewald Oetzel

Illustrationen, Einband und Schutzumschlag: Heinz Bormann

Satz: VEB Graphische Werkstätten Leipzig

Lithographie, Druck und Buchbinderei: Karl-Marx-Werk, Pöfnick

Printed in the German Democratic Republic