

## Mikroelektronik - die Elektronik der Zukunft

Dipl.-Ing. Eike Barthels

Das Wort *Mikroelektronik* ist beinahe ein Modewort geworden und hat über die Fachpresse hinaus Eingang in die Tagespresse gefunden. Immer gilt es als Inbegriff von Kleinheit und technischem Fortschritt. Doch auch dem Eingeweihten fällt es oft schwer, eine hieb- und stichfeste Definition dieses Wortes zu geben, zu vielschichtig sind die damit zusammenhängenden Probleme, zu verschieden die Erscheinungsformen der als Mikroelektronik bezeichneten Bauelemente. In Fachkreisen ist man sich einig, daß *Mikroelektronik* besser *integrierte Elektronik* heißen sollte. Denn man versteht darunter, daß möglichst viele aktive (Transistoren) und passive (Widerstände, Kondensatoren, Induktivitäten u.a.) Bauelemente zu einem einzigen Funktionselement zusammengefaßt - *integriert* - werden, das bessere Eigenschaften hat als die bloße Zusammenschaltung üblicher, noch so guter und kleiner Bauelemente.

Doch bleiben wir bei diesem eingebürgerten Begriff und fragen lieber, warum Mikroelektronik?

Um diese Frage zu beantworten, ist es nötig, die Forderungen der einzelnen Interessenten an die Mikroelektronik zu betrachten.

Für die Raumfahrt steht die Masse bzw. das Volumen an erster Stelle, sie hat aus diesem Grund die Miniaturisierung besonders gefördert, kostet doch die „Fahrkarte“ für ein Gramm Nutzlast auf einer Satellitenbahn etwa vierzig Dollar, für eine interplanetare Bahn sogar das 10fache. An zweiter Stelle der Forderungen steht in der Raumfahrt die Zuverlässigkeit, denn zu einem defekten Satelliten kann man keinen Monteur schicken. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der geringe Leistungsbedarf von Mikroelektronik-Schaltkreisen.

Ähnliche Probleme gibt es in der kommerziellen Elektronik, vor allem bei den modernen Elektronenrechnern. Hier steht wegen der großen Bauelementezahl die Forderung nach absoluter Zuverlässigkeit im Vordergrund. In einem Rechner sind heute bis zu 20 000 Transistoren enthalten. Fällt durchschnittlich von 10 Millionen Transistoren einer je Stunde aus (man spricht von einer Ausfallrate von  $10^{-7}/h$ , so bedeutet das: Der Rechner ist durchschnittlich alle 500 Stunden gestört. Noch



*Bild 1*

*In ein TO-5-Gehäuse eingebauter Halbleiterschaltkreis (Rechteck in Bildmitte) in 6facher Vergrößerung, unteres Bild natürliche Größe, außen um den binären Schaltkreis herumgelegte Einzelbauelemente (Transistoren, Dioden, Widerstände) einer konventionellen Schaltung gleicher Art  
(„Funktechnik“, H. 14/1965)*

anfälliger sind die anderen Bauelemente und die Verbindungsstellen, wie Löt- und Steckverbindungen. In solchem Fall bietet die Mikroelektronik bedeutende Vorteile gegenüber den bisher bekannten Techniken, da ganze Schaltungen, einschließlich der erforderlichen Verbindungen, als einziges Funktionselement unter definierten und besonders sauberen Bedingungen hergestellt werden. Man rechnet damit, daß ein Mikrobau-element mit einer Vielzahl von Elementen die gleiche hohe Zuverlässigkeit hat wie ein einzelner Transistor. Der Preis bildet bei einem Rechner wegen der großen Anzahl der erforderlichen Mikroelektronik-Bauelemente einen wesentlichen Faktor. Weniger wichtig, jedoch keinesfalls unwesentlich, ist Einsparung an Volumen und Leistung. Der Leistungsbedarf spielt speziell bei mobilen Rechenanlagen, z. B. in Flugzeugen, eine große Rolle. So konnte die Betriebsleistung eines amerikanischen Entfernungsmess- und Rechengeräts von 5 W in Subminiaturröhrenauführung über 1 W in Transistorausführung auf 60 mW beim Aufbau aus Mikroschaltkreisen verringert werden.

In der Konsumgüterelektronik (darunter versteht man vor allem Rundfunk- und Fernsehgeräte) spielt der Preis eine dominierende Rolle, die Volumen- und Leistungseinsparung ist von untergeordneter Bedeutung. Die Forderungen an die Zuverlässigkeit sind wegen der gegenüber anderen Anwendungsfällen wesentlich geringeren Bauelementezahl nicht so kritisch. Der immer noch relativ hohe Preis der Mikroelementeschaltkreise hat die Hersteller von Rundfunk- und Fernsehgeräten bisher von ihrem Einsatz abgehalten. Es ist aber nur eine Frage der Zeit, bis hier eine Wende

eintritt. Man nimmt an, daß ab 1970 die Preise für die Mikroelektronik so weit gesunken sind, daß ihr Einsatz in Konsumgütern rentabel wird.

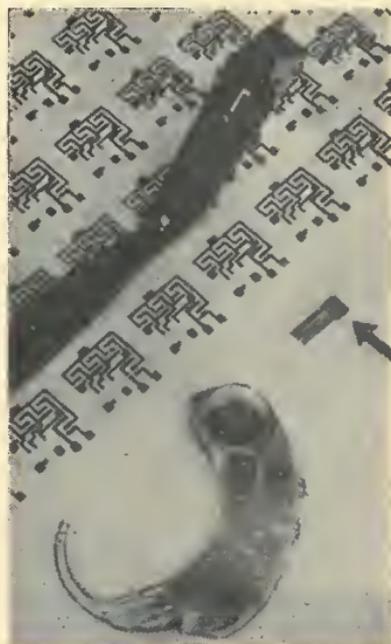
## Herstellungstechnologien

Es haben sich drei Herstellungstechnologien herausgebildet, die den Anspruch auf den Namen *Mikroelektronik* erheben können. Man unterscheidet die *Mikromodultechnik*, die *Dünnschichttechnik* und die *Festkörper- oder Halbleiterblocktechnik*. Zwischen den beiden letzten Techniken gibt es Kombinationen, die als Halbleiterhybridtechnik und als Dünnschichthybridtechnik bezeichnet werden.

### Mikromodultechnik

Bei der Mikromodultechnik bringt man Leiterzüge mit Hilfe von Siebdruckverfahren (Dickfilmen) auf Keramikplättchen (Moduln) auf und lötet konventionelle, aber spezialisierte sowie miniaturisierte Bauelemente ein. Diese Moduln werden übereinandergestapelt, durch Steigdrähte verbunden und mit Kunstharz vergossen. Das Verfahren ist schon länger

*Bild 2  
Halbleiterschaltkreis (s. Pfeil)  
etwa in Originalgröße zur Verwendung  
im Bügel einer Hörbrille  
(oben im Bild)  
oder in einem Hinterohrhörgerät  
(durchsichtiges Modell rechts unten);  
im Hintergrund eine der für die Her-  
stellung des Schaltkreises benötigten  
Aufdampfmasken in etwa 80facher  
Vergrößerung  
(„Funktechnik“, H. 14/1965)*



bekannt; es bildete den Anfang der Miniaturisierung, eine Integration der Bauelemente im eigentlichen Sinne wird jedoch hierbei noch nicht erreicht. Die mögliche Packungsdichte beträgt etwa 3000 Bauelemente/dm<sup>3</sup>.

## Dünnschichttechnik

Auf ein dünnes Plättchen aus Isoliermaterial (Glas), das Substrat, bringt man nacheinander und in entsprechender Reihenfolge dünne Schichten aus leitendem und nichtleitendem Material auf. Aus den leitenden Materialien werden die Leitungszüge und die Kondensatorbeläge, aus dem gleichen Material, aber wesentlich dünner, die Widerstände gebildet, aus den nichtleitenden Materialien die Dielektrika der Kondensatoren. Die Herstellung von aktiven Bauelementen aus halbleitenden Schichten ist zwar möglich, jedoch sind bisher noch keine befriedigenden Ergebnisse erzielt worden.

Die Herstellung von Dünnschichtschaltkreisen gelang erst, als man gelernt hatte, die technologisch äußerst schwierigen Probleme der Maskenaufdampftechnik zu beherrschen. Die Bruchteile von Millimetern breiten Leitungszüge und Bauelemente werden durch Abdecken der Substratplättchen mit einer Maske und durch anschließendes Aufdampfen von metallischen und isolierenden Schichten in einer Hochvakuumapparatur hergestellt.

Die mit Hilfe der Dünnschichttechnik erreichbare Bauelementedichte liegt bei 30 000/dm<sup>3</sup>.

## Halbleiterblocktechnik

Die Halbleiterblocktechnik lehnt sich stark an die von der Transistorherstellung bekannte Planartechnik an. Hier werden aus Siliziumhalbleiterblöcken kleinster Abmessungen, die mit Siliziumdioxid abgedeckt sind, mit Hilfe von Masken Öffnungen geätzt und in diese Öffnungen unter Hochvakuum Dotierungsmaterialien aus der Gasphase eindiffundiert. Phosphor verleiht dem Silizium n-leitenden und Bor p-leitenden Charakter. Noch während der Diffusion schließt sich das geätzte Fenster wieder mit Siliziumoxid und schützt auf diese Weise den entstandenen pn-Übergang. Durch wechselndes Eindiffundieren von p- oder n-Leitung erzeugenden Materialien kann man sowohl passive als auch aktive Bauelemente, einschließlich der Verbindung zwischen den Bauelementen, durch Abdeckung mit entsprechenden Masken herstellen. Sämtliche im Halbleiterblock enthaltenen Bauelemente sind nach der Fertigstellung der *integrierten Schaltung* durch eine Schicht aus Siliziumoxid geschützt und damit genauso zuverlässig wie ein nach der gleichen Technologie hergestellter Planartransistor. Die Bauelementedichte beträgt 30 000 bis 100 000/dm<sup>3</sup>.

## Hybridtechniken

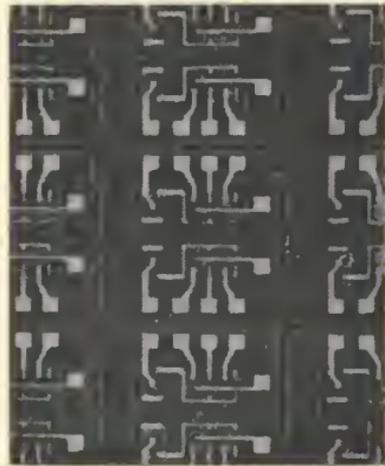
Die Eigenschaften der Dünnschichttechnik und der Halbleiterblocktechnik lassen sich miteinander kombinieren. Man kann auf diese Weise die guten Eigenschaften der aktiven Elemente der Halbleiterblocktechnik in sinnvoller Weise mit den guten Eigenschaften der passiven Bauelemente der Dünnschichttechnik verbinden.

### Dünnschichthybridtechnik

Die passiven Bauelemente werden, wie bei der Dünnschichttechnik beschrieben, auf einem Trägerplättchen aufgedampft. Anschließend an die Herstellung der aus passiven Bauelementen bestehenden Schaltung lötet man die separat in Planartechnik hergestellten aktiven Bauelemente als kleine Scheibchen (Chips) in die Dünnschichtschaltung ein.

### Halbleiterblockhybridtechnik

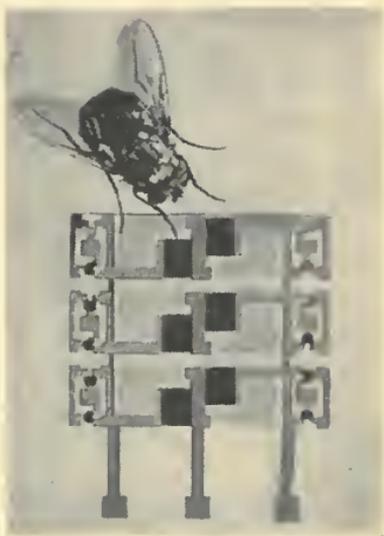
Bei der Halbleiterhybridtechnik werden die Transistoren und Dioden wie bei der Halbleiterblocktechnik durch Diffusion in einem Halbleiterblock hergestellt. Anschließend wird die Oberfläche des Blockes bis auf die Anschlüsse der eindiffundierten Bauelemente passiviert, d.h. mit einer isolierenden  $\text{SiO}_2$ -Schicht versehen. Auf diese Isolierschicht dampft man nun die passiven Bauelemente (Kondensatoren und Widerstände) in Dünnschichttechnik auf.



*Bild 3*

*Beispiel für einen experimentellen  
Festkörperschaltkreis.*

*Doppelanordnung von jeweils 2 Transistoren, die Kollektor und Emitter gemeinsam haben, sowie von jeweils 2 Widerständen mit Mittelanzapfung  
(„Funktechnik“, H. 17/1964)*



*Bild 4*  
*Dünnsfilmschaltkreise von SEL*  
*mit eingelöteten Transistorchips*  
*im Größenvergleich mit einer Fliege*  
*(„Funktechnik“, H. 13/1965)*

## Realisierung sowie Eigenschaften von Bauelementen

Die neue Technik der Mikroelektronik bringt neben den schon erläuterten Verbesserungen auch eine ganze Reihe von Problemen mit sich, da die in Dünnsfilm- oder Halbleiterblocktechnik hergestellten Bauelemente sowohl in ihren Eigenschaften als auch in ihren Wertebereichen zum Teil erheblich von den bisher bekannten Widerständen, Kondensatoren, Induktivitäten und Transistoren abweichen. Diese Tatsache zwingt die Entwickler von integrierten Schaltkreisen, Wege zu gehen, die vom Althergebrachten häufig weit entfernt sind.

### Widerstände

Widerstände werden in der Dünnsilmtechnik durch Aufdampfen von dünnen Metallfilmen, z. B. Tantal, NiCr oder Zinnoxid, hergestellt. Die Schichtdicke liegt zwischen 10 und 200 nm, es lassen sich Flächenwiderstände von 100  $\Omega$  bis 3 k $\Omega$  je cm<sup>2</sup> erreichen. Die Filmbreiten sind mit Hilfe der Maskentechnik sehr gut beherrschbar, so daß die Herstellungsgenauigkeit für einen Dünnsilmwiderstand unter 1 Prozent liegt. Der Wertebereich liegt zwischen 10  $\Omega$  und 10 M $\Omega$ . Da die Widerstände aus dünnen Metallfilmen bestehen, haben sie eine sehr gute Konstanz und einen geringen Temperaturbeiwert.

Wesentlich schlechter sind die Eigenschaften von Halbleiterblockwider-

ständen. Um zusätzliche Arbeitsgänge zu vermeiden, bildet man die Widerstände bei der Diffusion der Basis- und Emitterschichten der Transistoren; ihre Eigenschaften werden daher von der Transistorstruktur bestimmt. Der herstellbare Widerstandsbereich liegt zwischen  $50 \Omega$  und  $50 \text{ k}\Omega$ , die Herstellungstoleranz ist größer als  $\pm 20$  Prozent, der Temperaturbeiwert liegt mit etwa 0,1 Prozent/grd sehr hoch.

## Kondensatoren

Ähnlich wie bei den Widerständen liegen die Verhältnisse bei den Kondensatoren. Kondensatoren werden in Dünnschichttechnik als Flächenkondensatoren durch schichtweises Aufdampfen von leitenden und isolierenden Schichten erzeugt. Als Dielektrika dient Tantal- oder Siliziumoxid. Die Elektroden werden durch Aluminium-, Gold- oder Tantal-schichten gebildet. Der Wertebereich von Dünnschichtkondensatoren liegt zwischen  $10 \text{ pF}$  und  $25 \text{ nF}$ , die Herstellungstoleranz beträgt  $\pm 0,5$  Prozent, der Verlustwinkel  $\tan \delta$  variiert zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-1}$ . Die Halbleiterblockkondensatoren stellt man ähnlich wie die Widerstände während der gleichen Arbeitsgänge her, bei denen auch die Transistoren entstehen. Die Kondensatoren werden durch nebeneinander- oder übereinanderliegende pn-Übergänge gebildet und sind entsprechend verlustbehaftet. Die maximal erreichbare Kapazität beträgt etwa  $500 \text{ pF}$ , die Toleranz  $\pm 20$  Prozent, der Verlustwinkel liegt zwischen  $10^{-2}$  und  $10^{-1}$ . Aus diesen Gründen ist man in der Halbleiterblocktechnik gezwungen, möglichst auf Kondensatoren zu verzichten. Logische Schaltungen arbeiten in Gleichstromkopplung, ein eventuell erforderlicher Emitter-Überbrückungskondensator kann durch einen als Emitterfolger arbeitenden Transistor gebildet werden; ein Koppelkondensator wird mitunter durch einen Feldeffekttransistor ersetzt.

## Induktivitäten

Induktivitäten lassen sich in der Halbleiterblocktechnik überhaupt nicht, in der Dünnschichttechnik nur in sehr beschränktem Umfang realisieren. In der Dünnschichttechnik stellt man kleine Induktivitäten durch Aufdampfen spiralförmiger Leiterzüge auf unmagnetischer oder Ferritunterlage her. Siebdrosseln lassen sich durch Feldeffekttransistoren nachbilden, die einen hohen Wechselstromwiderstand und eine kleine Gleichstromverlustleistung haben. Selektive Verstärker im NF- und HF-Gebiet bildet man ohne Induktivitäten mit Rückkopplungssealtungen über RC-Netzwerke nach. Die Schaltungen ähneln den als *Notch*-Filter oder als T-Netzwerke bekannten Siebmitteln für HF und NF.

Die Abstimmung solcher RC-Netzwerke in der Halbleiterblocktechnik geschieht durch Änderung der Diffusionskapazität über eine regelbare Vorspannung.

## Transistoren und Dioden

Sprechen die genannten Tatsachen zugunsten der Dünnschichttechnik, so liegen die Verhältnisse bei den aktiven Bauelementen in der Halbleiterblocktechnik günstiger. Denn es ist bis jetzt noch nicht gelungen, in der Dünnschichttechnik in jeder Hinsicht befriedigende Transistoren herzustellen. Die Transistoren in der Halbleiterblocktechnik dagegen verfügen über die von der Planartechnik her bekannten guten Eigenschaften, wie hohe Grenzfrequenz, hohe Verstärkung, geringe Kapazitäten und hohe Durchbruchspannung. Aus diesen Gründen wird die Dünnschichttechnik in den meisten Fällen in ihrer Abart als Dünnschicht-Hybridtechnik mit eingelöteten Planartransistoren angewendet.

## Schaltungstechnik

Beim Einsatz der Mikroelektronik-Bauelemente muß man die unterschiedlichen Forderungen der Digital- und der Analogtechnik beachten. Die Halbleiterblocktechnik wird vor allem in den großen Digitalrechnern eingesetzt. Hier kommt es weniger auf konstante Verstärkung oder konstante HF-Durchlaßkurven an als vielmehr auf gutes Schaltverhalten und große Bauelementedichte. Als besonders geeignet hat sich eine Schaltungstechnik erwiesen, die als *DCTL* (*gleichstromgekoppelte Transistorlogik*) bezeichnet wird. Bei ihr überwiegen die Transistoren; Widerstände und Dioden werden nur in geringem Umfang verwendet; Kondensatoren fehlen ganz.

In der Analogtechnik wird man in der näheren Zukunft im wesentlichen

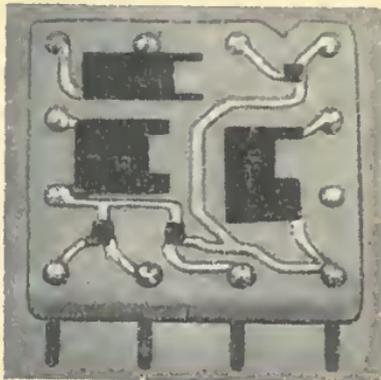


Bild 5  
Schaltung nach dem SLT-System  
mit 3 Widerständen und 3 Halbleitern  
(„Nachrichtentechnik“, H. 8/1965)

Dünnschicht- und Dünnschichtbauelemente einsetzen, da es bei ihr auf gute und konstante Eigenschaften der passiven Bauelemente ankommt. In beiden Bereichen ist man bemüht, durch eine sinnvolle Normung und die Herstellung universell verwendbarer Schaltkreise einen möglichst ökonomischen Einsatz der Mikroelektronik zu erreichen.

## Entwicklungen in der DDR

In der DDR wurde im VEB Keramische Werke Hermsdorf im Jahre 1960 ein Programm *Komplexmikroelektronik* in Angriff genommen. Im Rahmen dieses Programms werden schrittweise verbesserte Bausteine geschaffen, die die Einführung der Mikroelektronik in der DDR gestatten. Das Programm *Komplexmikroelektronik* umfaßt folgende Stufen:

### *KME 1*

Keramische Plättchen mit den Abmessungen 10 mm × 15 mm werden durch Siebdruck mit Leiterbahnen, Widerstandsschichten und Folienkondensatoren versehen, danach setzt man Flachtransistoren und Miniaturdioden ein. Miniaturschalenkerne bilden die Induktivitäten. Die Plättchen werden übereinandergestapelt und durch Steigdrähte miteinander verbunden. Diese Technik entspricht etwa der Mikromodultechnik. Sie wurde inzwischen durch die Stufe *KME 2* abgelöst.

### *KME 2*

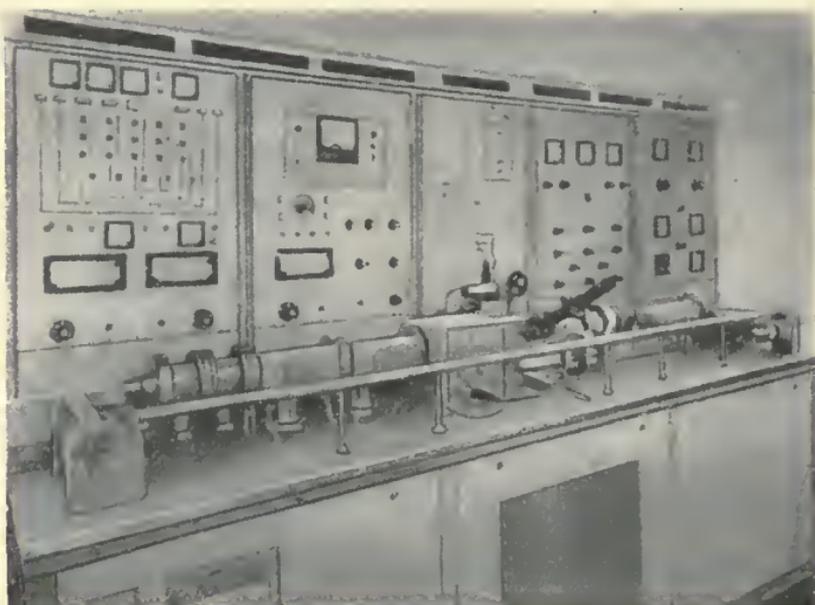
1965 lief das Programm *KME 2* an. Gegenüber *KME 1* wurde durch eine verbesserte Herstellungstechnologie eine größere Bauelementedichte bei gleichen Abmessungen erreicht. Die Widerstände werden in Dünnschichttechnik mit Hochvakuumbedampfungsanlagen hergestellt und danach mit Elektronenstrahlgeräten abgeglichen.

### *KME 3*

In der Stufe *KME 3* werden integrierte Schaltungen nach der Dünnschicht- hybridtechnik hergestellt. Die Abmessungen der Plättchen betragen entweder 10 mm × 15 mm oder 20 mm × 30 mm. Zusätzlich zu *KME 2* sind Hochvakuumbedampfungsanlagen zur Herstellung von Dünnschichtkondensatoren vorgesehen. Die Bestückungsaggregate für das Einsetzen der aktiven Bauelemente werden verbessert. Gegenüber *KME 2* steigt die Produktion ohne Änderung der Anlagen auf das 6fache.

### *KME 4*

In der Stufe *KME 4* sollen die bisher separat eingesetzten Diffusionshalbleiter durch aktive Dünnschichtbauelemente ersetzt werden. Man ist dabei, das System besonders für höchste Frequenzen weiterzuentwickeln.



*Bild 6 Dünnschichtbedampfungsanlage im VEB Keramische Werke Hermsdorf –  
Entwicklung Institut Manfred von Ardenne  
(„Nachrichtentechnik“, H. 8/1965)*

### *KME 5*

Die Stufe *KME 5* stellt eine Entwicklungsvariante dar, die aus *KME 3* hervorgehen wird. Statt der bisher eingesetzten aktiven Bauelemente sollen ganze Festkörperschaltkreise in die Dünnschichtschaltung eingelötet werden. Die Kombination beider Verfahren ist vor allem für kleine Serien vorteilhaft.

Das vorliegende Programm der *Komplezmikroelektronik* ermöglicht eine kontinuierliche Weiterentwicklung unter uneingeschränkter Wiederverwendung der technologischen Hilfsmittel von Stufe zu Stufe sowie gleichzeitig ein flexibles Fertigungssystem für verschiedene Varianten von Mikroelektronik-Schaltkreisen.

## Literatur

Lennartz, H., Vom Epitaxial-Planar-Transistor zum Festkörperschaltkreis, „Funktechnik“, H. 13/1965, S. 464; Der Trend zur Mikroelektronik, „Funktechnik“, H. 14/1964, S. 507; Gesichtspunkte für die Anwendung diskreter Halbleiter-Bauelemente und -Baugruppen, „Funktechnik“, H. 17/1964, S. 612; Integrierte Elektronik im Bereich der elektronischen Konsumgüter, „Funktechnik“, H. 12/1965, S. 465.

Arnous, H., Anwendung der Mikroelektronik bei der Geräteentwicklung, „Funktechnik“, H. 14/1965, S. 542.

Falter, M., Mikroelektronik, ein neuer Weg in der Schaltungstechnik, „Nachrichtentechnik“, Jg. 15, H. 8/1965, S. 282.

Krahl, K., u. a., Mikroelektronik auf der Basis der Dünnschichttechnik (Mitteilung aus dem VEB Keramische Werke Hermsdorf/Thür.), „Nachrichtentechnik“, Jg. 15, H. 8/1965, S. 287.

### ... kann ein Glas Tee einen PKW hochheben und anderes

(aus „Unterhaltsame Elektronik“)

Ein Rundfunkempfänger entnimmt dem Stromnetz etwa 70 W. Vergleicht man diese Leistung mit gebräuchlichen Elektrogeräten — Heizplatten, Kaffeemaschinen, Bügeleisen, Kühlschränken —, so ist sie sehr gering. Lediglich kleine Elektronenröhren und Miniaturlötkolben verbrauchen weniger Energie.

Reicht nun die Kraft eines Menschen aus, einen Rundfunkempfänger mit Strom zu versorgen?

Man hat festgestellt, daß der Mensch bei verhältnismäßig lang andauernder Arbeit eine Leistung von etwa 1/10 PS aufbringt. 1 PS entspricht in elektrische Einheiten umgerechnet 736 W. Daraus folgt, daß ein Mensch unter normalen Bedingungen eine Leistung von etwa 75 W, d. h. die Energie aufbringen kann, die ein Rundfunkgerät verbraucht.

