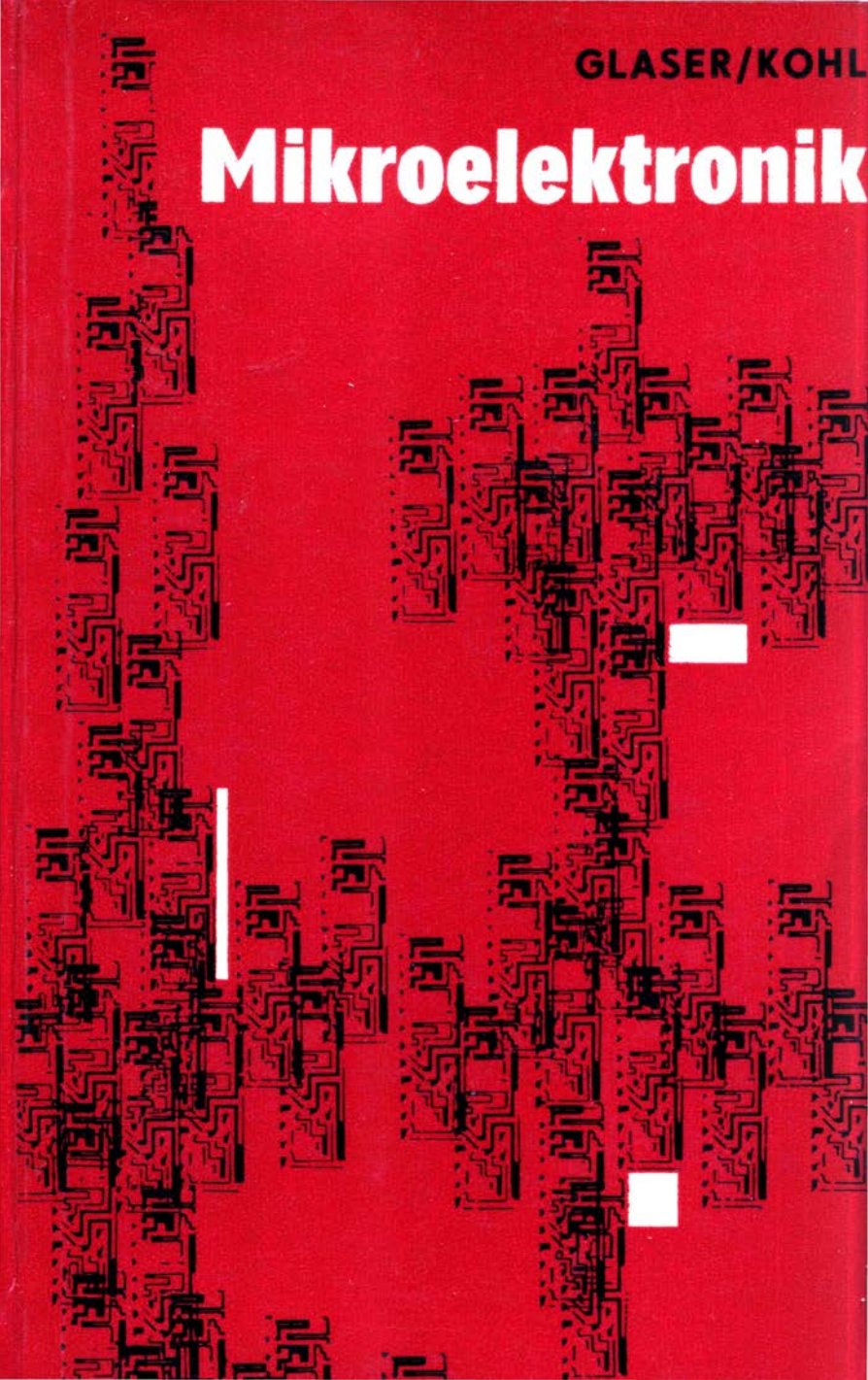
GLASER/KOHL

Mikroelektronik



POLYTECHNISCHE BIBLIOTHEK

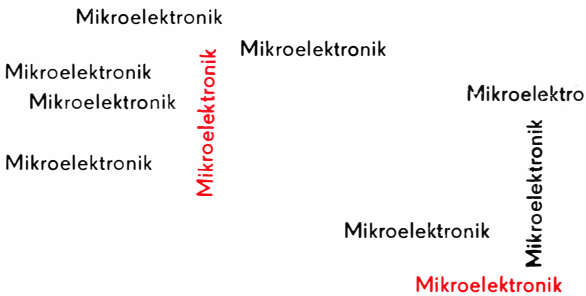


Herausgeber »Urania«
Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse

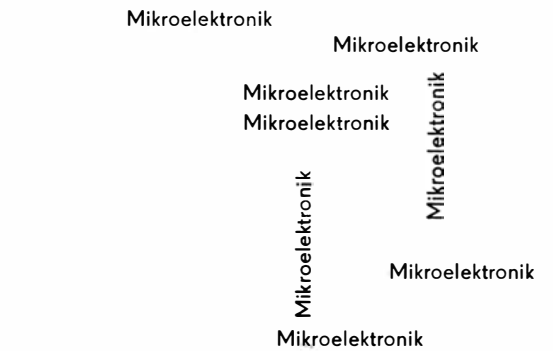
DR.-ING. HABIL. WOLFGANG GLASER • ING. GERHARD KOHL

3., neubearbeitete Auflage mit 131 Bildern und 19 Tabellen

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG



Mikroelektronik





Copyright by
VEB Fachbuchverlag Leipzig 1973
3. Auflage
Lizenznummer: 114-210/50/73. Deutsche Demokratische Republik
ES 20 A (18 B 7, 20 K 3)
Gestaltung und Einband: Egon Hunger, Leipzig
Satz und Druck: Mühlhäuser Druckhaus
Redaktionsschluß: 30. 6. 1973
Bestellnummer: 545 645 8
EVP 5,50 M

Geleitwort. Die Mikroelektronik wird stärker in alle Bereiche der elektrischen Informationstechnik eingreifen, als es die Erfindung des Transistors getan hat. Welche grundsätzlichen und umfassenden Veränderungen im Denken und Handeln von Technikern und Ingenieuren und in der sichtbaren Gestalt elektronischer Geräte die Einführung der Transistortechnik im besonderen und der Halbleitertechnik im allgemeinen mit sich gebracht hat, haben viele, die das vorliegende Buch benutzen werden, selbst miterlebt. Diese, die schon die Aufgeschlossenheit für das andauernde und nicht nur aufregende, sondern oft auch mühsame Erschließen neuer Gebiete der Wissenschaft und Technik mitbringen, und noch mehr jene, die von Schulen kommen oder noch in Schulen lernen, brauchen eine Wegleitung in das Gebiet der Mikroelektronik. In der Deutschen Demokratischen Republik ist in den vergangenen Jahren an vielen Stellen mit großer Umsicht das wissenschaftliche und technologische Fundament für die Mikroelektronik gelegt und damit ihre ingenieurtechnische Beherrschbarkeit, Anwendung und Weiterentwicklung vorbereitet worden.

Mit diesen Sätzen begann das Geleitwort der ersten Auflage. Sie gelten auch heute noch. Die Mikroelektronik hat inzwischen einen festen Platz in der Volkswirtschaft der DDR eingenommen. In der »Direktive des VIII. Parteitages der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands zum Fünfjahrplan für die

Entwicklung der Volkswirtschaft der DDR 1971 bis 1975« steht die Forderung, in Zusammenarbeit mit der UdSSR und den anderen sozialistischen Ländern ein hohes Niveau in der Bereitstellung von Erzeugnissen der Halbleitertechnik und Mikroelektronik zu sichern. Die heutige Phase der Mikroelektronikindustrie, in der ihr weiterer Ausbau, ihre Stabilisierung und ihre Anpassung an die Forderungen der Geräteindustrie charakteristisch sind, bedarf wissenschaftlich gebildeter Menschen auf allen Ebenen, vom Fachlehrer bis zum Ingenieur und Naturwissenschaftler. Dieses Buch wird in seiner dritten von den Autoren neubearbeiteten Auflage weiter dazu beitragen, diesen wissenschaftlichen Nachwuchs bilden zu helfen. Wie alle Zweige einer modernen Volkswirtschaft ist auch die Mikroelektronik eng und vielfältig mit anderen Zweigen verflochten. Am engsten und kompliziertesten ist sie mit der elektronischen Geräte- und Anlagenindustrie verknüpft. Es ist gut und nützlich, daß die Autoren diesem Zusammenhang ihre besondere Aufwerksamkeit widmen.

Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhart Köhler
Direktor der Sektion Physik und
Technik elektronischer Bauelemente
der Technischen Hochschule Ilmenau

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 19

1.1. Sinn und Bedeutung der Mikroelektronik 19
1.1.1. Zuverlässigkeit 22
1.1.2. Wirtschaftliche Fertigung 26
1.1.3. Miniaturisierung 29
1.1.4. Elektrische Eigenschaften 33
1.2. Entwicklung der Schaltungsintegration 37
1.2.1. Gedruckte Schaltungen 37
1.2.2. Subminiaturtechnik 38
1.2.3. Modul- und Mikromodultechnik 41
1.2.4. Dünnschicht- und Festkörpertechnik 42

2 Dick- und Dünnschichtschaltkreise 45

2.1. Grundlagen 47
2.1.1. Struktur und Verhalten der Schichten 48
2.1.2. Trägermaterialien 51
2.2. Dickschichtschaltkreise 54
2.2.1. Substrate 58
2.2.2. Beschichtungstechnologien 59
2.2.3. Passive Elemente 65
2.2.4. Aktive Elemente 69
2.2.5. Verbindungs- und Anschlußtechnik 70
2.3. Dünnschichtschaltkreise 72

2.3.1. Substrate 74
2.3.2. Dünnschichttechnologien 75
2.3.2.1. Herstellung dünner Schichten 75
2.3.2.2. Geometrie der Schaltkreise 83
2.3.3. Passive Elemente 97
2.3.4. Aktive Elemente 107
2.3.5. Verbindungs- und Anschlußtechnik 116
2.3.6. Umhüllung bzw. Verkappung 120
2.3.7. Angebot an Dünnschichtschaltkreisen 121

3 Festkörperschaltkreise 125

3.1. Physikalische Grundlagen 130
3.2. Technologische Grundlagen 136
3.2.1. Aufbereitung des Substratmaterials 136
3.2.2. Herstellung der Substrate 141
3.2.3. Diffusionstechnologien 144
3.2.4. Isolationstechnologien 156
3.3. Elemente im Festkörperschaltkreis 163
3.3.1. Aktive Elemente 163
3.3.2. Passive Elemente 174
3.4. Verbindungs- und Anschlußtechnik 185
3.4.1. Verbindungen innerhalb des Schaltkreises 185
3.4.2. Kontaktierung der Schaltkreise 187
3.4.3. Verbindung der Schaltkreise mit der äußeren Schaltung 193
3.5. Formen der Festkörperschaltkreise 198
3.5.1. Monolithische Schaltkreise mit Sperrschichtisolation 199
3.5.2. Monolithische Schaltkreise mit SiO_2-Isolation 202
3.5.3. MOS-Schaltkreise 202
3.5.4. Beam-lead-Schaltkreise 203
3.5.5. Matrix-Schaltkreise 203
3.5.6. Large-scale Integration (LSI) 206
3.6. Verkappung 209
3.7. Entwurf und Fertigung von Schaltkreisen 216
3.8. Angebot an Festkörperschaltkreisen 219

4 **Einsatz mikroelektronischer Schaltkreise** 223

4.1. Unterschiede zwischen Analog- und Digitaltechnik 223
4.1.1. Typenvielfalt der Funktionsgruppen analoger und digitaler Systeme 227
4.1.2. Forderungen an Funktionsgruppen analoger und digitaler Systeme 229
4.1.3. Forderungen an Einzelbauelemente in analogen und digitalen Systemen 230
4.1.4. Folgerungen 232
4.2. Einsatz in digitalen Gerätekonzeptionen 235
4.2.1. Grundschaltungen digitaler Systeme 235
4.2.2. Wichtigste Kennwerte der digitalen Grundschaltungen 239
4.2.3. Schaltungsarten 241
4.3. Einsatz in analogen Gerätekonzeptionen 245
4.3.1. Grundschaltungen analoger Systeme 246
4.3.2. Einsatz integrationsfreundlicher Teilkonzeptionen 265
4.3.3. Umstellung auf digitale Verfahren 271

5 **Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung der integrierten Schaltungstechnik** 281

6 **Anhang** 287

Erklärung von Fachausdrücken 297
Literaturhinweise 303
Bildnachweis 306
Sachwortverzeichnis 307

Farbtafeln nach S. 96

CONTENTS

1.	**Introduction**	19
1.1.	Aim and Importance of Microminiature Electronics	19
1.2.	Development of Integrated Circuits	37
2.	**Thick- and Thinfilm Circuits**	45
2.1.	Fundamentals	47
2.2.	Thick Film Circuits	54
2.3.	Thin Film Circuits	72
3.	**Solid State Circuits**	125
3.1.	Physical Fundamentals	130
3.2.	Technological Fundamentals	136
3.3.	Elements of Solid State Circuits	163
3.4.	Connections and Interconnections	185
3.5.	Types of Solid State Circuits	198
3.6.	Encapsulation	209
3.7.	Design and production of Circuits	216
3.8.	Available Solid State Circuits	219
4.	**Application of Integrated Circuits**	223
4.1.	Differences between Analog und Digital Circuits	223
4.2.	Application in Digital Systems	235
4.3.	Application in Analog Systems	245
5.	**Present and Future Importance of Integrated Circuits**	281

SOMMAIRE

1.	**Introduction**	19
1.1.	Buts et portée de la microélectronique	19
1.2.	Développement des circuits intégrés	37
2.	**Circuits hybrides à couches minces et épaisses**	45
2.1.	Fondements	47
2.2.	Circuits à couches epaisses	54
2.3.	Circuits à couches minces	72
3.	**Circuits monolithiques**	125
3.1.	Fondaments physiques	130
3.2.	Fondaments technologiques	136
3.3.	Eléments du circuit	163
3.4.	Technique des connexions et interconnexions	185
3.5.	Formes technologiques des circuits intégrés	198
3.6.	Encapsulation	209
3.7.	Etude et production de circuits intégrés	216
3.8.	Circuits intégrés disponnibles	219
4.	**Application des techniques microélectroniques**	223
4.1.	Différence entre les circuits analogiques et logiques	223
4.2.	Application dans les appareils de conception logique	235
4.3.	Application dans les appareils de conception analogique	245
5.	**Importance actuelle et future de la technique des circuits intégrés**	281

Vorwort. Das Gesicht der Gerätegeneration von morgen wird durch den Einsatz der Mikroelektronik geprägt werden. Das betrifft nicht nur Größe und Masse, sondern noch weit stärker ihre technischen Parameter, ihre wirtschaftliche Herstellbarkeit, ihre Zuverlässigkeit und damit ihre Weltmarktfähigkeit. Der schnelle Übergang zu mikroelektronischen Technologien auch in der hochentwickelten elektronischen Industrie der DDR ist deshalb eine dringende Forderung.

Diese Einführung wendet sich nicht an den Spezialisten auf diesem Gebiet, sondern an alle diejenigen, die als Entwickler, Konstrukteure und Studierende diese Aufgabe zu bewältigen haben und einen ersten Kontakt mit der für sie neuen Technik suchen. Aus diesem Grund wurde neben der ausführlichen Behandlung der heute wichtigsten Technologien — der Filmtechnik und der Festkörpertechnik – auch den Fragen der notwendigen Anpassung der Gerätekonzeption an diese Technologien besondere Beachtung geschenkt. Grundsätzlich wird versucht, die Mikroschaltung weniger als bestaunenswertes physikalisches Wunder zu betrachten (das sie zweifellos ist), sondern unter dem Gesichtspunkt ihres dringend notwendigen, technisch und wirtschaftlich optimalen Einsatzes. Die Autoren konnten dabei im Rahmen ihrer Tätigkeit im Institut für Nachrichtentechnik auf eigene applikative Erfahrungen bei der Einführung der integrierten Technik im Industriezweig Nachrichten- und Meßtechnik zurückgreifen.

Es war an manchen Stellen nicht leicht, die Grenzen der populärwissenschaftlichen Darstellung einzuhalten und trotzdem nicht oberflächlich zu werden. Einige sehr spezielle Abschnitte, die um des tieferen Verständnisses willen nicht unterschlagen werden durften, wird der flüchtige Leser ohne Nachteil übergehen können. In vielen noch offen gebliebenen Fragen muß allerdings auf das Fachschrifttum, insbesondere auf die einschlägigen Fachzeitschriften, verwiesen werden.

Wir möchten an dieser Stelle allen Fachkollegen, die uns bei der Beschaffung instruktiven Bildmaterials ebenso wie bei der Klärung strittiger Fragen behilflich waren, unseren Dank sagen. Insbesondere danken wir Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. E. Köhler, Technische Hochschule Ilmenau, für die sehr sorgfältige und kritische Durchsicht des Manuskripts und viele wertvolle Hinweise. Dank gebührt auch dem Verlag für die großzügige Ausstattung und seinen Mitarbeitern für ihr verständnisvolles Eingehen auf alle Vorstellungen und Wünsche.

Wolfgang Glaser/Gerhard Kohl

Micro-electronics. The micro-electronic techniques developed over the past few years have led to a revolution in the construction and development of electronic instruments and systems. On the basis of these processes it is possible to replace the previously employed technique of manually piecing together a number of separate components to form an electronic circuit by the automatic production of an entire functional group. The degree of reliability achieved with these integrated circuits is considerably higher than previously attainable values, they have been reduced in size by magnitudes, and the production costs are today in part lower than in the case of conventional techniques.
In this publication in the series „Polytechnische Bibiliothek" a report is given on the aims and results in this extremely interesting and important field, a field which has laid the foundation for a new generation of electronic instruments and which is still undergoing a period of turbulent new developments. Following up the introductory observations on the aims and the necessity of these processes a detailed study of the three most important processes is given: thin film technology, thick film technology and solid state circuit technology. In this the physico-chemical production processes are discussed as well as those questions of interest to the experienced man such as the possibility of producing certain components, their tolerances or the production costs of the circuits. A further point of discussion is

the introduction of micro-electronic circuits from the point of view of the instrument designer, whereby particular attention is paid to the effects on the extremely problematical analogous circuit applications.

The book is intended as an introduction for the practical man in electronic instrument construction as well as for the layman who is interested in this subject. The reader need not possess special training in mathematics, yet the book does presuppose a certain basic knowledge of semiconductor technology and electronic circuit techniques.

La Microélectronique. Les progrès réalisés pendant les dernières années dans le domaine des technologies microélectroniques ont amené une rèvolution dans l'étude et la réalisation d'appareils et de systèmes électroniques. A la place de la technique classique qui consistait d'assembler manuellement un circuit à partir de nombreux composants, les technologies microélectroniques ont mis le procédé de fabrication automatique d'un bloc fonctionnel complet. Ces circuits intégrés atteignent une fiabilité beaucoup plus élevée en comparaison à celle réalisée auparavant, leur encombrement a diminué de plusieurs ordres de grandeur par rapport à celui qui résultait des technologies classiques et ils ont permis, pour une large part, de souspasser les prix de fabrication de ces dernières.
Ce livre, qui est publié dans la série »Bibliothèque Polytechnique«, décrit les buts et les résultats de cette technique passionnante et importante dont l'évolution rapide ne cesse de s'accroitre et qui est la base d'une nouvelle génération d'appareils électroniques. Une introduction qui discute les buts et la nécessité de la microélectronique est suivie par une présentation détaillée des trois procédés les plus importants: la technique des couches minces, la technique des couches épaisses et la technique monolithique à semiconducteurs. D'une part, on traite les procédés physico-chimiques de la fabrication et, d'autre part, on aborde des questions telles qu'elles sont posées par le technicien, comme la possibilité de réalisa-

tion d'un composant donné, leur tolérances, et le prix de fabrication des circuits intégrés. Enfin, l'application des circuits intégrés est discutée du point de vue de l'étude et de la réalisation d'appareils électroniques et l'on attache une attention particulière aux répercussions sur la technique des circuits analogiques qui pose de nombreux problèmes.

Le présent livre doit servir d'introduction aux techniciens dans l'industrie de construction d'appareils électroniques et s'adresse également à des non professionnels intéressés par le développement technique. Des connaissances en mathématique ne sont pas nécessaires, toutefois certaines notions de la technique des semiconducteurs et des circuits électroniques sont requises.

1

Einführung

1.1. Sinn und Bedeutung der Mikroelektronik

Mit der Konstruktion der ersten Elektronenröhre unmittelbar nach der Jahrhundertwende und ihrem Einsatz zur Verstärkung niederfrequenter und hochfrequenter Wechselströme begann sich ein Teilgebiet der Elektrotechnik abzuzeichnen, das – vorerst Schwachstromtechnik genannt – einen deutlichen Trennungsstrich zwischen sich und der damals bereits recht weit fortgeschrittenen Starkstromtechnik zog. Die Elektronenröhre als wesentliches aktives Bauelement dieses neuen Zweiges wurde in den folgenden drei Jahrzehnten elektrisch und technologisch immer mehr vervollkommnet, zuerst jedoch fast ausschließlich in Nachrichtensystemen verwendet, z. B. in den Kabelverstärkern der Postnetze. Die drahtlose Nachrichtentechnik erreichte zu Beginn der zwanziger Jahre mit der Einführung des öffentlichen Rundfunks einen ersten Höhepunkt. Daneben wuchs, weniger auffällig und sichtbar für den Laien, der internationale und interkontinentale Nachrichtenaustausch über Lang- und Kurzwellen. Ein weiteres Jahrzehnt später gab die neuentstandene Fernsehtechnik der Entwicklung der Elektronenröhre neue Impulse. Nach jahrelangen Versuchen mit den verschiedensten Verfahren wurde klar, daß nur eine nichtmechanische Bildwiedergabe, wie sie auf der Grundlage der Braunschen Röhre möglich war, Aussicht auf dauerhaften Erfolg haben konnte. So entstanden in rascher Folge Bildaufnahme- und Bildwiedergaberöhren, nicht zu reden von den Verbesserungen an den Empfänger- und Verstärkerröhren selbst, die durch die steigenden Anforderungen bedingt waren. Der Begriff der »elektronischen

Geräte« war in jener Zeit noch leicht zu definieren; er wurde auf eine Technik angewendet, deren Kernstück — eben die Elektronenröhre — mit frei im Vakuum fliegenden und durch elektrische und magnetische Felder steuerbaren Elektronen arbeitete.

Als im Jahre 1948 der Transistor — entdeckt von den späteren Nobelpreisträgern Bardeen, Brattain und Shockley — neben die Röhre trat, war noch nicht abzusehen, welch revolutionierenden Einfluß die damit enstandene Halbleitertechnik in der Folgezeit auf das Gesamtgebiet der Elektronik nehmen sollte. Tatsächlich zeigte es sich jedoch sehr bald, daß der schon nach wenigen Jahren zur Fertigungsreife entwickelte Transistor nicht nur als ebenbürtiger Partner neben die Elektronenröhre treten konnte, sondern daß er sie auf nahezu allen Gebieten — nur die Leistungselektronik in den hochfrequenten Bereichen bisher ausgenommen — verdrängte. Seine Eigenschaften ließen die Konstruktion von Geräten zu, deren Realisierung mit Elektronenröhren um ein Vielfaches aufwendiger und in vielen Fällen überhaupt nicht möglich gewesen wäre. In kurzer Zeit entstanden und wuchsen nun die vielen Gebiete der modernen Elektronik, die heute ihr Gesicht bestimmen; allen voran die Technik der elektronischen Rechenmaschinen, deren enormer Aufwand an elektronischen Baugruppen ohne die Halbleitertechnik bereits nicht mehr denkbar wäre. Der Betriebsfrequenzbereich der Transistoren vergrößerte sich von Jahr zu Jahr und übertraf bald die mit konventionellen Elektronenröhren erreichbaren Grenzwerte; spezielle Halbleiterbauelemente drangen weit in das Gebiet der heute technisch noch kaum genutzten Frequenzen über 10 GHz vor. So umfaßte der Begriff der Elektronik jetzt auch den immer mehr wachsenden Bereich der Halbleiteranwendungen auf allen Gebieten der Technik.

Dieser ungeheure Aufschwung, den die Elektronik seit etwa 15 Jahren genommen hat und in dessen Gefolge sich das Typenspektrum und die Einsatzbreite elektronischer Geräte fast ebenso sprunghaft vergrößerten wie der Umfang und die Kompliziertheit der Geräte selbst, stellte die Industrie vor ernste Probleme. Die Fertigung elektronischer Geräte war auf die bisher gewohnte Weise nicht mehr durchführbar. Die Technologie der diskreten Bauelemente, mechanisch auf einem Chassis fixiert und durch angelötete Drahtverbindungen elektrisch verbunden, war in vieler-

1

lei Hinsicht den neuen Anforderungen nicht mehr gewachsen. Die ständig steigende Zahl der in den Geräten eingesetzten Bauelemente erhöhte die Herstellungskosten, verringerte die Zuverlässigkeit und ließ Umfang und Masse der Anlagen ständig steigen. Neue Wege mußten gesucht werden und wurden gefunden. Aus einer Vielzahl von Richtungen und Speziallösungen schälten sich schließlich zu Beginn der sechziger Jahre zwei Technologien heraus, die heute das Gesicht der modernen Elektronik, der Mikroelektronik, bestimmen: die Dünnschichttechnik und die auf den modernen Transistortechnologien beruhende Festkörpertechnik. Beide ersetzen auf verschiedene Weise die konventionelle, aus vielen diskreten und durch Lötungen verbundenen Bauelementen bestehende Schaltung durch einen geschlossenen, integrierten Funktionsblock, der bei einer teilweise radikalen Reduzierung der Abmessungen eine gleichmäßige, automatische Fertigung hoher Stückzahlen erlaubt.

Selbstverständlich kann auch der hochentwickelte elektronische Gerätebau der DDR auf diese Techniken nicht verzichten. Die Weltmarktfähigkeit unserer Erzeugnisse, die eine ständige Verkürzung der Entwicklungszeiten auch komplizierter Systeme sowie deren billige und wirtschaftliche Fertigung fordert und gleichzeitig höchste Ansprüche an die technischen Parameter einschließlich der Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der Anlagen stellt, setzt den Einsatz der integrierten Schaltungstechniken unbedingt voraus. Die Arbeiten zur Beherrschung dieser Techniken und zur Bereitstellung eines abgestimmten Typensortiments integrierter Funktionsblöcke werden deshalb mit wesentlicher Unterstützung der Regierung seit mehreren Jahren verstärkt durchgeführt. Dabei sind neben Forschungsstellen an Universitäten, Hochschulen und an der Akademie der Wissenschaften der DDR, insbesondere die Arbeitsstelle für Molekularelektronik in Dresden (Festkörpertechnik), das Kombinat VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder, der VEB Keramische Werke Hermsdorf (Dünnschichttechnik) sowie das Forschungsinstitut Prof. M. von Ardenne zu nennen.

Dieses Buch befaßt sich speziell mit den beiden genannten Technologien, auf denen der elektronische Gerätebau der nächsten Jahre basieren wird und die nach den heutigen Kenntnissen die Grundlage für eine echte Weiterentwicklung bilden.

Im Abschnitt 1.2. soll die Entwicklung der verschiedenen Technologien zusammenfassend verfolgt werden, um wenigstens einige Zwischenstationen auf dem Weg zur heutigen Mikroelektronik kennenzulernen und beurteilen zu können. Vorerst scheint es jedoch wesentlich, auf diejenigen Faktoren näher einzugehen, die bestimmendes Ziel dieses Weges waren und heute noch sind. Dabei sind wohl an erster Stelle die höhere Zuverlässigkeit und die Möglichkeit zur wirtschaftlichen Fertigung als Forderungen zu nennen. Weiterhin ist eine Verminderung der Masse und des Volumens notwendig, um den steigenden Umfang der Geräte technisch sinnvoll zu begrenzen. Darüber hinaus wird über die elektrischen Eigenschaften sowie über die Energiebilanz als zusätzliche Beurteilungskriterien noch zu reden sein.

1.1.1. Zuverlässigkeit

Als Maß für die Zuverlässigkeit eines Gerätes oder Systems wird die mittlere Lebensdauer (Betriebszeit zwischen Einschaltmoment und Ausfall der Anlage) oder bei reparierbaren Anlagen die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen (mean time between failures = MTBF) verwendet. Sie verringert sich mit steigender Zahl der zur einwandfreien Funktion eines Systems erforderlichen Bauelemente oder Baugruppen. Sie ist ferner um so geringer, je geringer die Zuverlässigkeit der Einzelbauelemente ist. Definiert man eine Ausfallrate λ_E als Zahl der Ausfälle des betreffenden Einzelelements je Stunde Betriebszeit, so ergibt sich die Ausfallrate der Gesamtanlage λ_A als Summe der Ausfallraten der Einzelelemente:

$$\lambda_A = \Sigma\lambda_E \tag{1}$$

Nimmt man zur Vereinfachung an, daß in einem bestimmten Gerät n Bauelemente mit gleichen Ausfallraten λ_E enthalten sind, so folgt daraus

$$\lambda_A = n\lambda_E \tag{2}$$

oder die mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen

$$t_{mA} = \frac{1}{\lambda_A} = \frac{1}{n \cdot \lambda_E} \tag{3}$$

Daraus ist bereits eine für den Geräteentwickler außerordentlich bedeutsame Konsequenz zu erkennen. Stehen ihm nur Bauelemente mit einer bestimmten von ihm nicht zu beeinflussenden Ausfallrate λ_E zur Verfügung, so ist der maximal zulässige Umfang seiner Geräte bereits festgelegt. Sobald nämlich die Zahl n der verwendeten Bauelemente so groß wird, daß t_{mA} z. B. nur noch wenige Stunden beträgt, wird ein sinnvoller Einsatz eines solchen Gerätes nicht mehr möglich sein; die Reparatur- und Wartungskosten werden unzumutbar hoch, und die Anlage ist technisch nicht mehr einsetzbar. Für eine ganze Anzahl von Geräten müssen sogar erheblich höhere Forderungen gestellt werden. Unbemannte Verstärker in Fernmelde- und Richtfunkstrecken, die bei Betriebsstörungen einen Ausfall des gesamten Bündels von oft Hunderten von Gesprächskanälen zur Folge haben, oder Tiefseekabel, deren Reparatur nur mit ungeheurem Kostenaufwand überhaupt möglich ist, erfordern wesentlich höhere Werte der mittleren Betriebsdauer, gar nicht zu reden von den elektronischen Ausrüstungen der Raumschiffe.

Die in der Literatur angegebenen Werte der Ausfallraten für Einzelbauelemente schwanken sehr stark. Das ist einmal dadurch bedingt, daß es sich um statistische Mittelwerte handelt, deren Bestimmung das Ausmessen einer großen Zahl von Elementen erfordert. Die Messung wird dabei um so langwieriger und aufwendiger, je kleiner λ_E-Werte zu erwarten sind, da z. B. einem $\lambda_E = 10^{-5}$ 1/h eine mittlere Lebensdauer des Einzelelements von $t_{mE} = 10^5$h oder rund 10 Jahren entspricht. Die Lebensdauer und damit die Meßzeit läßt sich zwar verringern, wenn man das Element unter verschärften Bedingungen prüft (z. B. unter erhöhter Temperatur), nicht in jedem Fall ist aber aus einer derartigen Messung auch ein sicherer Schluß auf die Lebensdauer unter normalen Betriebsbedingungen möglich. Schließlich ist zu beachten, daß die Ausfallraten bestimmter Elemente von den zur Verfügung stehenden Ausgangsmaterialien, der Herstellungstechnologie, den Kontaktierungsverfahren und einer Vielzahl von Umweltbedingungen abhängen.

Trotzdem lassen sich Größenordnungen heute erreichter Ausfallraten für einige typische Bauelementegruppen angeben (Tabelle 1). Man erkennt aus dieser Zusammenstellung deutlich den Gewinn an Zuverlässigkeit, der einmal durch den Ersatz der

Tabelle 1. Ausfallraten typischer Bauelemente (Größenordnung)

Bauelement		λ_E in 1/h
Passive Elemente	Kohleschichtwiderstand	$3 \cdot 10^{-7}$
	Metallschichtwiderstand	$1 \cdot 10^{-7}$
	Papierkondensator	$1 \cdot 10^{-6}$
	Folienkondensator	$1 \cdot 10^{-7}$
	Lötverbindungen	$1 \cdot 10^{-7}$
Aktive Elemente	Verstärkerröhren	$5 \cdot 10^{-6}$
	Gleichrichterröhren	$1 \cdot 10^{-5}$
	Ge-Spitzendioden	$5 \cdot 10^{-7}$
	Si-Legierungsdioden	$1 \cdot 10^{-7}$
	Si-Planardioden	$2 \cdot 10^{-8}$
	Ge-Legierungstransistor	$1 \cdot 10^{-6}$
	Si-Legierungstransistor	$5 \cdot 10^{-7}$
	Si-Planartransistor	$5 \cdot 10^{-8}$

Elektronenröhren durch Transistoren möglich wurde, sowie die Fortschritte, die sich im Laufe der Entwicklung innerhalb der Halbleitertechnik selbst, speziell durch die Einführung der Planartechnologie, ergaben. Besonders verwiesen sei auf die Ausfallrate der Lötverbindungen, die in der gleichen Größenordnung wie die der Bauelemente liegt und somit wegen ihrer sehr hohen Anzahl in verdrahteten Geräten eine ernst zu nehmende Fehlerquelle darstellt. Die Zahlen zeigen jedoch andererseits die Grenzen des Einsatzes diskreter Bauelemente in umfangreichen elektronischen Geräten, wenn man sie einmal in Gleichung (3) einsetzt. Bild 1 zeigt eine häufig zu findende Grafik, die den ständig zunehmenden Umfang der elektronischen Einrichtungen eines Flugzeugs darstellt. Es enthielt danach bereits 1965 rund 200 000 elektronische Bauelemente. Solange die betreffenden Schaltungen vorwiegend mit diskreten passiven Bauelementen aufgebaut sind, wird deren Ausfallrate die mittlere Betriebszeit der elektronischen Ausrüstung bestimmen. Setzt man z. B. einen mittleren Wert von $\lambda_E = 5 \cdot 10^{-7}$ 1/h an, so folgt aus Gleichung (2) die mittlere Ausfallrate

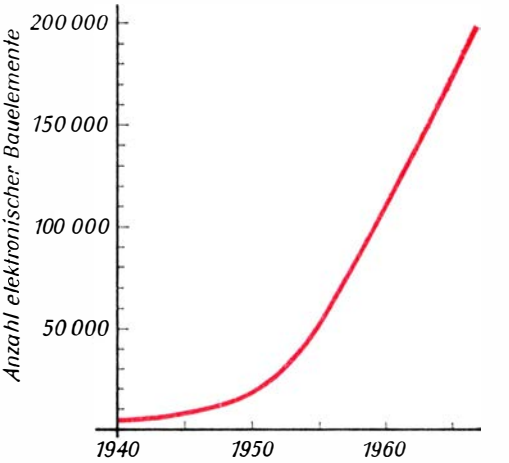


Bild 1. Zahl der elektronischen Bauelemente je Flugzeug

$$\lambda_A = 0{,}2 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-7} = 0{,}1\ 1/\text{h}$$

bzw.

$$t_{mA} = 10\ \text{h}$$

Man erkennt, daß hier offenbar die Sicherheitsgrenze bereits erreicht ist. So würde jede weitere Komplizierung der elektronischen Bordausrüstung zu so kurzen Betriebszeiten führen, daß von einem zuverlässigen Betrieb, würde man die konventionelle Technik mit diskreten Bauelementen beibehalten, keine Rede mehr sein könnte.

Ähnliche Rechnungen lassen sich leicht für elektronische Rechenmaschinen (mit mehreren 10^5 bis 10^6 Elementen je System) aufstellen, aber auch für moderne fernmeldetechnische Systeme, in denen jedes Signal eine Vielzahl von Zwischenverstärkern, Umsetzern, Vermittlungsstellen usw. durchläuft. Alle diese Systeme haben aber heute ihren Endzustand noch nicht erreicht, sondern werden in Zukunft in vieler Hinsicht umfangreicher und komplizierter werden. Dazu ist eine Erhöhung der Zuverlässigkeit der einzelnen Funktionsgruppen unbedingt erforderlich.

Zahlenangaben über mögliche, vielleicht erreichbare Werte sind

recht spekulativ. Folgende Überlegung dürfte jedoch vermutlich nicht allzu weit am Ziel vorbeigehen. Die Zuverlässigkeit der modernen Silizium-Planartransistoren liegt um rund eine Größenordnung über der unserer diskreten, passiven Bauelemente, die damit bestimmend für die Zuverlässigkeit der mit ihnen bestückten Geräte sind. Setzt man voraus, daß in Schaltungen mit diskreten Bauelementen im Mittel auf jeden Transistor zur Gewährleistung seiner Funktion rund 10 passive Elemente kommen und daß diese Funktionsgruppen in Zukunft vollständig in Planartechnologie hergestellt werden, so müßte es gelingen, für diesen Funktionsblock die gleiche geringe Ausfallrate zu erreichen, die heute für den Transistor allein gilt. In diesem Fall würde die Systemzuverlässigkeit um zwei Größenordnungen verbessert werden. Bisherige erste Messungen an Festkörperschaltungen haben diese Überlegungen bestätigt.

1.1.2. Wirtschaftliche Fertigung

Die bisherigen Schaltungen elektronischer Geräte wurden ausnahmslos auf der Technik der diskreten Bauelemente aufgebaut, d. h., die elektrisch-physikalischen Grundelemente einer Schaltung (Widerstand, Kapazität, Induktivität als passive Elemente, Röhre oder Transistor als aktive Elemente) traten gleichzeitig als konstruktive, selbständige Bauelemente auf. Alle diese diskreten Einzelelemente wurden durch ein Netz von Verbindungsleitungen miteinander verbunden. Diese Technologie warf eine Reihe von Problemen auf, die mit zunehmender Zahl der in einem Gerät vereinigten Bauelemente bei dem immer mehr ansteigenden Fertigungsumfang der elektronischen Geräte und den wachsenden Anforderungen an ihre elektrisch-mechanische Stabilität immer schwerer zu beherrschen waren.

Bereits für die notwendige mechanische Fixierung der Bauelemente mußten jeweils individuelle Optimallösungen gesucht werden. Die ersten Jahre der neuentstehenden Radiotechnik unmittelbar nach dem ersten Weltkrieg mit ihren elektrisch unzuverlässigen und teuren Klemm- und Schraubverbindungen sind in diesem Rahmen nur noch von historischem Interesse; sehr bald setzte sich die Technik der Lötverbindungen endgültig durch. Nur die »Heimelektronik« — ein allerdings erst in der Neuzeit ge-

prägtes Wort für die Gerätegruppe des nichtkommerziellen Massenbedarfs, wie Rundfunk- und Tonbandgeräte, Fernsehempfänger usw. — konnte es sich jedoch leisten, die kleineren passiven Bauelemente, wie Widerstände und Kondensatoren, frei hängend in das Leitungsnetz einzulöten, das sich seinerseits an wenigen Fixpunkten stützte. Ein derartiger freiverdrahteter Aufbau war gegen mechanische Erschütterungen empfindlich, Kontaktschwierigkeiten und Leitungsberührungen waren kaum vermeidbar. In kommerziellen Geräten mußten dagegen sowohl Bauelemente, wie Leitungen oder Leitungsbündel, mechanisch fixiert werden. Dadurch stiegen nicht nur Umfang und Preis der Geräte, sondern auch die Zahl der Lötstellen. Neben diese mehr mechanischen Schwierigkeiten traten elektrische. Die Länge der Leitungen machte sich besonders in hochfrequenztechnischen Geräten oft ebenso störend bemerkbar wie die gegenseitigen Kapazitäten der Einzelleitungen und deren praktisch unkontrollierbare Lage in einem Kabelbaum.

Wesentlich aber war schließlich der hohe Anteil an manueller und nicht automatisierbarer Arbeit bei der Fertigung eines elektronischen Gerätes. Bereits die Bestückung des Gerätes, d. h. das Einsetzen der Bauelemente, mußte von Hand erfolgen. Neben den Lötvorgang trat oft noch das individuelle Schneiden und Biegen der Anschlußdrähte oder -fahnen. Die Verdrahtung des Gerätes – in komplizierten Systemen wenigstens durch einen vorgefertigten Kabelbaum vereinfacht — war ebenfalls nicht zu automatisieren. Bei dieser Fertigungsweise traten unvermeidlich immer wieder Schaltfehler, fehlerhafte Lötstellen sowie Fehler durch Bauelementeverwechslung auf. Diese Schwierigkeiten vervielfachten sich bei komplizierten Geräten, erforderten eine immer größere Zahl von Zwischenprüfungen einzelner Teilgruppen und wurden zum ernsten Hemmschuh für die weitere Entwicklung elektronischer Geräte. Sie führten schließlich zur Entwicklung der gedruckten (oder besser: geätzten) Schaltung.

Durch die Einführung der Druckschalttechnik in die mit großen Gerätestückzahlen arbeitende Heimelektronik ebenso wie in die an hoher mechanischer Stabilität und elektrischer Zuverlässigkeit interessierte kommerzielle Elektronik war ein erster notwendiger Schritt getan. Das Problem der Bauelementefixierung war ohne erhöhten mechanischen Aufwand und ohne Erhöhung der Lötstel-

lenzahl gelöst, die Verbindungsleitungen waren durch die einmalig hergestellte Maske in ihrer gegenseitigen Anordnung festgelegt, so daß Fehlverbindungen praktisch ausgeschlossen waren, und die Herstellung aller Lötverbindungen erfolgte schnell und vollautomatisch in einem Arbeitsgang. Prinzipiell stand sogar der automatischen Bestückung der Leitungsplatine mit Bauelementen nichts mehr im Wege (in der Praxis zeigte es sich jedoch bald, daß sie teurer war als die Handbestückung; sie wurde deshalb nur selten eingesetzt).

So groß und so notwendig der Fortschritt war, den die Einführung und Anwendung der gedruckten Schaltung brachte, so waren doch die Grenzen auch dieser Technik bereits sichtbar. Für die Verbindungsleitungen stand allein eine einzige Ebene, die der Platine, zur Verfügung. Eine räumliche Anordnung der Bauelemente und Verdrahtung, die Ausnutzung der dritten Dimension, war nicht möglich. Die Länge der Verbindungsleitungen zwischen den Bauelementen hatte sich nicht verringert, sondern eher vergrößert, da Leitungskreuzungen vermieden werden mußten und somit oft Umwege in der Leitungsführung entstanden. Wenn auch die Lötverbindungen durch den kontrollierten automatisierten Lötvorgang sowohl billiger als auch zuverlässiger geworden waren, verschwanden sie doch nicht als »unsichtbare Bauelemente«. Die Vielzahl der einzusetzenden Bauelemente brachte nach wie vor Fehlermöglichkeiten bei der Montage und deren individuelle Anfälligkeit Ausfallmöglichkeiten im praktischen Betrieb mit sich. Größe und Masse des Gesamtaufbaus wurden schließlich nach wie vor durch die diskreten Bauelemente bestimmt und waren gegenüber der konventionellen Technik kaum verringert worden.

So entstand in den Folgejahren eine ganze Reihe Verbesserungen an der Technik der gedruckten Schaltung selbst, und in einigen Fällen war sie Grundlage für eine gewisse Weiterentwicklung in der einen oder anderen Richtung. Im Abschnitt 1.2. sind zwei dieser Zwischenstadien näher beschrieben. Keiner dieser Versuche stellte eine Fundamentallösung dar, sie dienten jedoch zweifellos dazu, daß man sich über die anzustrebende Herstellungstechnologie im Sinne einer wirtschaftlichen Fertigung elektronischer Geräte klar wurde: Endziel dieser Entwicklung muß eine automatische Herstellung kompletter elektronischer Geräte sein, Teilziel dazu die automatische Herstellung geschlossener Bau- oder Funk-

tionsgruppen. Trotz steigender Komplizierung der Geräte und entsprechend hohen Aufwands darf der Preis eines solchen Funktionsblocks sich nicht im gleichen Maße erhöhen; die anzustrebende Technologie muß also eine billigere Fertigung erlauben, als mit diskreten Elementen möglich ist, und zwar bei gleichzeitiger erheblicher Erhöhung der Zuverlässigkeit. Im Hinblick auf den Service müssen die Herstellungskosten so niedrig sein, daß es wirtschaftlich vertretbar ist, bei einem eingetretenen Defekt die Baugruppe nicht mehr zu reparieren, sondern sie im ganzen zu ersetzen, genauso, wie man bisher ein diskretes Bauelement ersetzt und nicht repariert hatte. Die gelöteten Verbindungsleitungen zwischen den Elementen müssen — wenn sie sich schon nicht ganz vermeiden lassen – durch Zuverlässigeres ersetzt werden.
Dieses Programm, hinzielend auf den billig, zuverlässig und in großen Stückzahlen automatisch fertigbaren Funktionsblock, bestimmt heute die Richtung der Weiterentwicklung, deren vorläufig erste, aber wesentliche Stationen die Dünnschicht- und die Festkörpertechnik sind. Sie haben an die Stelle des diskreten Bauelements die integrierte Schaltung, den Funktionsblock, gesetzt.

1.1.3. Miniaturisierung

Die heute international für die modernen elektronischen Technologien angewendete Bezeichnung Mikroelektronik kennzeichnet zweifellos eine ihrer auffälligsten Eigenschaften: ihre außerordentliche Kleinheit. Die vorangegangenen Abschnitte haben deutlich gemacht, daß es sich dabei nicht um die einzige bemerkenswerte Eigenschaft und auch nicht um die wichtigste handelt.
Trotzdem sind die Vorteile, die die mikroelektronischen Technologien gerade durch die Masse- und Volumenverringerung bringen, beeindruckend. Ebenso wie eine mit Elektronenröhren bestückte große elektronische Rechenmaschine heute undenkbar wäre, weil sie nicht in einzelnen Räumen, sondern in speziellen Häusern untergebracht werden müßte und ihr Leistungsbedarf enorm hoch sein würde, wird in wenigen Jahren eine noch leistungsfähigere Maschine nicht mehr in der Bauweise der gedruckten Schaltung mit aufgesetzten diskreten Bauelementen denkbar sein.

Wenn in der Vergangenheit über eine notwendige Masse- oder Volumenverringerung elektronischer Geräte gesprochen wurde, so wurden diese Forderungen stets als selbstverständlich anerkannt, wenn sie z. B. tragbare Funkgeräte oder Flugzeug- oder Raumschiffausrüstungen betrafen. Hier war die Notwendigkeit naheliegend und einleuchtend. Der ständig steigende Umfang elektronischer Rechenautomaten hat indessen zwingend den Kreis der Interessenten an einer sehr kleinen Bauweise um einen von der Zahl der erforderlichen Baugruppen wie von der Zukunftsträchtigkeit dieser Anwendung her ganz wesentlichen Abnehmer erweitert, und es kann als sicher gelten, daß weitere Interessenten dazukommen. Oft liegen auf den ersten Blick nicht erkennbare Gründe für die Forderung nach Kleinheit vor. Das sei am Beispiel richtfunktechnischer Anlagen erläutert. Die heute mehrere schrankgroße Einheiten umfassenden Sende- und Empfangsanlagen einer Richtfunk-Relaisstelle werden in der Regel in unmittelbarer Nähe ihrer Antennen in speziell ausgebauten Stockwerken auf der Spitze hoher Betontürme untergebracht. Würde es gelingen, Umfang und Masse der Sende- und Empfangsanlagen bei gleicher Leistung wesentlich zu reduzieren, könnten Aufwand und Kosten der sehr teuren Türme erheblich gesenkt werden. In vielen Veröffentlichungen finden sich Angaben über die mit den verschiedenen Technologien erreichbaren Bauelementedichten (Zahl der Bauelemente je Kubikzentimeter Rauminhalt). Diese Angaben (Bild 2) sind mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Sie setzen stets nur den Rauminhalt, den eine einzelne, geschlossene, in der betreffenden Technik ausgeführte Baugruppe einnimmt, ins Verhältnis zu der Zahl der eingeschlossenen Bauelemente. Benutzt man diese Zahlen jedoch, um bei bekannter Zahl der Bauelemente

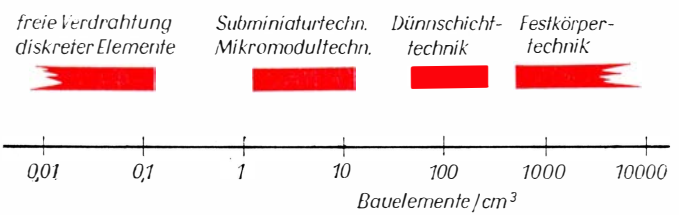


Bild 2. Erreichbare Bauelementedichte in Funktionsgruppen bei den verschiedenen Technologien

eines Gerätes auf dessen zu erwartenden Rauminhalt zu schließen, so wird man in der Regel viel zu kleine Werte erhalten — das tatsächliche Volumen des Gerätes wird wesentlich größer sein. Diese Tatsache zeigt nicht nur die Anwendbarkeitsgrenzen der Bauelementedichtezahlen, sondern weist zugleich darauf hin, daß mit einer Volumenverringerung allein der elektrischen Schaltung sehr bald ein Zustand erreicht sein wird, der eine noch weitere Verkleinerung (nur um der Verkleinerung willen) nicht mehr technisch sinnvoll erscheinen läßt. Es können nämlich die notwendigen Maßnahmen zum mechanischen Schutz der winzigen mikroelektronischen Baueinheit selbst, die Einrichtungen zu ihrer mechanischen Fixierung im Gerät (wobei auf eine leichte Zugänglichkeit zu achten ist, um ein Auswechseln bei Defekt zu ermöglichen) und schließlich die mechanische Konstruktion einschließlich der Bedienungseinrichtungen einen Raum beanspruchen, demgegenüber der von der Schaltung selbst eingenommene Rauminhalt vernachlässigbar klein ist.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang auch die Realisierung der Verbindungsleitungen zwischen den mikroelektronischen Baugruppen. Sie können im ungünstigsten Fall den Raumbedarf der eigentlichen Schaltung ebenfalls weit überschreiten und so jeder weiteren Volumenverminderung eine Grenze setzen.

Dieses letztgenannte Problem der Verbindungsleitungen läßt sich auf verschiedene Weise lösen. Es ist möglich (und wird bereits gelegentlich praktiziert), eine geätzte Mehrebenenverdrahtung anzuwenden, wodurch sich erheblich günstigere Möglichkeiten für die Leitungsführung ergeben. Allerdings ist diese Technik teurer als die übliche Technik gedruckter Schaltungen mit nur einer Leitungsebene.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Zahl der Verbindungsleitungen soweit wie möglich dadurch zu verringern, daß größere Baugruppen (z. B. ganze Geräteteile) als Block integriert werden. Diese Tendenz wird auch aus anderen Gründen verfolgt, ihr stehen aber zur Zeit wirtschaftliche Erwägungen entgegen.

Als dritte Möglichkeit sei schließlich diejenige genannt, der für die nähere Zukunft gewisse Chancen eingeräumt werden. Der integrierte Festkörperblock wird unverkappt als elektrische Funktionseinheit in eine Dünnschichtschaltung eingesetzt, die das Leitungsmuster mit sehr viel kleineren Abmessungen trägt, als es

in Druckschaltungstechnik möglich wäre und die noch dazu weitere passive und aktive Bauelemente enthalten kann, z. B. eng tolerierte Widerstände und Kondensatoren, deren Einbeziehung in den Festkörperkreis nicht möglich ist.

Als zweites wichtiges Hindernis, das einer immer weitergehenden Masseverkleinerung der Geräte auch bei noch so kleinen mikroelektronischen Baugruppen im Wege steht, muß der heute noch unvermeidbare Einsatz von Bauelementen genannt werden, die nicht in mikroelektronischer Technik ausführbar und somit wesentlich größer als diese sind. Dazu gehören Übertrager, große und eng tolerierte Induktivitäten, große Kapazitäten usw. Da ein »Ersatz« der Induktivitäten durch bestimmte aufwendige, aber integrierbare Kunstschaltungen sich bisher kaum durchsetzen konnte, bemüht man sich, sie durch geeignete Wahl der Gerätekonzeption überhaupt zu umgehen. Die rein digital arbeitenden elektronischen Rechenautomaten haben hierzu einen Weg gewiesen (vgl. auch Abschnitt 4.3.). Auch die bereits erwähnten teils elektrischen, teils mechanischen Bedienungselemente stellen eine ernste konstruktive Grenze für die Volumenverringerung dar. Diese Verbindungselemente zwischen Mensch und Maschine oder Maschine und Mensch müssen zwangsläufig auf die Fähigkeiten menschlicher Sinnesorgane ebenso Rücksicht nehmen wie auf die Abmessungen menschlicher Glieder. Es ist technisch zwar möglich, leuchtende Flächen mit Abmessungen von wenigen tausendstel Millimetern als Mikro-Signallampe zu realisieren, aber das menschliche Auge kann sie dann nicht erkennen. Ebenso sinnlos wäre eine Verkleinerung von Druck- und Schalterknöpfen, Skalen oder Anschlußsteckern unter einen bestimmten Wert. Dieses Problem ist offensichtlich nur durch eine weit getriebene Automatisierung der Geräte zu lösen, die es erlaubt, bestimmte Bedienungselemente überhaupt fortfallen zu lassen.

Man kann zusammenfassen, daß die Verminderung von Größe und Masse elektronischer Schaltungen sich heute als dringende Notwendigkeit erweist, oft auch in Anwendungsfällen, wo dies auf den ersten Blick nicht erkennbar ist. Die bekannten und angewendeten mikroelektronischen Technologien, speziell die Festkörpertechnik können jedoch hinsichtlich Raumbedarf und Masse bereits in den weitaus meisten Anwendungsfällen alle Wünsche befriedigen. Ehe weitere Schritte in dieser Richtung sinnvoll wer-

den, wird es notwendig sein, der elektrischen und mechanischen Verbindung der Funktionsblöcke mehr Aufmerksamkeit zu schenken, nichtintegrierbare Bauelemente durch geeignete Wahl des Geräteentwurfs weitgehend zu vermeiden und auch hinsichtlich der Bedienelemente vom Konventionellen abweichende Lösungen zu suchen und einzusetzen.

1.1.4. Elektrische Eigenschaften

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf die Forderungen eingegangen, die hinsichtlich der Zuverlässigkeit, einer wirtschaftlichen Fertigung und des Raumbedarfs an moderne Technologien des elektronischen Gerätebaus zu stellen sind. Es mag seltsam anmuten, daß Forderungen, die in elektrischer oder schaltungstechnischer Hinsicht gestellt werden, erst am Schluß zur Debatte stehen. Tatsächlich ergeben sich jedoch gerade in dieser Hinsicht Besonderheiten, auf die im folgenden noch eingegangen wird und die es in einigen speziellen Punkten sogar fragwürdig erscheinen lassen, ob man unsere heutigen Vorstellungen über gute und schlechte Eigenschaften diskreter Bauelemente ohne weiteres auch auf mikroelektronische Funktionsgruppen übertragen darf.
Unumstritten ist die notwendige Zuverlässigkeitserhöhung. Sie ist das Kernproblem, wenn die elektrischen Eigenschaften mikroelektronischer Technologien zur Diskussion stehen. Daneben tritt der Wunsch nach einer möglichst großen »Schnelligkeit« dieser Baugruppen — die gleiche Forderung wird auch an die entsprechenden diskreten Elemente gestellt.
Aus der Sicht der Digitaltechnik bedeutet das möglichst kurze Schaltzeiten und möglichst hohe Rechengeschwindigkeiten der Computer — die einzige Möglichkeit, die heute technisch beherrschbar erscheint, um wachsende Informationsmengen und komplizierte Vorgänge zu bearbeiten. Tatsächlich zeigt sich seit den ersten Jahren der Anwendung elektronischer Rechenmaschinen eine stetig steigende Tendenz in deren Funktionsgeschwindigkeit (Bild 3). Aus der Sicht der Analogtechnik ist die Forderung nach »Schnelligkeit« gleichbedeutend mit der Forderung nach hohen Betriebsfrequenzen der Verstärker, Oszillatoren usw. Auch dieser Wunsch ist durch die Notwendigkeit, in Zukunft viel mehr

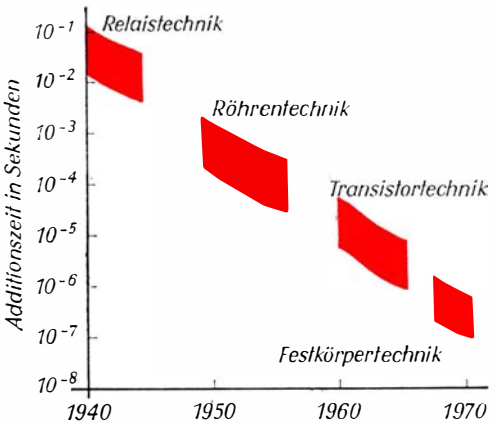


Bild 3
Entwicklung der Funktionsgeschwindigkeit der elektronischen Rechner

als bisher breitbandige Informationen (z. B. Videosignale) übertragen und immer höhere Frequenzbereiche ausnützen zu müssen, technisch durchaus begründet.

Welche Aussichten bietet die Mikroelektronik in dieser Hinsicht? Zunächst muß festgestellt werden, daß die maximalen Betriebsfrequenzen (Grenzfrequenzen) elektronischer Schaltungen in erster Linie von den Eigenschaften der aktiven Elemente, also z. B. den Transistoren, bestimmt werden. Manche Technologien, wie die Dünnschichttechnik, setzen heute noch diskrete Transistoren in die mikroelektronische Schaltung ein, und selbst die Festkörpertechnik in ihrer uns heute bekannten Form verwendet die gleichen technologischen Prinzipien wie für die Herstellung moderner diskreter Transistoren. Die Möglichkeiten der heutigen Mikrotechnologien werden also, zumindest in der Größenordnung, denen der diskreten Halbleiterbauelemente entsprechen. Da die Transistortechnik jedoch in den letzten Jahren bereits in die GHz-Bereiche vorgedrungen ist, ist auch die Herstellbarkeit von Festkörperkreisen in diesen Frequenzbereichen nur eine Frage der Zeit (und in Einzelfällen sogar bereits Realität).

Eine weitere Grenze für die Betriebsfrequenz mancher elektronischer Geräte wird durch die Länge der Verbindungsleitungen gesteckt. Kommt die Zeit, die das zu verstärkende oder zu übertragende Signal zum Durchlaufen der Strecken zwischen zwei

Schaltelementen oder zwei Baugruppen braucht, in die Größenordnung der Periodendauer der Signalfrequenz, so ergeben sich kritische Verhältnisse, die die Funktion der Baugruppe bei noch weiterer Erhöhung der Frequenz in Frage stellen. In dieser Hinsicht verspricht die Mikroelektronik infolge der Kleinheit ihrer Funktionsgruppen tatsächlich Vorteile gegenüber der bisherigen Verdrahtungstechnik. Eine überschlägliche Berechnung zeigt allerdings, daß bei Annahme einer »kritischen Leitungslänge« von einigen Zentimetern Verbesserungen erst im Bereich einiger GHz und höher zu erwarten sind, also im gleichen Frequenzbereich, der gerade heute erst durch Transistor und Festkörperkreis betreten wird.

Als weitere Forderung in elektrischer Hinsicht sei die nach einer minimalen Verlustleistung der einzelnen Funktionsblöcke genannt. Sie erklärt sich leicht aus der Tatsache der ständigen Zunahme der Zahl elektronischer Geräte und Anlagen einerseits und der Komplizierung und Erhöhung des elektrischen Aufwandes in jedem speziellen Gerät andererseits. Auch hier muß jedoch das eben Gesagte sinngemäß wiederholt werden: Da die bekannten aktiven Bauelemente sowohl in diskreter Ausführung als auch in integrierter Bauweise technologisch weitgehend identisch sind, wird man von vornherein keine umwälzenden Verbesserungen der Energiebilanz integrierter Schaltungen gegenüber solchen mit diskreten Halbleiterbauelementen erwarten können. Trotzdem ist gerade diese Eigenschaft der mikroelektronischen Funktionsgruppen von ausschlaggebender Wichtigkeit und stellt eines der Schlüsselprobleme für jede weitergehende Miniaturisierung dar: Wenn es nicht gelingt, mit einer räumlichen Verkleinerung der Baugruppen gleichzeitig die Verlustleistung zu verringern, wird eine schnell anwachsende Verlustleistungskonzentration die Folge sein, die zur Erhitzung und schließlich Eigenzerstörung der Bausteine führt.

Tatsächlich ist die Situation trotz der Ähnlichkeit diskreter und integrierter Transistoren nicht ganz ausweglos. In den bisherigen Schaltungen wurden z. B. die Signalpegel digitaler Baugruppen absichtlich recht groß gehalten (in der Größenordnung mehrerer Volt), um von Stör- und Rauschamplituden weitgehend unabhängig zu sein. Diese Reserve ist nicht unbedingt notwendig, wenn es gelingt, die Störgrößen in geschlossenen kleinen Funktions-

blöcken unter Kontrolle zu halten. Jede Verringerung der Betriebspegel ermöglicht aber eine Verringerung der Wärme erzeugenden Verlustleistung der Baugruppen. Diese Tendenz zur »Nanowatt«- oder »Micro-Power«-Technik, die mit möglichst kleinen Übergabepegeln zwischen den Funktionseinheiten arbeitet, hat nicht nur auf dem Gebiet der digitalen Technik heute bereits Anwendung gefunden.

Als letzte und zugleich problematischste Forderung an die elektrischen Eigenschaften integrierter Schaltungen sei die nach eng tolerierten Bauelementen, speziell Widerständen und Kondensatoren, und einem großen verfügbaren Wertebereich dieser Bauelemente genannt. Wünsche in dieser Hinsicht kommen vor allem von der analogen Schaltungstechnik her, die Filter und Oszillatoren mit hoher Frequenzkonstanz oder Verstärker mit genau definiertem Übertragungsmaß, minimalen Verzerrungen und den verschiedensten Ein- und Ausgangswiderständen verlangt. In den folgenden Abschnitten dieses Buches, die sich näher mit der Dünnschicht- und der Festkörpertechnik beschäftigen, wird gezeigt, daß nur die erstgenannte Technologie diesen Forderungen in gewissen Grenzen nachkommen kann. Die auf Diffusionstechnologien aufbauende Festkörpertechnik ist als die fortgeschrittenste mikroelektronische Technologie jedoch nicht in der Lage, hochkonstante passive Bauelemente zu verwirklichen, und — was wesentlich ist — es besteht kaum Aussicht, daß sich auch in Zukunft an dieser Situation etwas ändert. Es ist eher wahrscheinlich, daß zukünftige Technologien sich noch weiter von dem Begriff des diskreten Bauelements entfernen werden und damit eine möglichst gute Nachbildung der heutigen Schaltelemente immer weniger und schließlich gar nicht mehr zur Diskussion stehen wird.

Diese Tatsachen zwingen zur Überprüfung unseres Standpunktes. Sind nicht unsere Forderungen lediglich traditionsgebunden aus der Technik der diskreten Elemente unberechtigt in das Gebiet der mikroelektronischen Schaltungen, speziell der Festkörperschaltungen, hinübergetragen? Ist es nicht natürlich, daß die Festkörpertechnik, die von der Transistortechnologie und daher primär vom aktiven Bauelement ausgeht, andere Bedingungen stellt als die bisherige Technik, die zur Erreichung eines minimalen Aufwandes stets die Zahl der aktiven Elemente — Röhren, Tran-

sistoren — so niedrig wie möglich hielt und dafür lieber eine Vielzahl hochwertiger passiver Bauelemente einsetzte?
Beide Fragestellungen werden heute bejaht, und diese Antwort führt zwangsläufig zu einer für den Geräteentwickler sehr wichtigen Schlußfolgerung: Die modernen und zukünftigen Gerätetechnologien dürfen nicht nur aufgefaßt werden als verbesserte, kleinere, zuverlässigere Weiterentwicklungen unserer jetzigen Technik. Sie sind der erste Schritt auf einer völlig neuen Ebene. Ihr technisch und wirtschaftlich sinnvoller Einsatz gestattet nicht einfach eine Umbestückung der bisher transistorisierten Geräte. Es wird vielmehr ein vollständiges Neudurchdenken der System- oder Gerätekonzeption notwendig, wie sie bisher weder bei der Umstellung auf die Druckschaltungstechnik noch beim Übergang von der Röhren- zur Transistortechnik erforderlich war. Auch auf diese für den zukünftigen umfassenden Einsatz mikroelektronischer Technologien außerordentlich wichtige Problematik wird in Abschnitt 4. noch eingegangen werden.

1.2. Entwicklung der Schaltungsintegration

1.2.1. Gedruckte Schaltungen

Die erste Stufe einer Schaltungsintegration stellt bereits die gedruckte (oder besser: geätzte) Schaltung dar. Sie enthält zwar noch sämtliche Bauelemente in konventioneller, diskreter Form, die Verbindungen zwischen ihnen sind jedoch mit Hilfe einer Maskentechnik automatisch und damit stets wiederholbar hergestellt — aus der individuellen Verdrahtung ist ein reproduzierbares, zweidimensionales Leitungsmuster geworden. Die Maskentechnik als Mittel zur beliebigen automatischen Vervielfältigung (in diesem Falle der Leitungszüge, allgemeiner der Schaltung im Ganzen) wird direkt als kennzeichnende Eigenschaft einer integrierten Schaltung angegeben.
Auf die technische Realisierung der gedruckten Schaltung braucht an dieser Stelle kaum näher eingegangen zu werden. Sie hat sich in den vergangenen Jahren in einem so großen Umfang durchgesetzt, daß ihre hauptsächlichen Verfahren, wie der Siebdruck

und die Fotoätztechnik, heute ebenso allgemein bekannt sind wie ihre wesentlichen Eigenschaften und Anwendungsgebiete. Erwähnenswert ist vielleicht, daß bereits während des zweiten Weltkrieges in dem heutigen VEB Keramische Werke Hermsdorf eine Zusammenfassung mehrerer Schwingkreisinduktivitäten und -kapazitäten auf einer keramischen Trägerplatte in einer sehr ähnlichen Technologie erfolgte; die Verbindungsleitungen wurden damals als Silberbelag aufgebracht und eingebrannt.
Die heute übliche Druckschaltungstechnik entstand zu Beginn der fünfziger Jahre und hatte sich in weniger als einem Jahrzehnt im elektronischen Gerätebau durchgesetzt. Es war naheliegend, auf der Grundlage dieser Technik zu versuchen, die Technologie der Herstellung kompletter Baugruppen oder auch deren wesentliche Eigenschaften, wie Zuverlässigkeit, Kleinheit usw., zu verbessern. Von den vielen Versuchen und Zwischenstadien seien im folgenden zwei herausgegriffen und betrachtet: die Subminiaturtechnik und die Mikromodultechnik.

1.2.2. Subminiaturtechnik

Mit Hilfe der sogenannten Subminiaturtechnik wird versucht, auf der Grundlage konventioneller Verfahren (d. h. der Technik der gedruckten Leiterplatten und diskreter Bauelemente) abgeschlossene Funktionsgruppen elektronischer Geräte mit möglichst kleinen geometrischen Abmessungen vorzufertigen und diese Funktionsblöcke dann als konstruktive Einheit der Geräteentwicklung zugrunde zu legen. Es werden etwa 10 diskrete passive und aktive Elemente (Transistoren) in dichter Packung, meist senkrecht stehend, in einem Baustein vereinigt. Durch eine interne kleine Leiterplatte werden sie mechanisch fixiert und elektrisch verbunden und in der Regel mit einem Kunstharz zu einem geschlossenen Block von etwa 1 bis 2 cm Kantenlänge vergossen.
Vor der Einführung der Dünnschicht- und Festkörpertechnik war dieser Weg begründet. Noch zu Beginn der sechziger Jahre bot deshalb eine Vielzahl von Firmen in der Welt unter den verschiedensten Bezeichnungen derartige Bausteine an. Mit dem steigenden Einfluß mikroelektronischer Baugruppen sank jedoch ihre Bedeutung immer mehr ab. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind die Universalsubminiaturblocks (die vorwiegend als Digitalbau-

steine für logische Schaltungen zur Verfügung standen, aber auch als vielseitig einsetzbare Breitbandverstärker usw.) praktisch vollständig vom Markt verschwunden und vorwiegend durch Festkörperschaltungen ersetzt worden. Lediglich bestimmte Bausteine der analogen Technik werden von den einzelnen Firmen speziell für ihre eigene Gerätefertigung noch entwickelt und hergestellt. Aber auch sie werden in absehbarer Zeit zum überwiegenden Teil der Dünnschicht- und Festkörpertechnik weichen müssen.
Da jedoch auch in Zukunft immer noch bestimmte elektronische Baugruppen mit diskreten Elementen aufgebaut werden, scheint es sinnvoll, die Vor- und Nachteile dieser Technik zusammenzustellen und zu diskutieren.

Vorteile des Subminiatur-Funktionsblocks

Die Packungsdichte und damit Raumausnutzung ist durch die gedrängte senkrechte Anordnung der Bauelemente größer als bei der üblichen Druckschaltungstechnik (vgl. Bild 2). Abgesehen von einer Verkleinerung des Gesamtgerätes selbst bringt diese Tatsache dem Konstrukteur dadurch Vorteile, daß er mit einem eingesetzten Funktionsblock weniger Fläche auf einer Leiterplatte belegt. Da Leiterplattenfläche teuer ist, folgt für ihn daraus ein ökonomischer Gewinn. Die mechanische Festigkeit und Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse sind bei einem vergossenen Funktionsblock besser als bei freistehenden, oft nur an den dünnen Zuleitungsdrähten aufgehängten Einzelelementen. Diese Eigenschaft ist bei Geräten, die hohen Stoß- und Schüttelbelastungen oder klimatischen Einflüssen ausgesetzt sind, besonders wichtig. Kann der Entwicklungsingenieur im Handel befindliche Funktionsblöcke einsetzen, spart er darüber hinaus eigene Entwicklungszeit ein. Schließlich besteht die prinzipielle Möglichkeit, sämtliche neu auf dem Markt erscheinenden diskreten Bauelemente (sofern sie klein genug sind) sofort in derartigen Funktionsblöcken einsetzen zu können.

Nachteile des Subminiatur-Funktionsblocks

Durch die notwendigen Zwischenverbindungen innerhalb des Funktionsblocks steigt insgesamt die Anzahl der Lötstellen und

damit die Wahrscheinlichkeit eines Defekts. Verschiedentlich wurden deshalb bereits innerhalb des Funktionsblocks die Verbindungen geschweißt (da ja eine Reparatur ohnehin nicht möglich ist). Die Zuverlässigkeit eines Blocks ist kaum größer als die einer gleichartigen konventionellen Schaltung, denn es werden ja die gleichen Bauelemente verwendet. Darüber hinaus hat sich gezeigt, daß jede übertriebene Miniaturisierung konventioneller Bauelemente deren Zuverlässigkeit verringert; es wächst ja z. B. mit kleiner werdendem Bauelement die thermische Belastung immer mehr an. Dem Schutz der Bauelemente durch die Vergußmasse steht eine beträchtliche Masseerhöhung gegenüber. (Allerdings wurden auch unvergossene Funktionsblöcke gebaut; diese erfordern jedoch wiederum einen höheren Aufwand zur Fixierung der Bauelemente.) Schließlich zeigte es sich, daß der Preis eines solchen Funktionsblocks stets größer ist als der der eingeschlossenen Bauelemente, denn der Zusammenbau läßt sich schwer, oder gar nicht automatisieren und erfordert im Gegenteil recht oft diffizile Handarbeit. Damit sind wirkliche ökonomische Vorteile nur durch die evtl. Einsparung von Entwicklungszeit oder Leiterplattenfläche zu erwarten.

Betrachtet man diese Zusammenstellung der Vor- und Nachteile der Subminiaturtechnik, so wird die eingangs geäußerte kritische Einstellung zu dieser Technik verständlich. Sämtliche der genannten Vorteile werden in noch viel stärkerem Maße von den modernen mikroelektronischen Technologien ebenfalls geboten, mit Ausnahme lediglich des zuletztgenannten Vorteils der unmittelbaren Einsatzmöglichkeit jedes neuentwickelten diskreten Bauelements. Gerade dieser Gesichtspunkt ist jedoch inzwischen völlig unwichtig geworden, da die modernsten auf dem Markt erscheinenden Bauelemente Halbleiterelemente sind, die in ihrer Technologie der Festkörpertechnik viel näher stehen und sich nur mit großem zusätzlichem Kostenaufwand (Verkapselung, Anschweißen von Zuleitungsdrähten usw.) als diskrete Bauelemente darstellen lassen. Die Nachteile des Subminiaturblocks dagegen hatten schon in seiner »Blütezeit« nur einen recht zögernden Einsatz in der zivilen Elektronik zur Folge (für die militärische Technik war trotz finanzieller Nachteile seine mechanische Robustheit von einiger Bedeutung). Neben den modernen mikroelektronischen Funktionsblöcken wird sich deshalb heute die Subminiaturbauweise nur für

ganz spezielle Zwecke noch sinnvoll einsetzen lassen, z. B. für bestimmte Baugruppen der Steuer- und Regeltechnik, deren Leistungsbedarf die Möglichkeiten der Dünnschicht- und Festkörpertechnik übersteigt, oder für Baugruppen, die eine Vielzahl nichtintegrierbarer diskreter Elemente fordern.

1.2.3. Modul- und Mikromodultechnik

Die Modultechnik entstand als »Projekt Tinkertoy« etwa um 1950 in den USA. Als Grundeinheit dienten etwa einen Quadratzoll große keramische Plättchen, die an ihrem Umfang mehrere metallisierte Nuten aufwiesen. Jedes dieser Plättchen trug ein einzelnes Bauelement der gewünschten Schaltung, und die Anschlüsse der Elemente waren als metallische eingebrannte Leiterbahnen an jeweils festgelegte Nuten geführt. Während Widerstände durch Aufbringen einer geeigneten Paste in Siebdrucktechnik hergestellt wurden, wickelte man kleine Induktivitäten auf Ringkerne von wenigen Millimetern Durchmesser und legte sie in Ausbrüche des Plättchens ein. Die zu einer Funktionsgruppe gehörenden Plättchen wurden übereinander gestapelt (das oberste trug in der Regel die Röhrenfassung), durch in die Nuten gelegte und verlötete Steigdrähte schließlich elektrisch und mechanisch zu einer Einheit verbunden und vergossen.

Diese Konstruktion hatte den zunächst bestechenden Vorzug, aus einigen in den äußeren Abmessungen standardisierten Einzelelementen fast beliebige Schaltungen zu Funktionsblöcken zusammenfügen zu können. Im Ergebnis entstand eine recht kompakte und daher auch mechanischen Beanspruchungen gewachsene Einheit, die allerdings bei einem Defekt eines der Einzelelemente ebenfalls nicht mehr reparierbar war.

Die Modultechnik wurde, ehe sie zur Fertigungsreife gelangte, durch das unaufhaltsame Vordringen des Transistors überholt. Die Abmessungen der Plättchen, auf die Geometrie der Elektronenröhre zugeschnitten, erwiesen sich als viel zu groß. So entstand aus der Modultechnik bereits wenige Jahre später (wiederum als rein militärische Auftragsentwicklung) die Mikromodultechnik — das gleiche Prinzip, aber mit nur noch etwa 10 mm × 10 mm großen und wenige zehntel Millimeter dicken Keramikplättchen als

Bauelementeträger. Als Vorteile dieser Technik wurden die verhältnismäßig hohe erreichbare Bauelementedichte angegeben (es wurden Spitzenwerte von 10 Bauelementen cm^{-3} erreicht, in der Regel war die Dichte des vergossenen Blocks aber nur 2 . . . 3 Elemente/cm^3; das waren übrigens die gleichen Werte, die auch die Subminiaturbauweise erreichte), die mechanische Kompaktheit der Bausteine sowie eine Zuverlässigkeitserhöhung. (Die Zuverlässigkeit der amerikanischen Mikromodulsteine war etwa 10fach größer als die entsprechender konventioneller Schaltungen.)
Trotz dieser Vorteile ist die Mikromodultechnik weder in den USA noch in irgendeinem anderen Land jemals in das Stadium der Serienfertigung getreten, und zwar aus folgenden Gründen: Wie bereits erwähnt, war die von ihr erreichte Bauelementedichte genausogut und viel billiger durch eine dichte Packung diskreter konventioneller Bauelemente in Subminiaturtechnik erreichbar. Die höhere Zuverlässigkeit war zwar für den Anwender außerordentlich interessant, es stellte sich jedoch bald heraus, daß der dazu notwendige technologische Aufwand sehr hoch war und die Kosten der Bausteine dadurch viel höher lagen als die äquivalenter Baugruppen in Druckschaltungstechnik. Ohne diese zusätzlichen Aufwendungen war jedoch logischerweise die Zuverlässigkeit der Mikromodule kaum höher als die der konventionellen Schaltung, denn auch hier wurden ja im Prinzip die gleichen Bauelemente verwendet. Dem höhere Zuverlässigkeit versprechenden mechanisch starren Aufbau stand der Nachteil der Vielzahl der unzuverlässigen Lötverbindungen zwischen Nuten und Steigdrähten gegenüber. (Es ist übrigens nie gelungen, die Automatisierung dieses Lötvorganges zu beherrschen.)
Der Einsatz der Mikromodultechnik erfolgte deshalb lediglich in einigen militärischen Testgeräten. Der Versuch einiger europäischer Firmen, sie für den zivilen Markt konkurrenzfähig zu machen, scheiterte nach kurzer Zeit. Auch diese Technik konnte neben den sich entwickelnden mikroelektronischen Technologien nicht bestehen und ist heute nur noch von historischem Interesse.

1.2.4. Dünnschicht- und Festkörpertechnik

In den letzten Jahren ist die Mikroelektronik weit über das hinausgegangen, was eben am Beispiel der Druckschaltungstechnik,

der Subminiaturtechnik und der Mikromodultechnik gezeigt wurde. Wenn heute von modernen mikroelektronischen Technologien die Rede ist, dann sind vor allem zwei Richtungen gemeint: die Filmtechnologien, vor allem die Dünnschichttechnik, und die Festkörpertechnik (auch Halbleiterblocktechnik genannt). Von diesen beiden ist vorwiegend die Festkörpertechnik diejenige, von der auch in den folgenden Jahren eine immer stärkere Einflußnahme auf den elektronischen Gerätebau erwartet wird und die letzten Endes auch der Ausgangspunkt für eine noch weiter entwickelte, zukünftige Technologie sein wird.

In beiden Technologien ist das bereits bei der Subminiaturtechnik und der Mikromodultechnik besprochene Prinzip wiederum realisiert, die integrierte Schaltung auch mechanisch als geschlossenes Ganzes zu betrachten. An die Stelle des diskreten Bauelementes ist somit nunmehr mit allen Konsequenzen die Funktionsgruppe als nicht mehr reparierbare kleinste Einheit getreten. Wird auch nur eines ihrer Elemente defekt, muß sie als Ganzes weggeworfen und ersetzt werden. Es ist logisch, daß dieses Prinzip die Fehlersuche und -beseitigung in komplizierten Geräten vereinfacht, andererseits aber eine wesentlich höhere Zuverlässigkeit der Funktionsgruppe erfordert, als sie in der konventionellen, reparierbaren Technik erreichbar war, wenn es wirtschaftlich sein soll. Erst durch die Anwendung der modernen mikroelektronischen Technologien war es möglich, diese Forderungen zu erfüllen.

Diese wenigen einführenden Sätze über beide Technologien mögen an dieser Stelle genügen. Auf die hier nur berührten oder gar nicht angeschnittenen Fragen von der Herstellung der mikroelektronischen Bausteine bis zu ihrer Anwendung in der Gerätetechnik wird in den folgenden Abschnitten noch ausführlicher eingegangen.

2

Dick- und Dünnschichtschaltkreise

Definition: Dick- und Dünnschichtschaltkreise[1] sind alle Anordnungen, bei denen die für eine bestimmte Schaltung notwendigen Bauelemente zusammen mit den Verbindungsleitungen in Form von mehr oder weniger dünnen Schichten auf einem gemeinsamen Träger untergebracht sind.

Formen: Der Unterschied zwischen dem Dickschicht- und dem Dünnschichtschaltkreis liegt im wesentlichen in den unterschiedlichen Technologien und den daraus resultierenden, an die herzustellende Stückzahl gebundenen, ökonomischen Gegebenheiten. Eine naheliegende, der Bezeichnung entsprechende Unterteilung nach der Schichtdicke ist wegen des fast kontinuierlichen Überganges nur in grober Näherung möglich. Als Richtwerte können etwa 25 µm für den Dickschicht- und 0,1 µm für den Dünnschichtschaltkreis gelten. Anstelle der Bezeichnung Dünnschichtschaltkreis ist auch der Ausdruck Dünnfilmschaltkreis geläufig.

Die Dickschichtschaltkreise ähneln in vielen Punkten der gedruckten Schaltung; neben den Leiterzügen sind jedoch auch passive Bauelemente auf der isolierenden Trägerplatte angeordnet. Dieser Träger, für den in der integrierten Technik die Bezeichnung Substrat üblich ist, besteht aus einem keramischen Werkstoff und weist Kantenlängen von einigen Zentimetern auf. Die zu einem bestimmten Schaltungsmuster gehörenden Leiterzüge und Bau-

[1] Wenn bisher und auch in späteren Abschnitten vor allem von der Dünnschicht- oder auch Dünnfilmtechnik gesprochen wird, so deshalb, weil diese Begriffe im Sprachgebrauch wesentlich geläufiger sind. In diesem den beiden Techniken speziell gewidmeten Abschnitt finden korrekterweise die beiden unterteilenden Bezeichnungen „Dick-" bzw. „Dünnschichttechnik" Verwendung. Die in der jeweiligen Technologie hergestellten Schaltkreise werden in der gleichen Weise unterschieden

elemente werden mit Emulsionen auf der Basis von Metallen, Metalloxiden und verschiedener Dielektrika als Schichten auf das Substrat gedruckt. Die Eigenschaften der eingebrannten Druckpasten und die geometrischen Abmessungen der einzelnen Schichten bestimmen die Kennwerte der verschiedenen Elemente und damit des gesamten Schaltkreises. Halbleiterbauelemente lassen sich nicht unmittelbar im Schaltkreis verwirklichen; sie können jedoch ebenso wie auch andere diskrete Bauelemente in einfacher Weise zugesetzt werden.

Die Dünnschichtschaltkreise weisen annähernd die gleichen elektrischen Eigenarten auf wie die Dickschichtschaltkreise. Bei der Herstellung werden jedoch nicht die einfachen Siebdrucktechnologien angewandt, sondern wesentlich präzisere Verfahren, die natürlich einen höheren Aufwand erfordern. Sie ermöglichen eine erheblich feinere Struktur und damit neben der Anpassung an verschiedene technische und ökonomische Bedingungen eine zweckmäßige Kombination zwischen Schicht- und Halbleitertechnik. Diese Kombination hat vor allem deshalb eine herausragende Bedeutung, weil gegenwärtig auch in Dünnschichtschaltkreisen noch keine aktiven Elemente hergestellt werden können und andererseits die Verwirklichung eng tolerierter und stabiler Widerstände und Kondensatoren in Festkörperschaltkreisen beträchtliche Schwierigkeiten bereitet.

Die Substrate haben in der Regel Kantenlängen zwischen wenigen Millimetern und wenigen Zentimetern und müssen beispielsweise hinsichtlich der Oberflächenstruktur sehr hohen Ansprüchen genügen, weil die Schichtstruktur und damit die Eigenschaften der nur wenige Atomlagen dicken Schicht sehr wesentlich von der Beschaffenheit der Substratoberfläche abhängen. Je nach der Art und Weise des Zusatzes der Transistoren und Dioden werden vorwiegend Glas- oder Halbleitersubstrate verwendet.

Für die Verbindung mit Transistoren und Dioden bieten die Dünnschichttechnologien mehrere Möglichkeiten. Die z. Z. häufigste Variante ist die Dünnschicht-Hybrid-Technik; das Einfügen der Halbleiterbauelemente erfolgt hier in einer zweckmäßigen konventionellen Bauweise oder in Form von Chips unmittelbar in den Schaltkreis. Bei anderen Hybridtechniken werden sie entweder unter der Ebene der Dünnschichtschaltung, die sich auf einer isolierenden Zwischenschicht — z. B. Siliziumdioxid oder Silizium-

nitrid — befindet, in das Halbleitersubstrat eindiffundiert oder als Chip neben dem Dünnschichtsubstrat angeordnet. Die geeignetsten Elemente für Dünnschichtschaltkreise sind sicher aufdampfbare Transistoren und Dioden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist diese interessante Form technisch jedoch noch nicht zu verwirklichen.

In der Mehrzahl der Fälle werden Dünnschichtschaltkreise in eine Kunststoffhülle eingeschlossen. Die Anschlüsse befinden sich an einer oder an beiden Längsseiten des rechteckigen Gebildes. Für passive Schaltkreise kleinerer Abmessungen und Hybridschaltkreise mit nicht separat verkappten Halbleiterbauelementen sind auch dichte Flach- und TO-Rundgehäuse üblich, wie sie für Festkörperschaltkreise Verwendung finden.

Anwendung: Die Dickschichtschaltkreise kommen in all den Fällen zur Anwendung, wo geringe Stückzahlen mit geringstem Aufwand an Fertigungsvorbereitung herzustellen sind. Die einfachen Herstellungstechnologien ermöglichen eine enge Kopplung zwischen Schaltkreis- und Gerätefertigung. Für Schaltungen mit hohem Leistungsumsatz oder hoher Grenzfrequenz sind Dickschichtschaltkreise z. Z. nahezu unentbehrlich.

Dünnschichtschaltkreise genügen den gleichen Bedingungen, erfordern jedoch z. Z. noch einen höheren Aufwand für die Fertigungsvorbereitung. Sie befriedigen höhere Forderungen hinsichtlich Miniaturisierungsgrad und Zuverlässigkeit. In aktiver Form sind Dünnschichtschaltkreise bei einer weiteren Steigerung in diesen Punkten in der gleichen Weise einsetzbar wie Festkörperschaltkreise.

2.1. Grundlagen

Die Oberflächen der Substrate sind bei näherer Betrachtung weit weniger glatt, als das zunächst den Eindruck erweckt; unter dem Mikroskop können sie sich als wahre Gebirge erweisen. Auch die glänzende und schillernde Schicht auf dem Substrat ist meist alles andere als die homogene »Folie«, für die sie zunächst angesehen wird. Die sich bei näherem Hinsehen zeigende Struktur der Schichten und Grenzschichten sowie die sich darin abspielenden Vorgänge haben einen wesentlichen Einfluß auf das Verhal-

ten und die Kennwerte der aufgebrachten Schaltungselemente, vor allem jedoch der Dünnschichtelemente. Ein Einblick in die in dünnen Schichten wirksamen Mechanismen läßt manches sonst unerklärliche, vom massiven Material abweichende Verhalten in einem anderen Licht erscheinen. Aus diesem Grunde folgen anschließend zwei Abschnitte, die sich mit der Struktur und den Vorgängen in den Schichten und dem Substrat befassen. Für einen anfänglichen Überblick ist eine Einarbeitung in diese Problematik nicht unbedingt erforderlich.

2.1.1. Struktur und Verhalten der Schichten

Die für die verschiedenen Technologien in Betracht kommenden Schichten haben fast ausnahmslos eine polykristalline Struktur. Bei derartigen Schichten treten zu den immer vorhandenen Oberflächeneffekten Erscheinungen, die durch die Vorgänge an den Korngrenzen verursacht werden. Diese haben einen wesentlichen Einfluß auf die Reproduzierbarkeit und Stabilität der Schichten. Für Dünnschichtschaltkreise brauchbare Schichten sind nur zu erwarten, wenn die Einzelkristalle wesentlich kleiner sind als die Schichtabmessungen, die Größe der Einzelkristalle von Schicht zu Schicht nahezu gleich ist und an den Korngrenzen keine nachträglichen Veränderungen auftreten. Eine Betrachtung der Vorgänge in aufgedampften Schichten fördert das Verständnis für diese Problematik.

Dünne Schichten entstehen auch auf einer idealen Oberfläche, wie sie die ungestörte Einkristallebene darstellt, nicht gleichmäßig. Die bei einer Bedampfung auf das Substrat auftreffenden Atome bilden zunächst Kondensationszentren, welche bei einem längeren Anhalten des Vorganges erst allmählich zu geschlossenen Schichten zusammenwachsen. Kondensationszentren entstehen dort, wo zwei oder mehr Atome an der gleichen Stelle oder in unmittelbarer Nähe auf das Substrat auftreffen und Bindungen miteinander eingehen. In diesem Fall ist die Wahrscheinlichkeit am geringsten, daß die auftreffenden Atome durch die unter dem Einfluß der Wärmeenergie schwingenden Substratatome wieder abgestoßen werden. Die Bewegungsenergie der Substratatome wächst mit der Temperatur des Substrats. Der Schwellwert, bei

dem der Abstoß erfolgt, hängt stark von der Intensität des auftreffenden Dampfstrahles, vom Schichtmaterial und den Eigenschaften und der Oberfläche des Trägermaterials ab. Die Wahrscheinlichkeit des Abgestoßenwerdens sinkt mit der Zahl der sich zusammenlagernden Atome. Energiestöße der Substratatome, die den für einen Abstoß erforderlichen Schwellwert nicht erreichen, unterstützen eine Verlagerung der Schichtatome und führen damit zu Veränderungen der Schichteigenschaften. Bei nicht idealen Oberflächen, wie sie praktisch immer vorliegen, treten Stellen hoher Bindung auch an Rissen, Spitzen, Kanten und eingelagerten Fremdatomen auf; neben den statistisch verteilten Kondensationszentren bilden sich Zentren vor allem an diesen Stellen. Bei sehr dünnen Schichten, die das Substrat nicht vollständig bedecken, wandern im Laufe der Zeit alle Atome unter dem Einfluß einer mehr oder weniger hohen Temperatur zu diesen Zentren. Dieser Umstand führt zu einer allmählichen Beruhigung und Stabilisierung der Schicht. Das gleiche Ergebnis haben bei dickeren, geschlossenen polykristallinen Schichten Veränderungen in den Korngrenzen, die auf das Bestreben der größeren Kristalle, auf Kosten der kleineren zu wachsen, zurückzuführen sind. Die Korngrenzen werden durch Verunreinigungen im Schichtmaterial sowie durch die Oberflächenbeschaffenheit und die Temperatur des Substrats beeinflußt.

Die Zeit bis zur Beruhigung der Schicht ist in starkem Maße temperaturabhängig. Bei einer geeigneten Temperaturerhöhung klingen sowohl die Oberflächenwanderung als auch die Korngrenzenveränderungen beschleunigt ab. Dieser Umstand wird zur »künstlichen« Alterung genutzt.

Bei amorphen Schichten haben Erscheinungen, wie sie eben dargestellt wurden, naturgemäß keine Bedeutung. Es ist jedoch noch nicht gelungen, solche Schichten für die Dünn- bzw. Dickschichttechnik zu nutzen.

Die physikalischen Eigenschaften dünner polykristalliner Schichten weichen erheblich von denen des massiven Materials ab. Oberflächeneffekte, die beim massiven Material überdeckt sind, bestimmen mit abnehmender Schichtdicke in steigendem Maße die Materialeigenschaften. An dieser Stelle erscheint vor allem die in Bild 4 am Beispiel einer Nickelschicht veranschaulichte beachtliche Erhöhung des spezifischen Widerstandes bemerkenswert.

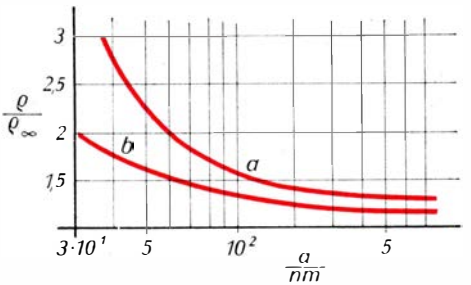


Bild 4
Abweichung des spezifischen Widerstandes ϱ dünner Nickelschichten vom spezifischen Widerstand ϱ_∞ des massiven Materials
a Schicht ohne Nachbehandlung,
b durch Temperaturbehandlung künstlich gealterte Schicht

Bei dickeren, geschlossenen Schichten, die als eben betrachtet werden können, läßt sich dieses Verhalten auf Einschränkungen in der Beweglichkeit der freien Elektronen zurückführen. Die Beweglichkeit ist u. a. eine Funktion der mittleren freien Weglänge der Elektronen und bestimmt direkt den spezifischen Widerstand ϱ des Materials. Die freie Weglänge hängt bei massiven Materialien im wesentlichen von den Abständen der Ionen im Metallgitter und ihrem Stoßquerschnitt (Wirkungsquerschnitt) für Elektronen ab. Für Silber nennt die Literatur bei 0 °C eine mittlere freie Weglänge von etwa 52 nm. Wenn die Schichtdicke in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge liegt, trifft eine Anzahl der freien Elektronen auf die Begrenzungsflächen. Dadurch verkürzt sich die mittlere freie Weglänge, und der spezifische Widerstand des Materials wächst.

Mit abnehmender Schichtdicke, besonders dann, wenn die Schicht das Substrat nicht mehr vollständig bedeckt, gewinnen die Übergänge an den Korngrenzen einen zunehmenden und im Extremfall einen bestimmenden Einfluß. Vor allem diesem Einfluß sind die erheblichen Auswirkungen einer Temperaturbehandlung, wie sie in Bild 4 zu erkennen sind, zuzuschreiben.

Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes ist in gleicher Weise wie der spezifische Widerstand selbst in starkem Maße von der Schichtdicke abhängig. Während massive Metalle und dicke Schichten im allgemeinen einen positiven Temperaturkoeffizienten aufweisen, ist bei sehr dünnen Schichten ein negativer Temperaturkoeffizient feststellbar.

Neben den bisher genannten Erscheinungen machen sich bei dünnen Schichten häufig Effekte bemerkbar, die auf chemische Re-

aktionen an den sehr einflußreichen Oberflächen zurückzuführen sind. Schutzschichten, beispielsweise aus Siliziummonoxid, bieten die Möglichkeit, die Reaktionen mit der Atmosphäre, dem Trägermaterial und anderen Schichtmaterialien in Grenzen zu halten.

2.1.2. Trägermaterialien

Anforderungen an das Trägermaterial

Dünn- und Dickschichtschaltkreise vereinigen auf einem gemeinsamen Träger eine Reihe verschiedener Bauelemente. Dadurch ist, wie bei allen integrierten Schaltkreisen, die beim Aufbau konventioneller Bauelemente bereits sehr komplizierte Anpassung des Trägermaterials an die speziellen Bedingungen eines jeden Bauelements ausgeschlossen oder zumindest erheblich eingeschränkt. Zu den daraus resultierenden Problemen kommen solche, die sich aus dem Aufbau und der Gestaltung des Schaltkreises ergeben. Die Forderungen an das Trägermaterial sind deshalb sehr vielgestaltig. Die nachstehende Zusammenstellung enthält die wesentlichsten:

geringe Oberflächenrauhigkeit,
hohe Wärmeleitfähigkeit,
angemessener Wärmeausdehnungskoeffizient,
gutes Adhäsionsvermögen,
gleichmäßige und gleichbleibende Zusammensetzung und Struktur,
chemische Beständigkeit,
hoher spezifischer Widerstand,
Formbeständigkeit bei Temperaturbelastung und Feuchtigkeitseinfluß,
befriedigende Wechselstromeigenschaften (tan δ, ε, μ),
ausreichende mechanische Festigkeit,
leichte Formbarkeit,
niedrige Kosten.

Die Beschaffenheit der Oberfläche bestimmt im beträchtlichen Maße die Kennwerte der aufgebrachten Schichten und damit der herzustellenden Schaltelemente. Eine zu große Rauhigkeit kann

für eine gewählte Technologie die Herstellung bestimmter Elemente vollkommen ausschließen, weil beispielsweise Unebenheiten im Belag eines Kondensators zu hohen Feldstärken und letztlich zum Durchbruch führen können. In der Regel muß die Rauhtiefe erheblich kleiner sein als die Schichtdicke. Aus dieser Forderung ergeben sich für die verschiedenen Technologien Werte in der Größenordnung von wenigen Nanometern bis zu etwa einem Mikrometer. Der Wärmeabfuhr kommt bei der Konzentration der Schaltelemente in der integrierten Technik eine besondere Bedeutung zu. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Trägermaterials ist deshalb in den meisten Fällen Voraussetzung für die Herstellung zuverlässiger integrierter Schaltkreise mit den vor allem aus ökonomischen Gründen notwendigen geringen Abmessungen.

Der Grad, in dem das Trägermaterial den außerdem genannten Forderungen genügt, hat, abgesehen von den Fragen der mechanischen Festigkeit, der Bearbeitbarkeit und der Kosten, ebenfalls direkt oder indirekt Einfluß auf die Parameter der Schaltelemente. Der thermische Ausdehnungskoeffizient wirkt sich vor allem auf den Temperaturkoeffizienten (TK) der Widerstände aus, die chemischen Eigenschaften beeinflussen über die in die Schichten driftenden Ionen die Stabilität der Kennwerte, und die elektrischen Verluste des Trägermaterials sind bei Schaltkreisen für höhere Frequenzen von entscheidender Bedeutung.

Eine leichte und für eine maschinelle Verarbeitung geeignete Formbarkeit hat schließlich erhebliche Auswirkungen auf die Gesamttechnologie und damit auf die Kosten der Schaltkreise.

Eigenschaften von Trägermaterialien

Tabelle 2 veranschaulicht die Eigenschaften einiger charakteristischer Materialien. Ergänzend dazu sind einige Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Materialien notwendig.

Gläser entsprechen in dieser Hinsicht den Vorstellungen am besten. Für sehr geringe Schichtdicken sind sie nach dem gegenwärtigen Stand der Technik die einzigen wirtschaftlich nutzbaren Substrate. Mit feuerpoliertem Glas lassen sich Rauhtiefen von etwa 5 nm erreichen.

Für geläppte Keramikoberflächen sind nach dem derzeitigen Entwicklungsstand Rauhigkeiten von etwa 250 nm die Grenze des in der Fertigung Erreichbaren. Werte um 1 µm sind als Standard zu betrachten. Sehr hohe Anforderungen lassen sich nur mit größter

Sorgfalt und beträchtlichem Kostenaufwand verwirklichen. Die Gefahr von Mikrorissen ist dabei in der Massenfertigung kaum auszuschließen. Ein weiterer Nachteil des Läppens ist bei gesinterter Keramik die Zerstörung der sehr vorteilhaften dichten Preßhaut.

Glasierte Keramik kann eine für die meisten Anwendungen befriedigende Rauhtiefe bieten. Wegen der durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung bedingten Oberflächenstörungen kann sie jedoch bei sehr dünnen Schichten nicht mit feuerpolierten Gläsern konkurrieren.

Keines der in Betracht gezogenen Materialien erfüllt demnach alle genannten Forderungen, so daß Kompromisse notwendig sind. Für Schaltkreise mit niedriger Verlustleistung, die im allgemeinen geringe geometrische Abmessungen aufweisen sollen und demzufolge dünne, schmale Schichten erfordern, ist z. Z. Aluminiumsilikat- bzw. Borsilikatglas am geeignetsten. Speziell für Schaltkreise höherer Verlustleistung kann auch eine glasierte Keramik den Erfordernissen angepaßt sein. Für Schichten, wie sie in der Dickschichttechnik zur Anwendung kommen, ist die Rauhtiefe einer unglasierten Keramik, eventuell in geläppter Form, ausreichend. Auf Grund des besseren Wärmeleitvermögens und der besseren maschinellen Formbarkeit kommt hier überwiegend dieses Trägermaterial zum Einsatz.

In Sonderfällen, z. B. bei der Herstellung kleiner Stückzahlen, kann Glaskeramik, wie sie sich als Fotoceram bzw. Fotoform im Angebot befindet, vorteilhaft sein. Dieser fotoempfindliche Werkstoff hat zwar einen großen Wärmeausdehnungskoeffizienten und ist alkalihaltig, läßt sich jedoch nach Belichtung über eine Maske und eine anschließende technische Entwicklung relativ einfach ätzen und ermöglicht so eine bessere Bearbeitung als Glas.

Die SiO_2-Schutzschicht der Festkörperschaltkreise entspricht in ihren Eigenschaften dem Quarzglas und ermöglicht die Anordnung von Dünnschichtschaltungen auf planaren Siliziumsubstraten.

Aluminiumoxid in einkristalliner Form (Saphir) eignet sich besonders als Trägermaterial für aktive Dünnschichtelemente sowie, wegen der geringen Verluste bei höchsten Frequenzen, für Baugruppen der Mikrowellentechnik.

2.2. Dickschichtschaltkreise

Bereits die herkömmliche »gedruckte« Schaltung stellt eine erste Form der integrierten Schaltung dar. Die Dickschichttechnik bietet in Erweiterung dieser Technologie die Möglichkeit, außer den Leiterzügen auch passive Elemente in einer einheitlichen Technologie auf dem gleichen Träger anzuordnen. Die Bedürfnisse der

Tabelle 2. Kennwerte bedeutungsvoller Substratmaterialien

Material	Zusammensetzung	Handelsname	Wärmeleitfähigkeit $\left(10^{-3}\frac{\text{cal}}{\text{cm s °C}}\right)$ 25 °C	300 °C
Alkaliglas	72 % SiO_2 9 % CaO 16 % Na_2O	Corning 0080 (Mikroskopplättchen)	2,3	
Borsilikatglas	80 % SiO_2 13 % B_2O_3 2 % Al_2O_3 3 % NaOH	Corning 7740 (Pyrex)	2,7	
Aluminium-Silikatglas		Corning 7059	3	3,6
Quarzglas	100 % SiO_2	Quartex	3,4	
Glas-Keramik		Fotoceram	5,6	4,9
Aluminiumoxid (gesintert)	94 % Al_2O_3		45	24
Berylliumoxid	99,5 % BeO		550	
Magnesium-Silikatkeramik		Steatit	6	
Aluminiumoxid (kristall.)	Al_2O_3	Saphir	100	

Schaltungstechnik und die ökonomischen Gegebenheiten diktieren dabei die Wahl des Trägermaterials und der Technologie. Sie schließen eine extreme Miniaturisierung aus.
Der Dickschichtschaltkreis ist deshalb eine relativ grobe Variante der integrierten Schaltungstechnik und sowohl in der Anwendung als auch in der Verarbeitung in vielen Punkten der gedruckten

Längenausdehngs.-Koeffiz. (10^{-6}/°C) 25 °C ... 300 °C	Spez. Widerstand lg ϱ 25 °C	(Ω cm) 250 °C 300 °C*	ε_r bei 25 °C/1 MHz	tan δ 10^{-3}	Erweichungs-Temperatur °C	Verformungs-Temperatur °C
9,2	12,4	6,4	7,2	10	695	490
3,2	15	8,1	4,6	5	820	515
4,5	17	12*	5	13	872	613
0,54	17	12	3,8	0,25	1670	1070
10,4	16	7,7*	5,6	34		
6,7	14	12*	8,9	0,75	$\approx$1600	
6		14	6,4	0,6	1600	
8	14		6,3	1,8		
$\approx$6		>10*	7,5... 10	<0,1	1800	

Schaltung ähnlich. In seinen geometrischen Abmessungen weist er eine handliche Größe auf und enthält, wie die bisherigen Druckschaltungen, in den meisten Fällen eine größere in sich geschlossene Baueinheit. Als Vorteil gegenüber der herkömmlichen Platine mit ausgeätzten Leitungszügen sind die zahlenmäßig verringerten und günstiger gestalteten Kontaktierungen zwischen den Schaltelementen sowie die gleichmäßigere, mechanisierbare Fertigung zu betrachten. Die Verbesserungen im Hinblick auf die Verbindungen und die Gleichmäßigkeit bringen eine höhere Zuverlässigkeit, die zweckmäßigere Fertigung eine bessere Ökonomie. Bild 5 zeigt als Beispiel eine mit Dickschichtschaltkreisen verwirklichte Baugruppe eines Richtfunkgerätes.

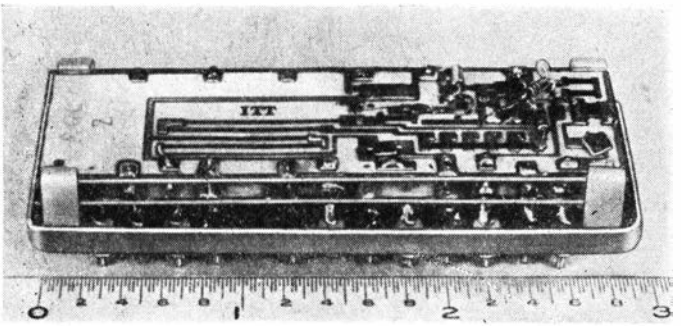


Bild 5. Mit Dickschichtschaltkreisen verwirklichte Baugruppe eines transportablen Richtfunkgerätes (70-MHz-Verstärker-Demodulator)

Halbleiterbauelemente sind unmittelbar auf dem Substrat normalerweise nicht realisierbar. Da sich jedoch die Abstände zwischen den verschiedenen Leiterbahnen und den aufgebrachten Elementen den Erfordernissen anpassen lassen, besteht die Möglichkeit, konventionelle Bauelemente an jeder Stelle eines Schaltkreises zuzusetzen. Damit ist ein breites Spektrum sofort verfügbarer konventioneller Halbleiterbauelemente nutzbar. Hinsichtlich der passiven Bauelemente ergibt sich eine Erweiterung des Wertebereiches und auf Grund dessen eine größere Beweglichkeit bei der Auslegung der Schaltungen. Die Kontaktierung der eingefügten konventionellen Bauelemente kann beispielsweise durch Löten in der gleichen Weise mit relativ einfachen mechanisch arbeiten-

den Hilfseinrichtungen erfolgen wie ein gegebenenfalls notwendiger Abgleich der unmittelbar auf dem Substrat angeordneten passiven Elemente.

Die passiven Dickschichtelemente entsprechen in ihrem elektrischen Verhalten gleichartigen konventionellen Bauelementen. Das Trägermaterial gewährleistet einen hohen Isolationswiderstand zwischen den einzelnen Elementen und Leiterbahnen, und die Streukapazitäten können durch geeignete Anordnungen gering gehalten werden. Damit sind Schaltungen mit Dickschichtschaltkreisen in gleicher Weise herstellbar wie mit herkömmlichen Bauelementen. Für die Abführung der Verlustwärme ergeben sich am Dickschichtschaltkreis keine ungünstigeren Verhältnisse als bei einem vergleichbaren konventionellen Aufbau. Die verhältnismäßig groß bemessenen Substrate, die in der Regel eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, sowie die Leiterbahnen und Anschlüsse mit relativ großem Querschnitt sichern eine gute Wärmeabführung. Gegenüber den verschiedenen Einflüssen der Umgebung sind die Schaltkreise durch die beim Einbrennen der einzelnen Schichten auftretende Verglasung in weiten Bereichen unempfindlich.

Für die Herstellung von Dickschichtschaltkreisen sind relativ wenige und verhältnismäßig unkomplizierte Einrichtungen erforderlich. Die Forderungen an die Präzision liegen im Bereich des derzeit technisch sicher Beherrschbaren. Daraus ergeben sich in Vorbereitung der Fertigung niedrige Kapitalinvestitionen und damit geringe Vorbelastungen für die Schaltkreiskosten. Die bei der Herstellung integrierter Schaltkreise in den meisten Fällen recht aufwendige Umrüstung erfordert ebenfalls nur einen geringen Aufwand. Bei vorhandener, eingelaufener Technologie besteht die Umrüstung im Wechseln des kurzfristig ohne großen Mittelaufwand herstellbaren maskierenden Drucksiebes. Der Dickschichtschaltkreis kann aus diesem Grunde bei technischen Vorteilen unabhängig von der Stückzahl kostenmäßig mit gleichartigen konventionellen Aufbauten konkurrieren. Da es sich jedoch gewissermaßen um eine automatisierte Einzelfertigung handelt, ergibt sich auch bei sehr großen Produktionszahlen keine bedeutende Senkung der auf einen Schaltkreis entfallenden Kosten.

Wesentliche Verbesserungen an der Technologie der Schaltkreise und im Fertigungsablauf sind nicht zu erwarten. Dennoch ist der

Dickschichtschaltkreis gegenwärtig bedeutungsvoll und wird diese Bedeutung auch noch längere Zeit behalten. Der Grund dafür ist darin zu suchen, daß er die grundsätzlichen Vorzüge eines integrierten Schaltkreises aufweist, dabei jedoch im Gegensatz zu anderen Technologien dem Bedürfnis der Schaltungstechniker nach Anpassungsfähigkeit nahezu ideal entgegenkommt. Gegenwärtig ermöglicht er damit einen Übergang zur integrierten Schaltungstechnik ohne revolutionierende Änderungen, und in späterer Zeit wird er als Zwischenglied zur Aufnahme anderer Schaltkreise nützlich sein. In dieser Form bietet er Voraussetzungen für umfangreiche, weitgehend integrierte Geräte mit hoher Zuverlässigkeit bei relativ geringen Kosten.
Bereits gegenwärtig erfolgen Entwicklung und Fertigung von Dickschichtschaltkreisen in den meisten Fällen in einer engen technischen und räumlichen Verknüpfung mit den Arbeiten am Gerät. Diese Tendenz wird sich weiter verstärken. Die Voraussetzungen seitens der Technologie und der Fertigungsmittel sind gegeben. Zahlreiche Firmen — etwa 15 im europäischen Raum — übernehmen die kurzfristige Herstellung spezieller Schaltkreise nach Kundenwunsch. Darüber hinaus befinden sich Grundmaterialien, Verarbeitungstechnologien und zweckentsprechende Zusatzbauelemente im Angebot. Als Anhaltspunkt für ökonomische Betrachtungen kann gelten, daß die bis zur Produktionsreife entstehenden Kosten für einen Dickschichtschaltkreis etwa eine Größenordnung niedriger liegen als für einen äquivalenten Dünnschichtschaltkreis.

2.2.1. Substrate

Die in Betracht kommenden Trägermaterialien wurden allgemein im Abschnitt 2.1.2. betrachtet. Speziell für die Dickschichttechnologie sind nur wenige Besonderheiten anzumerken.
Für Dickschichtschaltkreise werden in der Regel Substrate mit einer Fläche von 4 . . . 20 cm^2 und einer Dicke in der Größenordnung von 1 mm benötigt. Die Oberfläche dieser Substrate muß im Interesse einer guten Reproduzierbarkeit eben und frei von Einschlüssen sein, braucht jedoch keinen extremen Anforderungen hinsichtlich der Rauhigkeit zu genügen. Andererseits ist in den meisten Fällen eine gute Wärmeleitfähigkeit und wegen der

maximalen Einbrenntemperaturen bei 1000 °C eine entsprechende Temperaturfestigkeit erforderlich.
Unter Berücksichtigung aller Faktoren kommt vorwiegend eine gesinterte Al_2O_3-Keramik in einer unglasierten Form zur Anwendung. Beachtenswert ist in diesem Zusammenhang, daß die für die verschiedenen Druckpasten propagierten Kennwerte nur für ein bestimmtes Trägermaterial gelten. Andere Materialien bzw. Zusammensetzungen erfordern gegebenenfalls umfangreiche Änderungen an den Schichten und Einbrenntemperaturen.

2.2.2. Beschichtungstechnologien

Die Aufbringung der verschiedenen Schichten erfolgt nahezu ausschließlich durch Siebdruckverfahren. Die Siebe tragen dabei die notwendigen Masken und bestimmen in starkem Maße die Dosierung der Druckpasten.

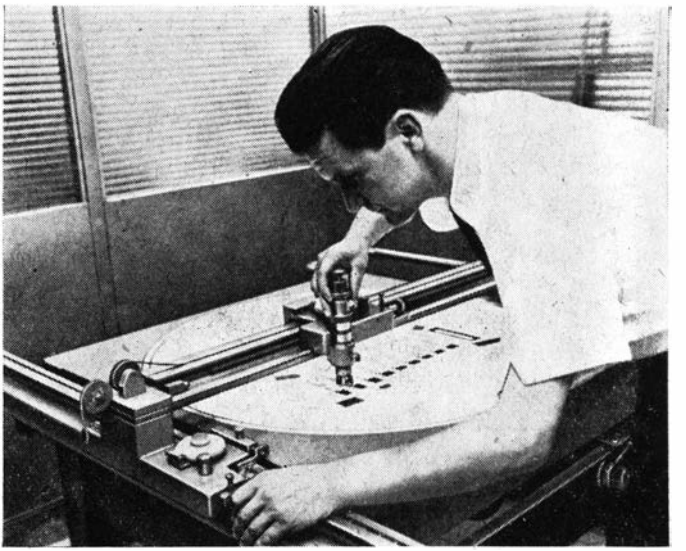


Bild 6. Herstellung der Vorlage für die Fotomaske mit dem Koordinatografen

Ein Sieb besteht aus einem Drahtgewebe, dessen Dichte im allgemeinen zwischen 165 . . . 350 Maschen/cm² liegt. Als Werkstoff für das Gewebe eignet sich rostfreier Stahldraht. Spannung und Stabilität erhält das Sieb durch einen geeigneten Metallrahmen.
Die Herstellung der Maske erfordert entweder mit fotoempfindlicher Folie beschichtetes Gewebe als Grundmaterial oder das Aufbringen einer lichtempfindlichen Emulsion. Nach Belichtung über eine Fotoschablone und einer geeigneten Nachbehandlung werden die Siebteile, die einen Abdruck bringen müssen, für die Druckpasten durchlässig. Die Fotoschablone entsteht nach einer Vorlage durch fotografische Verkleinerung mittels einer Reduzierkamera (Bild 7).

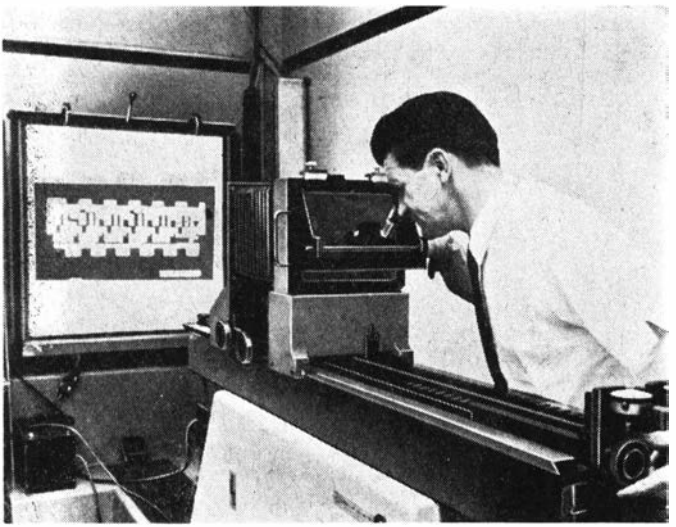


Bild 7. Anfertigung der Fotomaske mittels Reduzierkamera

Die Vorlage kann je nach den Anforderungen in den Extremfällen mit Klebeband oder dem Koordinatografen angefertigt werden (Bild 6).
Das Bedrucken des Trägermaterials erfolgt in speziellen Einrichtungen, in welche die maskierenden Siebe eingesetzt werden.

2

Die Einrichtungen sind hinsichtlich des Umfangs und der Mechanisierung den Bedürfnissen der Laborherstellung oder der Serienfertigung angepaßt. Automatische Anlagen, wie sie die Bilder 8 und 9 in einer einfachen Form zeigen, gestatten das Drucken von mehreren tausend Schaltkreisen in der Stunde. Im Prinzip enthalten alle Druckeinrichtungen eine Halterung für die verschiedenen zur Herstellung eines Schaltkreises notwendigen Siebe, eine Aufnahme für die zu bedruckenden Substrate sowie eine Vorrichtung, die das Einstreichen des Siebes mit der Druckpaste und das Andrücken an das Substrat übernimmt. Die Aufnahmen für die Siebe und Substrate müssen eine Justiereinrichtung haben, welche es gestattet, Substrate und Siebe mit engen Toleranzen zueinander in die vorgesehene Lage zu bringen.

Die Herstellung eines Schaltkreises erfordert eine Reihe von aufeinanderfolgenden Teilschritten, die ihrerseits einige Nebenschritte voraussetzen. Die Teilschritte ergeben sich aus der Tatsache, daß ein Schaltkreis mit verschiedenartigen Elementen unterschiedliche Pasten und damit getrennte Masken notwendig macht. Für Kondensatoren sind Masken für das Dielektrikum und die Gegenelektrode erforderlich, während der untere Belag ebenso wie Induktivitäten im allgemeinen zusammen mit den Leiterzügen aufgebracht werden können. Vor dem Aufbringen einer jeden Schicht liegen als Nebenschritte die Arbeitsgänge zur Vorbereitung der Maske und der Druckpaste. Am Anfang des Herstellungsprozesses erfolgt gewissermaßen als Vorstufe eine gründliche Reinigung des Substrates.

Nach dem Drucken sind jeweils die Schritte »Trocknen« bei erhöhten Temperaturen von etwa 100 °C und »Einbrennen« bei Temperaturen zwischen etwa 500...1000 °C erforderlich. Die Trocknung erstreckt sich in der Regel über einen Zeitraum von 15 Minuten, die Brenndauer liegt zwischen etwa 5 . . . 50 Minuten. Der Einbrennprozeß hat einen wesentlichen Einfluß auf die Parameter der Elemente. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Reproduzierbarkeit des Temperaturprofils zu. Die Aufeinanderfolge der einzelnen Teilschritte verlangt eine Abstufung der Brenntemperaturen.

Nach dem Einbrennen besteht die Möglichkeit eines Abgleiches der passiven Elemente, der in der Regel durch Abtragung mittels eines Sandstrahlgebläses vorgenommen wird. Weitere, jedoch we-

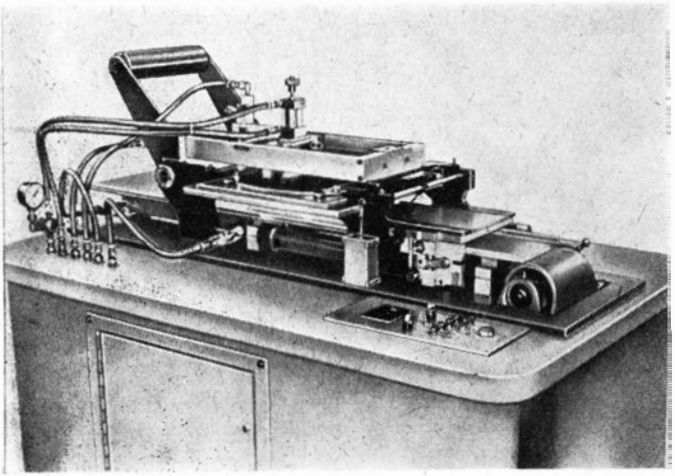


Bild 8. Automatische Siebdruckanlage für die Fertigung

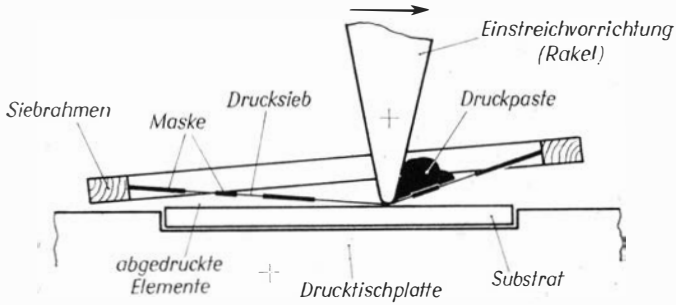
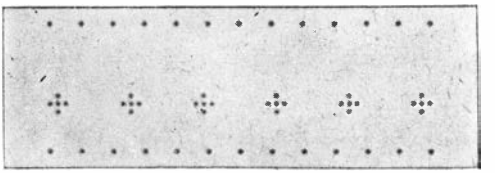


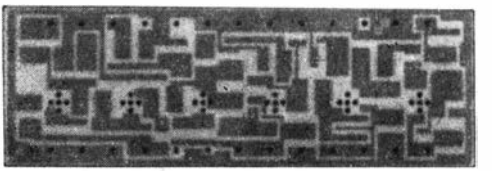
Bild 9. Siebdruckeinrichtung (Prinzip)

Bild 10. Herstellungsstufen eines Dickschichtschaltkreises
a) Keramiksubstrat nach Abschluß der mechanischen Vorbereitung
b) mit aufgedruckten Leiterbahnen
c) mit Leiterbahnen und Kondensatoren
d) mit Leiterbahnen, Kondensatoren und Widerständen
e) nach Tauchlötung
i) Rückseite des Schaltkreises mit zugesetzten diskreten Elementen und zusätzlichen gedruckten Leiterbahnen

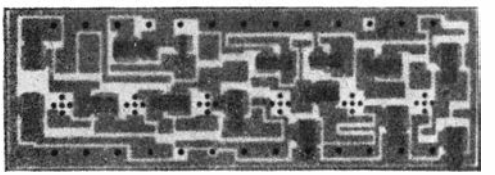
2



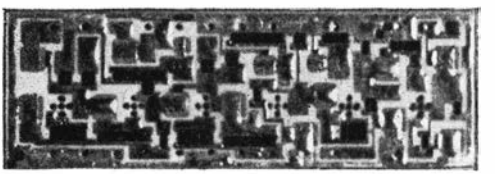
a)



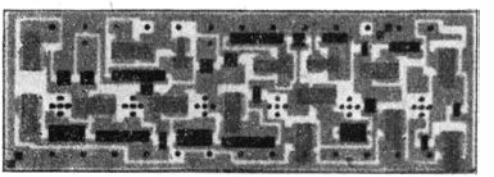
b)



c)



d)



e)



f)

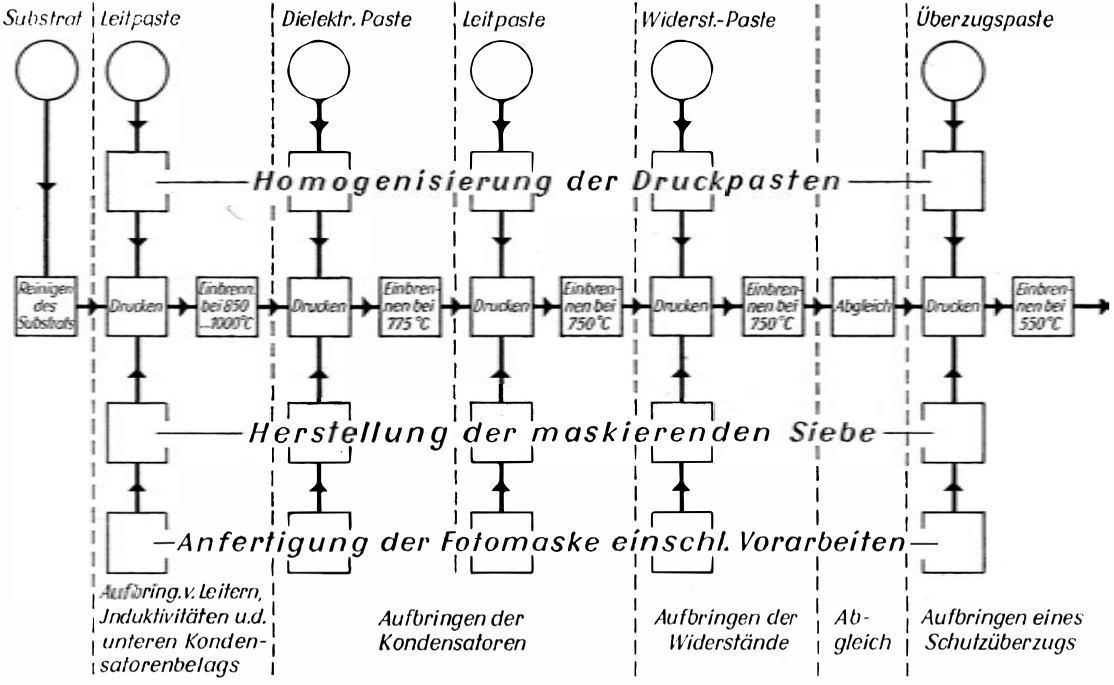


Bild 11. Flußdiagramm der Herstellung von Dickschichtschaltkreisen

niger genutzte Möglichkeiten liegen im Abgleich durch Schleifen bzw. Funkenerosion.
Zum Schutz des Schaltkreises gegen mechanische Beschädigungen und Klimaeinflüsse kann nach den bisher erwähnten Schritten eine Glasur oder eine Plastverkappung erfolgen. Die Glasur erfordert den Aufdruck einer Überzugspaste und ein abschließendes Einbrennen.
Bild 10 zeigt die Entstehung eines Dickschichtschaltkreises. Bild 11 veranschaulicht den Herstellungsprozeß am Beispiel eines Schaltkreises, der Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten enthält.
Die Druckpasten bzw. -tinten sind in ihrer Zusammensetzung der jeweiligen Anwendung angepaßt. Sie enthalten Metalle, Metalloxide bzw. Dielektrika in polykristalliner Form zusammen mit einem glasartigen Binder, aufgeschwemmt in einem organischen Träger. Voraussetzung für ein einwandfreies Arbeiten ist die Homogenität der Paste und eine gleichmäßige Viskosität.

2.2.3. Passive Elemente

Widerstände

Widerstände in Dickschichtschaltkreisen werden vorwiegend in Form mehr oder weniger langgestreckter, gegebenenfalls jedoch auch mäandrierter Rechtecke gedruckt. Als Widerstandsmaterialien kommen geeignete Druckpasten zur Anwendung. Diese Pasten werden in den meisten Fällen von spezialisierten Herstellern übernommen, mitunter jedoch vom Hersteller der Schaltkreise selbst gemischt. Am verbreitetsten sind die Erzeugnisse der Firma Du Pont (USA). Vorwiegend eingesetzt werden auf Silber-Palladium oder Palladiumoxid basierende Mischungen. Für eine Silber-Palladium-Paste nennt Tabelle 3 einige mögliche Zusammensetzungen und die zugehörigen elektrischen Kennwerte.
Durch eine zweckmäßige Variation der Zusammensetzung bzw. durch eine geeignete Mischung der Varianten lassen sich die Pasten der jeweiligen Anwendung anpassen. Die Widerstandswerte der Druckpasten hängen in starkem Maße von der Zusammen-

Tabelle 3. Zusammensetzung und elektrische Kennwerte von Widerstandspaste auf der Basis von Silber-Palladium

Zusammensetzung	Flächenwiderstand[1]	Temp.-Koeffizient
Silber/Palladium : 1/2 Blei-Bor-Silikatglas : 45 %	900 Ω	+71 · 10^{-6}/°C
Silber/Palladium : 9/10 Blei-Bor-Silikatglas : 60 %	3 kΩ	+300 · 10^{-6}/°C
Silber/Palladium : 1/2 Blei-Bor-Silikatglas : 70 %	25 kΩ	—1000 · 10^{-6}/°C

[1] Die Definition des Flächenwiderstandes erfolgt im Abschnitt 2.3.3.

setzung und der Oberfläche des Trägermaterials sowie von der Brenntemperatur ab. Das Arbeiten mit den Pasten setzt deshalb umfangreiche Erfahrungen bzw. Experimente voraus. Die Brenntemperaturen liegen im Bereich von etwa 650 . . . 800 °C, die Brennzeiten zwischen etwa 5 . . . 50 Minuten.

Tabelle 4. Kennwerte der z. Z. in Dickschichtschaltkreisen technisch realisierbaren Widerstände

Flächenwiderstand	1 Ω . . . 400 kΩ
Widerstandsbereich	10 Ω . . . 1 MΩ
Wertebereich[1]	1 : 300
Flächenbelastung	2 W/cm²
TK_R	±50 . . . 300 · 10^{-6}/°C
Toleranz	
nach dem Brennen	±5 %
mit Abgleich	±0,1 %
Drift	0,5 % nach 1000 h bei 150 °C

[1] Der Wertebereich nennt das Widerstandsverhältnis, das sich in einem Schaltkreis mit einem Arbeitsgang verwirklichen läßt. Widerstandswerte außerhalb dieses Bereichs erfordern einen zusätzlichen Arbeitsgang

Tabelle 4 veranschaulicht die Kennwerte der z. Z. in Dickschichtschaltkreisen technisch realisierbaren gedruckten Widerstände. Die Werte gelten für eine Schichtdicke von 25 µm.
Eng tolerierte Widerstände erfordern einen nachträglichen Abgleich. Dieser erfolgt in jedem Falle durch eine Abtragung von Widerstandsmaterial mit einem der bereits genannten Verfahren. Obgleich eine weitgehende Mechanisierung möglich ist, erhöht ein nachträglicher Abgleich die Kosten in um so stärkerem Maße, je enger die Toleranzen werden.
Der in den Druckpasten enthaltene glasartige Binder bewirkt beim Einbrennprozeß ein Verschmelzen der einzelnen Elemente. Eine äußere Glasur als Schutz gegen Klimaeinflüsse ist deshalb nur bei eng tolerierten bzw. abgeglichenen Widerständen notwendig.

Kondensatoren

In Anpassung an die Forderungen, die seitens der Schaltungstechnik an die Kondensatoren gestellt werden, kommen in Dickschichtschaltkreisen entweder gedruckte Kondensatoren oder in konventioneller Bauform zugesetzte Kondensatoren zur Anwendung. Die entscheidenden Parameter sind in den meisten Fällen der mit gedruckten Kondensatoren bei vernünftigem Flächenaufwand zu verwirklichende Kapazitätswert und der Verlustfaktor.
Dickschichtkondensatoren (Bild 12) sind entsprechend ihrem Aufbau als Plattenkondensator anzusprechen. Die Herstellung erfolgt durch das Übereinanderlegen geeigneter Schichten. Die untere Elektrode wird üblicherweise gemeinsam mit den Leiterzügen aufgebracht. Die Deckelelektrode, ebenfalls eine Leitschicht, erfordert eine Leiterpaste mit relativ geringer Einbrenntemperatur. Das die Parameter des Kondensators bestimmende Dielektrikum wird zwischen diesen beiden Arbeitsgängen gedruckt und eingebrannt. Die Druckpaste besteht aus dem gemeinsam mit einem glasartigen Binder in einem organischen Träger aufgeschwemmten Dielektrikum. Als Dielektrikum kommen u. a. Bariumtitanate, Titanoxide und Zinkoxide zur Anwendung. Die Einbrenntemperatur liegt bei 750 . . . 800 °C.
Ein Dielektrikum auf der Basis von Bariumtitanaten ergibt Kondensatoren mit einer großen Flächenkapazität, bedingt jedoch bei

höheren Frequenzen einen starken Anstieg des Verlustwinkels. Die Anwendung dürfte sich auf Abblockkondensatoren beschränken. Titanoxid bringt auf der gleichen Fläche kleinere Kapazitätswerte, zeigt jedoch hinsichtlich des Verlustfaktors ein günstigeres Verhalten.

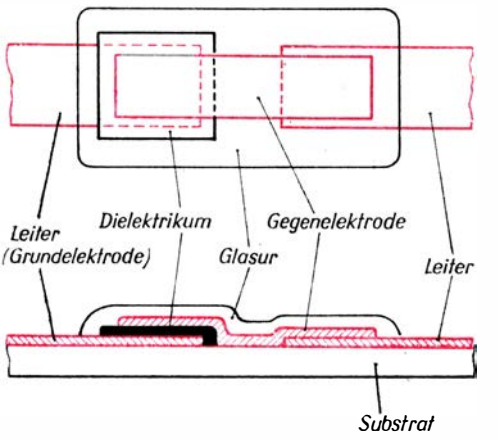


Bild 12
Aufbau eines Dickschichtkondensators

Tabelle 5. Kennwerte der in Dickschichtschaltkreisen mit $BaTiO_3$ *und* TiO_2*-Dielektrikum realisierbaren Kondensatoren*
(Die Kennwerte gelten für die Dicke der dielektrischen Schicht von 25 µm)

	$BaTiO_3$	TiO_2	
Flächenkapazität	8000	3000	pF/cm²
Kapazitätsbereich	100 . . . 10 000	10 . . . 1000	pF
Toleranzen			
nach dem Brennen	10 . . . 20 %		
mit Abgleich	1 %		
TK_C	1000	200	10^{-6}/°C
Durchschlagspannung	500		V/25 µm
tan δ bei 100 kHz	1	0,5	10^{-2}
bei 70 MHz	4	1	10^{-2}
Drift	relativ stabil	stabil	

Tabelle 5 zeigt die Möglichkeiten der beiden Dielektrika. Die angegebenen Kennwerte gelten für eine 25 µm dicke dielektrische Schicht. Eine Verringerung der Schichtdicke bringt einen Zuwachs an Kapazität. Wesentlich dünnere Schichten sind jedoch mit den Möglichkeiten der Dickschichttechnik nicht mehr zu beherrschen. Ein Abgleich des Kapazitätswertes ist mit den gleichen Einrichtungen möglich, wie sie für den Widerstandsabgleich notwendig sind. Im Gegensatz zu den Widerständen erfordern auch nichtabgeglichene Dickschichtkondensatoren eine Schutzglasur.

Induktive Elemente

Induktive Elemente lassen sich in Dickschichtschaltkreisen nur in Form gedruckter Spiralen verwirklichen. Die erreichbaren Induktivitäts- und Gütewerte sind dabei sehr klein. Eine gewisse Verbesserung ist einerseits durch geeignet angeordnete Ferritscheiben und andererseits durch eine nachträgliche Verstärkung der mit Leitertinte erzielten Bahnen zu erreichen. Die Verstärkung kann in einfacher Weise durch Verzinnen erfolgen.
Bei einem normalerweise vertretbaren Aufwand an Substratfläche liegen die maximal möglichen Induktivitätswerte bei einigen Mikrohenry. Die Güten übersteigen kaum Werte von 100.
Für den überwiegenden Teil aller Anwendungen dürfte der Zusatz direkter Spulen in einer zweckmäßigen Miniaturausführung den Anforderungen am besten gerecht werden.

2.2.4. Aktive Elemente

Entsprechend dem gegenwärtigen Stand der Technik können unmittelbar auf dem Substrat nur passive Elemente angeordnet werden. Die aktiven Elemente müssen, ebenso wie alle anderen einkristallinen Halbleiterbauelemente, in konventioneller Bauweise zugesetzt werden. Dieser Umstand ist entsprechend dem Charakter der Dickschichtschaltkreise nicht unbedingt als Nachteil aufzufassen, sondern in sehr vielen Fällen ein Vorteil. Auf diese Weise steht nämlich ein sehr breites Spektrum an Halbleiterbauelementen kurzfristig zur Verfügung. Häufig sind geeignete Bauelemente in einer zweckmäßigen Bauform greifbar. Hinsichtlich der Kosten bieten plastumhüllte Elemente Vorteile.

Gehäuselose Halbleiterbauelemente, sogenannte Chip-Elemente, sind ebenfalls für einen Einsatz in Dickschichtschaltkreisen geeignet. Der technologische Aufwand für die Kontaktierung dieser Elemente im Schaltkreis dürfte jedoch oft dann unerträglich sein, wenn die Schaltkreise nicht in einer speziellen Fertigungsstätte, sondern im engen Zusammenhang mit einem Gerät, im Gerätewerk selbst, gefertigt werden. Darüber hinaus ist das zur Verfügung stehende Sortiment an derartigen Spezialbauelementen zwangsläufig bedeutend geringer.
Dünnschichttransistoren und -dioden, die im Abschnitt 2.3.4. besprochen werden und die in ihrem Aufbau der Geometrie des Dickschichtschaltkreises weitgehend entgegenkommen, sind nicht in einer technisch nutzbaren Form verfügbar. Ein Einsatz im Rahmen von Dickschichtschaltkreisen ist auch zu einem späteren Zeitpunkt nicht zu erwarten.

2.2.5. Verbindungs- und Anschlußtechnik

Ein Schaltkreis entsteht durch eine geeignete elektrische Verbindung der auf dem Substrat angeordneten Elemente. Beim Dickschichtschaltkreis bilden die Verbindungsleitungen in der gleichen Form wie bei der gedruckten Schaltung ein fest mit dem Trägermaterial verbundenes Leitungsmuster. Die Aufbringung geschieht in diesem Falle jedoch wie auch bei den Dickschichtschaltelementen durch einen Druckvorgang. Als weiterer wesentlicher Unterschied ist die Ausführung des Überganges Schaltelement/Verbindungsleitung zu betrachten. Während diese Verbindung bei der gedruckten Schaltung durch einen besonderen Lötvorgang hergestellt wird, entsteht sie bei der Dickschichtschaltung unmittelbar beim Aufeinanderdrucken der verschiedenen Schichten. Die Kontaktsicherheit ist dabei bei der Dickschichttechnologie bedeutend höher, zumal beim konventionell zugesetzten Bauelement eine weitere Kontaktierung notwendig ist, welche die Widerstandsschicht bzw. den Kondensatorbelag mit dem Anschlußdraht verbindet. In elektrischer Hinsicht werden an die Verbindungsleitungen die Forderungen nach geringem Widerstand und geringer Streukapazität gestellt. Als Material für die Leiterbahnen stehen Druckpasten zur Verfügung, die aus einer Aufschwemmung von

Gold-Platin, Paladium-Silber, Silber, Gold oder Platin mit einem glasartigen Binder in einem organischen Träger bestehen. Der erstgenannten Paste kommt z. Z. die größte Bedeutung zu. Silber neigt bei hoher Luftfeuchtigkeit unter dem Einfluß eines Gleichfeldes zum »Wandern« (Elektromigration) und führt damit zu Schlüssen zwischen eng benachbarten Leiterbahnen. Gold wird sehr gern als Gegenelektrode für Kondensatoren benutzt. Da es sehr stark mit Lötzinn legiert, sind Schutzglasuren notwendig, um eine Zerstörung der Goldschicht zu verhindern. Leiterbahnen mit einer Breite von etwa 125 µm und weniger erfordern Siebe mit 270 . . . 350 Maschinen/mm^2. Die Einbrenntemperaturen für Leiterpasten liegen etwa bei 500 . . . 1000 °C. Die Adhäsion zwischen der eingebrannten Leiterschicht und dem Substrat erreicht dabei Werte von etwa 100...250 kp/cm^2. Der Flächenwiderstand beträgt etwa 0,1 . . . 0,01 Ω bei einer Schichtdicke von 25 µm. Durch eine Verstärkung der Leitschicht auf galvanischem Weg oder durch eine Tauchverzinnung läßt sich dieser Wert bei einer mittleren Leiterbreite um eine Größenordnung vermindern. Tabelle 6 veranschaulicht die Verhältnisse für eine 25 µm starke Gold-Platin-Bahn unterschiedlicher Breite.

Ein Verzinnen der Leiterbahnen bringt neben der Verringerung der Bahnwiderstände als entscheidenden Vorteil günstige Bedingungen für die Verbindung des Schaltkreises mit konventionell zugesetzten Elementen und der äußeren Schaltung. Der verhältnismäßig große Abstand zwischen zwei Leiterbahnen, der minimal etwa 100 µm beträgt, ermöglicht die Anwendung des Lötens

Tabelle 6. Verringerung des Widerstandes von 25 µm dicken Leiterbahnen aus Gold-Platin durch eine Verzinnung

Leiterbreite	Leitungswiderstand	
	der eingebrannten Druckschicht	der verzinnten Schicht
mm	Ω cm	Ω cm
0,127	8	2
0,254	4,35	0,4
0,38	2,9	0,24

als Verbindungstechnik. Für das Anlöten von Anschlußdrähten sind die verzinnten Leiterbahnen sehr gut geeignet. Anschlußstifte können vor dem Tauchbad in das Substrat eingesetzt und im gleichen Arbeitsgang mit den Leiterbahnen verlötet werden.
Verbindungen mit den in der Halbleitertechnik üblichen Verfahren der Thermokompressionen bzw. der Ultraschallschweißung sind bei den dicken, auch materialmäßig geeigneten Leiterbahnen gut möglich.
Eine Kontaktierung von Anschlußdrähten bzw. -stiften durch Leitsilber bzw. Silberbronzen kommt in beschränktem Umfang nur dann zur Anwendung, wenn in Sonderfällen die thermische Belastung gering gehalten werden muß. Die Verbindung erfolgt dabei nicht wie beim Löten durch Anlegieren oder Ineinanderdiffundieren zwischen den Oberflächen, sondern nur durch ein Verkleben der aufgeschwemmten Metallteilchen untereinander und mit den Anschlußdrähten und Leiterbahnen. Die Leitfähigkeit einer derartigen Verbindung erreicht deshalb nicht die Werte einer Lötverbindung.
Leitungskreuzungen sind in der gleichen Weise realisierbar wie Kondensatoren. Da in diesem Falle jedoch kleine Kapazitäten zwischen den beiden Leiterbahnen erwünscht sind, kommt als Isolierschicht ein Material mit geringer Dielektrizitätskonstante in Betracht. Üblicherweise wird eine möglichst dicke Schicht von aufgeschwemmtem Glasstaub aufgedruckt und eingebrannt.

2.3. Dünnschichtschaltkreise

Der Dünnschichtschaltkreis zeigt die gleichen grundlegenden Eigenschaften wie der Dickschichtschaltkreis; eine strenge Unterscheidung ist nicht möglich. Er weist jedoch im allgemeinen eine »feinere« Struktur auf und kann in dieser Hinsicht im Extremfall mit dem Festkörperschaltkreis konkurrieren. Seine geometrischen Abmessungen bewegen sich in einem weiten Rahmen und ergeben sich aus der jeweiligen Bauform und Anwendung. Ein gängiger Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreis oder ein Dünnschichtschaltkreis, der beispielsweise einige Widerstände eines Spannungsteilers zusammenfaßt, weist mitsamt der Plastumhüllung Kantenlängen von wenigen Zentimetern auf. Dünnschichtschalt-

kreise, die in Form der Festkörper-Hybrid-Technik auf Siliziumsubstraten angeordnet sind, und Schaltkreise mit aktiven Dünnschichtelementen erstrecken sich über eine Fläche von wenigen Quadratmillimetern. Es erscheint in diesem Zusammenhang jedoch bemerkenswert, daß eine Verringerung der Abmessungen in jedem Fall mit einer Erhöhung der Herstellungskosten und weiteren Toleranzen verbunden ist.

Im Gegensatz zum Dickschichtschaltkreis ist der Dünnschichtschaltkreis weniger flexibel. Konventionelle Bauelemente lassen sich prinzipiell zwar ebenso einsetzen wie im Dickschichtschaltkreis, jedoch erscheint diese Form dem Dünnschichtschaltkreis weniger angepaßt. Chip-Elemente hingegen, die sich harmonischer einfügen, bedingen einen höheren technologischen Aufwand bei der Kontaktierung, insbesondere gilt dies für Halbleiterbauelemente. Dadurch entstehen zumindest für eine Fertigung kleineren Umfangs nur schwer lösbare Probleme. Der Dünnschichtschaltkreis nimmt damit eine Stellung zwischen dem Dickschicht- und dem Festkörperschaltkreis ein. Bei relativ hohen Leistungs- und Frequenzgrenzen ermöglichen die Dünnschichttechnologien eine zweckentsprechende Miniaturisierung, als Ergebnis der Herstellung unter definierten Bedingungen in präziseren Anordnungen engere Toleranzen und eine Steigerung der Zuverlässigkeit sowie gegebenenfalls einen homogenen Aufbau mit aktiven Dünnschichtelementen.

Die komplizierteren Verfahren erfordern einen höheren Vorleistungsaufwand und bedingen für eine wirtschaftliche Fertigung höhere Stückzahlen. Die Vorleistungskosten und damit auch die ökonomischen Mindeststückzahlen liegen jedoch weit niedriger als beim diffundierten Festkörperschaltkreis. Während für gleiche Dünnschichtschaltkreise, die in Maskentechnik hergestellt werden, einige tausend Schaltkreise als untere Grenze anzusehen sind, gestatten flexiblere Verfahren, wie das Fräsen mittels Elektronenstrahlen oder das Mikrogravieren eine untere ökonomische Grenze bei einigen hundert Schaltkreisen. Die verschiedenen Technologien machen die Dünnschichttechnik außerordentlich anpassungsfähig, so daß die wirtschaftliche Herstellung kleinerer Stückzahlen ebenso möglich ist wie die Großserienfertigung.

Der entscheidende Nachteil gegenüber der Festkörpertechnik ist z. Z. das Fehlen von homogen einfügbaren Transistoren und

Dioden. Die augenblicklich häufigste Variante des »aktiven« Dünnschichtschaltkreises, der Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreis, wird mit zunehmender Anzahl der Transistoren je Schaltkreis unökonomischer, weil die Montage der Transistoren nur unvollkommen automatisierbar ist und dadurch verhältnismäßig hohe Kosten verursacht. In seiner echten aktiven Form, in der er neben den passiven Elementen auch integrierte Transistoren und Dioden enthält, wäre der Dünnschichtschaltkreis durchaus als ernste Konkurrenz für den diffundierten Festkörperschaltkreis zu betrachten. Mit einer geringeren Zahl von Arbeitsgängen lassen sich in dieser Form Schaltungen mit besseren elektrischen Parametern, vor allem für kurze Schaltzeiten und hohe Frequenzen verwirklichen. Gegenwärtig scheitert der aktive Dünnschichtschaltkreis am Fehlen von stabilen Dünnschicht-Halbleiterelementen. Ob solche Elemente in einer technisch verwertbaren Form zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar sein werden und der aktive Dünnschichtschaltkreis nach der derzeit intensiven Weiterentwicklung der Festkörpertechnologien noch konkurrenzfähig sein wird, bleibt abzuwarten.
Ebenso wie die Dickschichttechnik gestattet auch die Dünnschichttechnik, wenn auch unter Beachtung der bereits angedeuteten Einschränkungen, eine relativ enge Kopplung zwischen Geräte- und Schaltkreisherstellung. Besonders für solche Gerätetechniken, die auf einer Vielzahl von verschiedenen Baugruppen mit hohen Anforderungen an die elektrischen Parameter basieren, können damit relativ kurzfristig Voraussetzungen für eine wesentliche Steigerung der Integration geschaffen werden. Während das Aufdampfen im Hochvakuum und die Katodenzerstäubung wegen der arteigenen Verfahren sich hauptsächlich für eine Großserienfertigung beim Spezialhersteller eignen, lassen die modernen Verfahren der Elektronenstrahlfräsung und der Mikrogravierung, die eine von technologischen Belastungen weitgehend freie Programmierung der Anlage gestatten, einen Erfolg dieser Bestrebungen erwarten.

2.3.1. Substrate

Das geometrische Muster von Dünnschichtschaltkreisen erstreckt sich in Anpassung an die jeweilige Anwendung und unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Herstellung normalerweise

über eine Fläche von etwa 10 . . . 1000 mm^2. Die Dicke der Substrate paßt sich diesen Abmessungen an und liegt in der Regel unter einem Millimeter.
Dünnschichtschaltkreise mit kleinen Abmessungen stellen wegen der im allgemeinen sehr geringen Schichtdicke hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität der Substrate. Aus diesem Grund werden gern Glassubstrate verwendet, obwohl Keramik als Substratwerkstoff wegen der besseren Wärmeleitung eine günstigere Verteilung der Verlustwärme der einzelnen Elemente über das gesamte Substrat bringen würde. Bei Schaltkreisen mit größeren Abmessungen sind die Ansprüche meist bescheidener, so daß in diesem Fall die Oberflächenqualität einer glasierten Keramik mit guter Wärmeleitfähigkeit oft ausreichend ist. Im einzelnen sind die Anforderungen, welche die einzelnen Anwendungsfälle an das Substrat stellen, und die Möglichkeit der Werkstoffe und Bearbeitungstechnologien bereits im Abschnitt 2.1.2. dargelegt worden. Bei integrierten Schaltkreisen in Form der Festkörper-Hybrid-Technik dient der die aktiven Elemente des Schaltkreises enthaltende Siliziumblock als Substrat. Zwischen dem Silizium und den Elementen und Leiterzügen des Dünnschichtschaltkreises liegt eine Oxidschicht, die in ihren Eigenschaften dem Quarzglas entspricht.

2.3.2. Dünnschichttechnologien

2.3.2.1. Herstellung dünner Schichten

Der Herstellung dünner Schichten dienen nach dem gegenwärtigen Stand vorwiegend zwei Verfahren: das Aufdampfen im Hochvakuum und die Katodenzerstäubung.

Aufdampfverfahren im Hochvakuum

Das Aufdampfen im Hochvakuum ist sicher das gegenwärtig verbreitetste Verfahren zum Aufbringen dünner Schichten bei der Herstellung integrierter Schaltkreise (Bild 13). Das Schichtmaterial wird dabei in einem evakuierten Gefäß durch Erwärmen in die

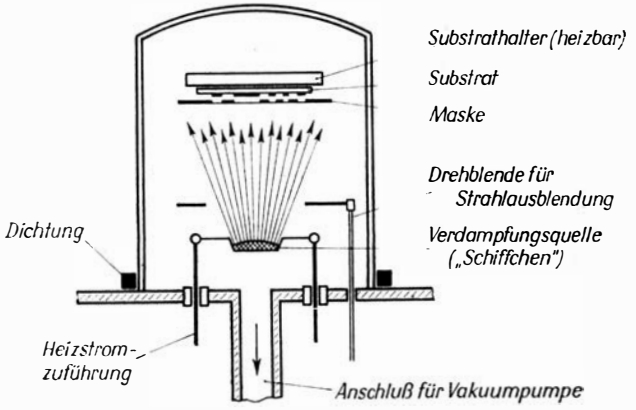


Bild 13. Einrichtung zur Bedampfung im Hochvakuum (Prinzip)

Tabelle 7. Quellentemperaturen und Niederschlagsraten verschiedener Materialen (Abstand Quelle/Substrat etwa 25 cm, *Verdampfungsrate* $r = 10^{-3}$ g/cm²s)

Material	Quellentemperatur °C	Niederschlagsrate nm/s
Ag	1071	0,47
Al	1312	1,8
Au	1591	0,26
C	3050	2,2
Cr	1341	0,69
Cu	1252	0,56
Fe	1740	0,63
Ge	1410	1,1
In	1053	0,68
Si	1513	2,1
SiO	etwa 1250	etwa 2,0
Ni	1662	0,58
Pb	786	0,44
Sn	1334	0,68
Ta	3350	0,30

Gasphase überführt und kondensiert auf dem in geeigneter Weise angeordneten Substrat. Dazu ist es notwendig, den Druck im Gefäß auf $10^{-4} \ldots 10^{-7}$ Torr abzusenken und das Schichtmaterial auf eine Temperatur zu bringen, die eine ausreichende Dampfdichte gewährleistet. Die verdampfenden Materialteilchen breiten sich dann nahezu ohne Streuungen und Wirbel geradlinig wie Lichtstrahlen aus. Sie kondensieren an allen Flächen, die kühler sind als das als Strahlungsquelle zu betrachtende Schichtmaterial, und überziehen diese mit einer dünnen Schicht.

Tabelle 7 nennt für einige Materialien die Niederschlagsraten für gängige Werte der Quellentemperatur, des Abstandes Quelle/Substrat (etwa 25 cm) und der Verdampfungsrate (etwa 10^{-3} g/cm^{2}s).

Um auf dem Substrat eine gute Haftfestigkeit zu erzielen, ist vor dem Bedampfen eine sorgfältige Reinigung der Substratoberfläche notwendig. Ein Erwärmen des Substrats auf wenige 100 °C fördert die Ausbildung der Schichtstruktur und damit ebenfalls die Festigkeit der Schicht sowie die Stabilität der elektrischen Parameter.

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Haftfestigkeit besteht bisweilen darin, unter die eigentliche Schicht eine wenige Atomlagen starke Zwischenschicht eines geeigneten »Bekeimungs«-Materials zu dampfen. Eine Chromschicht verbessert beispielsweise die Haftfestigkeit einer Goldschicht auf Glas außerordentlich.

Die Dicke der entstehenden Schichten nimmt normalerweise im Zentrum des auftreffenden Dampfstrahles rascher zu als an den Rändern. Dieses Verhalten ist auf die cosinusförmige Verteilung der auftreffenden Teilchen infolge der relativ geringen Ausdehnung der Quelle zurückzuführen. Großflächigere Quellen sind schwer zu verwirklichen und bringen wegen der kaum vermeidbaren Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche keine entscheidende Verbesserung. Die mit der gleichmäßigen Bedampfung größerer Flächen verbundenen Schwierigkeiten tragen zum bedeutenden Teil zur Begrenzung der bearbeitbaren Substratfläche bei.

Alle Fremdatome bzw. -moleküle, die sich während des Aufdampfprozesses in der Schicht einlagern, haben einen wesentlichen Einfluß auf die mechanischen und elektrischen Parameter. Fremdatome und -moleküle sind im Rezipienten in Form von Restgas enthalten und werden außerdem bei ungünstigem Aufbau

der Verdampferanordnung von den Gefäßwandungen und Armaturen abgegeben. Am schwierigsten ist die Beherrschung dieses Problems im Zusammenhang mit der Verdampfungsquelle. Diese besteht im einfachsten Falle aus dem in einem kleinen Behälter, dem »Schiffchen«, enthaltenen Schichtmaterial, welches sich gemeinsam mit diesem auf der Verdampfungstemperatur befindet. Die Erwärmung erfolgt entweder auf induktivem Wege durch einen starken, im Schiffchen fließenden elektrischen Strom oder durch ein Elektronenbombardement des Schiffchens. Im ersten Fall ist ein leitendes Material erforderlich; in den folgenden Fällen kann ein nichtleitendes Material Verwendung finden, wobei das Verdampfungsgut bei der induktiven Erwärmung eine gewisse Leitfähigkeit haben muß. Die Schiffchenmaterialien müssen eine hohe Temperaturfestigkeit aufweisen und dürfen nicht mit dem Schichtmaterial reagieren. Der Dampfdruck muß bei der Verdampfungstemperatur des Schichtmaterials so gering sein, daß die Anzahl der Teilchen vom Schiffchenmaterial im Dampfstrahl nur unbedeutend ist. Die nichtleitenden Schiffchenmaterialien, wie beispielsweise Quarz, sind aus diesem Grunde in den meisten Fällen vorteilhafter als Metalle.

Die für sehr viele Filme erforderlichen Legierungen komplizieren das Problem Strahlungsquelle noch weiter. Legierungen verdampfen fraktioniert, wenn der Dampfdruck der Komponenten nicht annähernd gleich ist. Die gemeinsame Verdampfung der Legierungsbestandteile aus einem Schiffchen bereitet deshalb in den meisten Fällen erhebliche Schwierigkeiten. Gegebenenfalls läßt sich das in der Schicht gewünschte Komponentenverhältnis für eine kurze Zeit dadurch erhalten, daß nur ein geringer Prozentsatz des aufgeschmolzenen Materials verdampft wird. Das getrennte Verdampfen der verschiedenen Legierungsbestandteile bietet für das Labor einen Ausweg, ist jedoch für die Fertigung zu aufwendig. Eine weitere Möglichkeit liegt in der sogenannten »Blitzverdampfung«. Dabei werden die Bestandteile der aufzudampfenden Legierung in der gewünschten Dosierung gemeinsam auf eine glühende Fläche gebracht, wobei sie gleichzeitig schlagartig verdampfen. Für eine kontinuierliche gleichmäßige Fertigung dürfte auch dieses Verfahren kaum vorteilhaft sein.

Ein bereits eingesetztes Verfahren umgeht einen Großteil der auftretenden Probleme nahezu vollkommen: die Verdampfung im

Elektronenstrahl (Bild 14). Der Elektronenstrahl wird dabei auf die Stirnseite des draht- bzw. stabförmigen Schmelzgutes gelenkt und bringt das Material an dieser Stelle zum Verdampfen. Da die Schmelzzone nur von geringer Ausdehnung ist, kann auf ein Schiffchen vollkommen verzichtet werden. Das Schmelzgut wird kontinuierlich nachgeschoben. Das Verarbeiten von Legierungen ist mit einer derartigen Anordnung ohne nennenswerte Probleme möglich. Darüber hinaus lassen sich auch Materialien gemeinsam verdampfen, die nicht miteinander legieren. Sie werden in Form eines gesinterten Stranges zugeführt, der die einzelnen Bestandteile in einem gründlich gemischten Zustand enthält. Elektronenstrahlverdampfer gewährleisten konstante Aufdampfparameter über mehrere Stunden und eignen sich deshalb vorzüglich für die Fertigung.

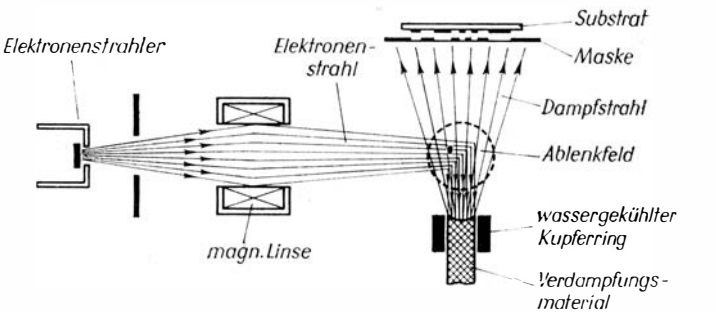


Bild 14. Tiegelfreier Elektronenstrahl-Verdampfer (Prinzip)

Obwohl die Verdampfung im Hochvakuum vom Prinzip her ein relativ einfacher Prozeß ist, bereitet, wie die detaillierten Darlegungen im Zusammenhang mit der Verdampfungseinrichtung zeigten, die Herstellung gleichmäßiger Schichten in der Fertigung doch erhebliche Schwierigkeiten. Neben dem beträchtlichen Aufwand für die Entwicklung der Technologien erfordert die genaue Überwachung der verschiedenen Parameter — Druck und Zusammensetzung der Restgasatmosphäre, Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur der Substrate sowie Qualität des zu verdampfenden Materials u. a. — einen erheblichen apparativen Aufwand. Die

Kosten für die Überwachungseinrichtungen liegen auf der Höhe der Kosten für die Vakuumeinrichtung.

Katodenzerstäubung

Die Katodenzerstäubung eignet sich vor allem für die Herstellung von Schichten aus schwer verdampfbarem Material. Unter Anwendung spezieller Methoden lassen sich auf diesem Wege auch Isolierfilme aufbringen.

Die Zerstäubung erfolgt bei einem Druck von etwa $10^{-1} \ldots 10^{-3}$ Torr in einem Gas, das die Ionen zum Zerstäuben stellt, aber nicht mit dem Schichtmaterial reagieren darf (Edelgas). Zwischen zwei Elektroden entsteht nach dem Anlegen einer Hochspannung eine Entladungsstrecke, in deren Dunkelraum die positiven Ionen des üblicherweise angewandten Argons in Richtung auf die Katode beschleunigt werden. Sie prallen da auf das die Katode bildende zu zerstäubende Material und schlagen Materialteilchen heraus (Bild 15). Ein Teil dieser Atome und Moleküle gelangt zur Anode und kondensiert auf dem dort angeordneten Substrat. Wegen der starken Streuung in der verhältnismäßig dichten Rest-

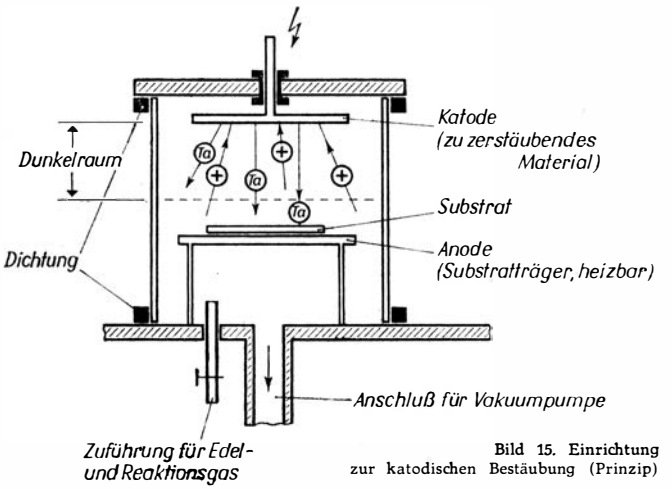


Bild 15. Einrichtung zur katodischen Bestäubung (Prinzip)

gasatmosphäre bewegen sich die abgestäubten Teilchen jedoch nicht gradlinig, so daß eine Beschichtung des Substrats über Wechselmasken, wie sie beim Aufdampfen im Hochvakuum sehr nutzbringend anwendbar ist, bei der Katodenzerstäubung unscharfe Konturen ergibt. Die beiden sich gegenüberstehenden Elektroden haben in der Regel einen Abstand von wenigen Zentimetern.

Besondere Vorzüge des Verfahrens, die seine Anwendung in verschiedenen Fällen zweckmäßig erscheinen lassen, sind der Verzicht auf Armaturen, die einer hohen Temperaturbelastung unterliegen, die Möglichkeit, Legierungen auf einfache Weise im vorgegebenen Verhältnis der Komponenten als Schicht niederzuschlagen und die Möglichkeit zur Einhaltung einer gleichmäßigen Schichtdicke über relativ große Flächen durch die Anwendung großflächiger Katoden. Durch den Verzicht auf thermisch hoch belastete Materialien wird eine zusätzliche Verunreinigung der Atmosphäre und der Schichten vermieden. Die Beibehaltung der Komponentenverhältnisse bei der Verarbeitung von Legierungen ergibt sich aus der gleichmäßigen Abtragung der Katodenoberfläche durch den Ionenbeschuß.

Die Niederschlagsraten sind in engen Toleranzen reproduzierbar. Zur Vermeidung von Unregelmäßigkeiten durch elektrostatische Aufladungen und gegenseitige Abstoßung der abgestäubten Atome und Moleküle sind dabei jedoch besondere Maßnahmen, wie Erwärmung des Substrates auf einige 100 °C und die Anordnung von geerdeten netzförmigen Elektroden im Entladungsraum, notwendig.

Zusätzliche bzw. besondere Einrichtungen sind für die Zerstäubung von Isolierstoffen, wie sie u. a. für das Dielektrikum von Kondensatoren benötigt werden, erforderlich. Die Problematik besteht darin, daß sich der die Katode bedeckende Isolierstoff durch die auftreffenden positiven Ionen sehr schnell auf ein positives Potential auflädt und dann alle weiteren Ionen zurückstößt. Da die Katode bei einem derartigen Ladungszustand zudem keine Elektronen zur Ionisierung neuer Gasmoleküle emittiert, erlischt die Glimmentladung.

Ein kontinuierlicher Ablauf der Zerstäubung läßt sich durch Zuführung der fehlenden Elektronen aus einer gesonderten Quelle (Triodenzerstäubung) oder durch eine Speisung der Entladungsstrecke mit einer Wechselspannung verwirklichen. Für die erst-

genannte Methode ist eine Glühkatode, die an beliebiger Stelle im Druckgefäß angeordnet sein kann, erforderlich. Bei der zweiten Methode neutralisiert die entgegengesetzte Halbwelle der Wechselspannung die auf der Oberfläche des Isolierfilms gespeicherte Ladung. Die Wiederzerstäubung der bereits auf dem Substrat niedergeschlagenen Schicht läßt sich durch eine zweckmäßige Anordnung des Substrats und durch eine passende Wahl von Frequenz, Amplitude und Kurvenform der Wechselspannung geringhalten.

Eine weitere Möglichkeit zur Zerstäubung von Isolierstoffen bietet die elektrodenlose Anregung der Gasentladung durch eine über eine Spule eingekoppelte hochfrequente elektromagnetische Energie.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Schichteigenschaften hat die Zusammensetzung des Gases im Druckgefäß. Voraussetzung für die Herstellung reiner Schichten ist deshalb eine weitgehende neutrale Atmosphäre. Diese Abhängigkeit, die auf der einen Seite sehr unangenehm ist, läßt sich andererseits sehr vorteilhaft nutzen. Die genau dosierte Zuführung geeigneter Gase, wie Stickstoff und Sauerstoff u. a., bietet die Möglichkeit zur gezielten Veränderung der Eigenschaften der Schichten. Dieses Verfahren, das unter der Bezeichnung reaktive Zerstäubung bekannt ist, basiert auf der hohen Reaktionsfähigkeit ionisierter Gase und erlaubt die Herstellung von Schichten aus Metalloxiden, -nitriden und -karbiden.

Verfahren mit geringerer Anwendungsbreite

Neben den beiden bedeutenden Verfahren zur Herstellung dünner Schichten auf Substraten für integrierte Schaltkreise existiert noch eine Reihe von Verfahren, die im engeren Rahmen im wesentlichen für spezielle Zwecke eingesetzt werden. Die bekanntesten davon basieren auf dem Niederschlag der Schichten durch chemische Reaktion aus der Gasphase, auf dem elektrolytischen Niederschlag und stromlosen Abscheidungen sowie auf der anodischen und thermischen Oxydation von Oberflächen.

Mit dem erstgenannten Verfahren lassen sich in Prozessen, die als Pyrolysen bezeichnet werden, Schichten aus schwer schmelzbaren Materialien vorwiegend durch Reduktion herstellen. Sekundär-

reaktionen bringen daneben auch chemische Verbindungen dieser Elemente hervor, insbesondere Sauerstoffverbindungen und Verbindungen mit Substratmaterialien. Die Vorteile des Verfahrens liegen im relativ geringen Aufwand und in der niedrigen Temperaturbelastung des Substrats. Darüber hinaus ermöglicht der gasförmige Aggregatzustand eine einfache und exakte Dosierung und innige Mischung sowie »Verdünnung« mit neutralen Gasen.
Die auf Abscheidungen aus Metallsalzlösungen mit und ohne Stromzufuhr beruhenden Verfahren lassen sich bei der Herstellung von Dünnschichtschaltkreisen unter normalen atmosphärischen Bedingungen zur Erzeugung und vor allem zur Verstärkung von bereits auf anderen Wegen hergestellten Metallschichten nutzen. Eine besonders sinnvolle Anwendung der stromlosen Abscheidung ist die Verstärkung nicht zusammenhängender Metallschichten auf Isolierkörpern.
Bei der anodischen Oxydation oxydiert die Oberfläche einer Metallschicht unter dem Einfluß des bei der hydrolytischen Elektrolyse an der Anode freiwerdenden Sauerstoffs. Die entstehende Oxidschicht ist u. a. bei Aluminium, Tantal und Titan nahezu porenfrei und hat eine hohe mechanische, thermische und chemische Stabilität. Die Dicke der Oxidschicht läßt sich in einem weiten Bereich über die angelegte Spannung sehr fein regulieren. Eine sehr bedeutende Nutzung dieses Effekts erfolgt beim Abgleich von Tantalwiderständen. Hier wird die Dicke der Tantalrestschicht sehr eng toleriert auf einen bestimmten Widerstandswert eingestellt. Die entstehende Oxidhaut dient dem Widerstand gleichzeitig als Schutzschicht gegen klimatische Einflüsse.
Die thermische Oxydation erfolgt bei hohen Temperaturen in einer Sauerstoffatmosphäre. Die entstehenden Schichten sind bei sorgfältig durchgeführten Verfahren porenfreier als Kondensatfilme. Der Nachteil des Verfahrens besteht in der hohen thermischen Belastung des Substrats.

2.3.2.2. Geometrie der Schaltkreise

Die Herstellung des geometrischen Musters der Schaltung ist neben dem Aufbringen der Schichten die bedeutendste Grundoperation bei der Produktion von Dünnschichtschaltkreisen. Üb-

liche Verfahren sind das Fotoätzen, das Aufdampfen über Wechselmasken und das »Ausfräsen« der Struktur. Beim gezielten Aufdampfen sind Schicht und Musterherstellung miteinander verflochten.

Fotoätzverfahren

Bei modernen Verfahren dieser Art entsteht das geometrische Muster der Schaltung durch einen ein- oder mehrmalig angewandten selektiven Ätzvorgang. Dabei werden die für das Muster nicht erforderlichen Flächen der Schicht abgetragen. Die Vorarbeiten für den Ätzvorgang bestehen im Aufbringen der Schicht und der Haftmasken. Die erforderlichen Metall- und Isolierschichten werden über das gesamte Substrat in mehreren Schichten niedergeschlagen. Üblicherweise erfolgen die notwendigen Arbeitsgänge in einem einzigen Vakuumprozeß.

Für die Herstellung der Haftmasken ist es zunächst notwendig, eine geschlossene Schicht eines lichtempfindlichen Lackes aufzutragen. Nach dem unter Lichtabschluß erfolgenden Trockenvorgang wird die Lackschicht über eine optische Maske belichtet (Bild 16). Die Maske enthält den für die jeweilige Schicht bestimmten Teil des Schaltungsmusters.

Die belichteten Flächen der Lackschicht polymerisieren bei einer anschließenden Wärmebehandlung und werden dabei gegen die im folgenden Arbeitsgang angreifende Entwicklerlösung beständig. Die unbelichteten Flächen gehen im Entwickler in Lösung. Auf diese Weise ist eine unmittelbar auf der zu ätzenden Schicht haftende Maske entstanden. Beim nachfolgenden Ätzvorgang findet die Ätzflüssigkeit nur an den unbedeckten Flächen Zutritt zur auszuarbeitenden Schicht. Die schützende Lackschicht läßt sich nach dem Ätzprozeß ablösen.

Die Anfertigung der für die Belichtung der Lackschicht notwendigen optischen Masken (Fotoschablonen) erfordert zunächst die Aufzeichnung des Schaltungsmusters in einer stark vergrößerten Darstellung; übliche Formate liegen in der Größe bis zu 1 m^2. Die Darstellung erfolgt entweder mit Tusche auf aluminiumkaschiertem, unverziehbarem Karton oder durch Herausschneiden der Deckschicht einer zweischichtigen Kunststoffolie mittels eines

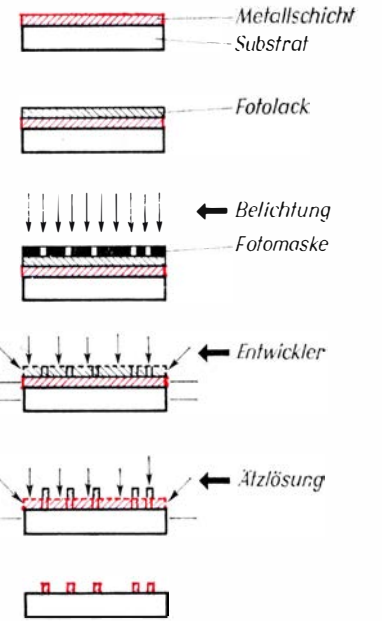


Bild 16. Fotoätzverfahren
Substrat mit Metallschicht
Beschichtung mit Fotolack
Belichtung über Fotomaske
Entwicklung der belichteten Lackschicht und Herauslösen der unbelichteten Schichtteile
Ätzen der Metallschicht
Profil des ausgeätzten Filmmusters nach Abschluß des Prozesses

Koordinatografen. Die kontrastreiche Vorlage wird anschließend stark verkleinert; eine lineare Verkleinerung im Verhältnis 500 : 1 ist dabei keine Seltenheit. In der Mehrzahl der Fälle sind dazu zwei Stufen notwendig. Die zweite Stufe wird, wenn auf einem Substrat mehrere gleiche Schaltkreise hergestellt werden sollen, gleichzeitig zur Vervielfältigung des Musters genutzt. Dieser Aufgabe dient eine sogenannte »Step-Repeat«-Kamera, die es gestattet, auf einer Fotoplatte mehrere gleiche Abbildungen der Vorlage nebeneinanderliegend anzuordnen. Jede Abbildung hat im allgemeinen die Größe des gewünschten Dünnschichtmusters. Das entstehende Negativ kann wie ein Fotonegativ als optische Maske verwendet werden.

Als Träger der Fotoemulsion dienen in jedem Fall hochwertige Präzisionsgläser. Von der Fotoemulsion selbst wird ein hohes Auflösungsvermögen verlangt. Nach dem gegenwärtigen Stand sind 400 noch trennbare Linien je Millimeter erreichbar. Die Auf-

lösung wird durch zwei Erscheinungen begrenzt: Einerseits durch die Korngröße und -dichte der Emulsion und andererseits durch Lichthöfe, die infolge von Streuungen in der Emulsion und Reflexionen an der Oberfläche des Glasträgers auftreten. Dadurch und durch die Zeichnungsgenauigkeiten bei der Herstellung der Vorlage ist die erreichbare Feinheit in der Struktur von Fotomasken festgelegt.

Die Auflösung des Dünnschichtmusters auf dem Substrat hängt von der Feinheit und Qualität der Maske, der Präzision der Abbildungsoptik und dem Auflösungsvermögen des lichtempfindlichen Lackes für die Haftmaske ab. In der Fertigung sind Muster, die Linien im Abstand von 10 µm aufweisen, noch sicher zu beherrschen.

Verbesserungen in der Auflösung sind in Zukunft durch die Anwendung energiearmer Elektronenstrahlen anstelle von Lichtstrahlen zu erwarten. Durch die Möglichkeit, den Elektronenstrahl sehr scharf zu bündeln, lassen sich mit geeigneten Emulsionen wesentlich schärfere Konturen verwirklichen. Darüber hinaus gestattet die einfache elektrische Ablenkbarkeit von Elektronenstrahlen eine unmittelbare Belichtung des Fotolackes auf der zu ätzenden Schicht. Fotomasken und die damit verbundene Verschlechterung der Auflösung durch die Streuung der Lichtstrahlen an den Kanten entfallen vollkommen. Die Muster entstehen auf Grund von Änderungen der Ablenkspannung an den »Elektronenlinsen«. Da sich die Spannungsänderungen in einfacher Weise u. a. auf Magnetbändern speichern lassen, bietet dieses Verfahren neben der höheren Auflösung eine günstige Basis für eine weitgehende Automatisierung der Fertigung.

Ein besonderes Anwendungsgebiet des Fotoätzverfahrens ist die Herstellung von Schaltkreisen auf der Basis von Tantal. Im Idealfall können dabei alle Elemente eines Schaltkreises selektiv aus einer Tantalschicht herausgeätzt (Bild 17) und Schutz- und dielektrische Schichten durch eine anschließende Oxydation erzeugt werden.

Wegen des schmalen Spektrums der realisierbaren Bauelemente ist dieses an sich bestechend einfache Verfahren nicht so universell anwendbar, wie anfänglich erwartet wurde. Die Erweiterung des Spektrums erfordert die Anwendung weiterer Werkstoffe, z. B. Gold für die Leiterbahnen und Gegenelektroden der Kon-

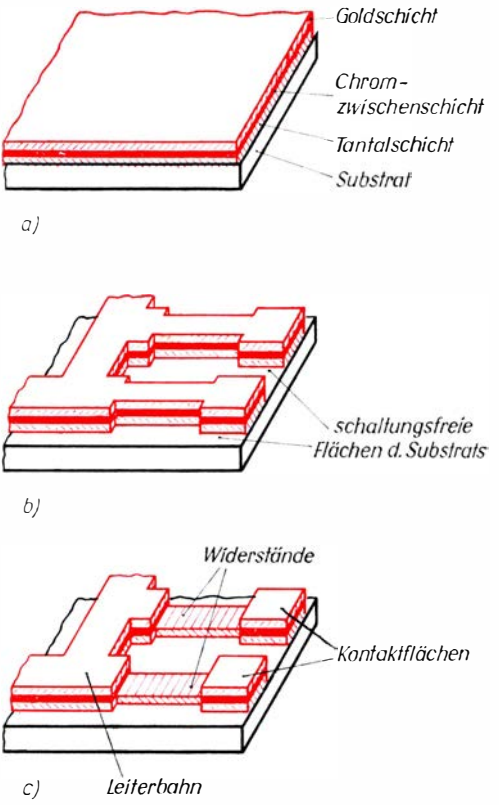


Bild 17
Tantal-Dünnschicht-technik auf der Basis von Sandwichplatten
a) Sandwichplatte
b) Ergebnis der ersten Bearbeitungsstufe: Die für die Schaltung nicht benötigten Substratflächen sind von allen Schichten befreit
c) Passive Dünnschichtschaltung mit den von der Leiterschicht freigeätzten Widerständen

densatoren, und zusätzliche Prozesse, die größtenteils einen beträchtlichen Aufwand verursachen. Auf Grund dieser Vielgestaltigkeit ist der Fertigungsablauf einer fortgeschrittenen Automatisierung sehr schlecht zugänglich.

Ein für spezielle Fälle nutzbarer Vorteil des Verfahrens liegt in der Tatsache, daß die maximal bearbeitbare Fläche nur durch die jeweiligen technischen Gegebenheiten, jedoch in keiner Weise durch prinzipielle Grenzen eingeschränkt ist.

Aufdampfen über Wechselmasken

Die bei dem Aufdampfverfahren von der Verdampfungsquelle zum Substrat strebenden Materialteilchen bewegen sich wie die Lichtstrahlen nahezu gradlinig. Diese Tatsache ermöglicht eine sehr zweckmäßige Erweiterung des Verfahrens: das Aufdampfen über Schablonen oder Wechselmasken. Dabei entsteht die gewünschte Struktur in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Aufbringen der Schichten.

Die Wechselmasken werden zwischen Quelle und Substrat angeordnet und haben keine feste Verbindung zum Substrat. Der Abstand beträgt jedoch üblicherweise nur Bruchteile eines Millimeters, während der Abstand zur Quelle zwischen 10 und 30 cm liegt. Wenn das Substrat und alle Schablonen, die für die Herstellung eines Schaltkreises auf diesem Substrat notwendig sind, vor dem Evakuieren eingebracht werden, läßt sich ein Schaltkreis ohne Unterbrechung des Vakuums komplett bedampfen. Dem Transport der Schablonen in die vorgesehene Position dienen bei der Laborherstellung Mikromanipulatoren, welche die Bewegungen der Hand im Verhältnis von etwa 20 : 1 untersetzen. Fertigungseinrichtungen enthalten zur genauen Positionierung eng tolerierte Aufnahmen. Nach dem gegenwärtigen Stand der Technik lassen sich von Schablone zu Schablone Toleranzen von wenigen Mikrometern einhalten.

Die Schablonen funktionieren im Prinzip (Bild 18) in der gleichen Weise wie die bereits beschriebenen optischen Masken. Da die durchlässigen Flächen jedoch nicht nur von Lichtstrahlen, sondern vor allem von Materialstrahlen durchdrungen werden müssen, sind bei den Schablonen, im Gegensatz zu den optischen Masken, Durchbrüche erforderlich. Dadurch wird die Herstellung von Schablonen wesentlich aufwendiger als die Herstellung vergleichbarer optischer Masken. Von besonderer Bedeutung ist dabei die an sich selbstverständliche Tatsache, daß alle Elemente des Musters sehr stabil miteinander verbunden sein müssen. Sie bedingt in vielen Fällen, beispielsweise bei mäanderförmigen Widerständen, die Aufteilung eines bestimmten Musters auf mehrere Schablonen (s. Bild 30).

Die Anfertigung der Schablonen erfolgt in den weitaus meisten Fällen nach dem Fotoätzverfahren mit den bereits dargestellten

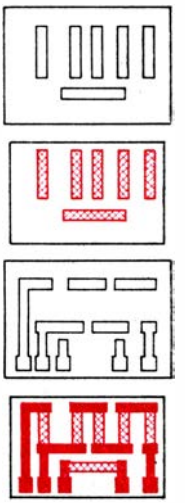


Bild 18. Aufdampfverfahren über Wechselmaske
Maske zum Herstellen von Widerständen
Über die Widerstandsmaske bedampftes Substrat
Maske für Leiterzüge und Kontakte
Substrat nach der Bedampfung über die Widerstandsmaske und die Leitermaske

Teilschritten. Als Material kommen dünne Bleche aus Edelstahl, Molybdän, Nickel, Kupfer u. a. in Betracht. Wesentlichen Einfluß auf die Herstellung und die Eigenschaften der Schablonen haben Forderungen, die auf einen kleinen Abstand zwischen Wechselmaske und Substrat sowie eine geringe Dicke der Wechselmaske hinzielen. Diese Forderungen sind notwendig, weil die zum großen Teil nicht senkrecht zur Oberfläche einfallenden Materialteilchen mit größer werdendem Abstand und wachsender Dicke eine zunehmende Verfälschung der geometrischen Abmessungen verursachen. Voraussetzung für einen geringen Abstand ist eine günstige Gestaltung der Halterung und vor allem eine hohe Stabilität der in vielen Fällen sehr stark durchbrochenen Schablonen. Hohe Stabilität auf der einen Seite und eine geringe Dicke auf der anderen bedingen einen Kompromiß. Maßhaltige Ätzungen bereiten bei großen Materialstärken erhebliche Schwierigkeiten. Diese sind darauf zurückzuführen, daß die Ätzflüssigkeit in Richtung der Oberfläche ebensoviel Material abträgt wie in der Tiefe.

Kleinere Schablonen mit einer Fläche von wenigen Quadratzentimetern werden durch eine beiderseitige Ätzung aus dünnen

Blechen gefertigt. Voraussetzung ist eine vor- und rückseitige Beschichtung mit Fotolack und eine anschließende deckungsgleiche Belichtung beider Seiten über eine optische Maske. Eine andere Methode geht von dünnen Folien aus, die in einem Tiefziehprozeß über die Stirnseite eines geeigneten Hohlkörpers gespannt werden.

Schablonen in der Größe ab etwa 1 dm^2 müssen im Interesse einer befriedigenden Stabilität eine größere Dicke aufweisen. Um die Unschärfen in den Randzonen und die technologischen Probleme in Grenzen zu halten, können diese Schablonen in zwei Stufen geätzt werden (Bild 19). Die erste Ätzung dient der Herstellung der eigentlichen Schablone und geht bis zu einer Tiefe von etwa 10 µm. Eine zweite Ätzung erfolgt mit etwas weiteren Öffnungen von der Rückseite bis zum Durchbruch auf das Muster der ersten Ätzung. Als Endprodukt entsteht auf der dem Substrat zugewandten Seite eine etwa 10 µm starke Schablone, die organisch mit einem sehr stabilen Träger verbunden ist. Für die Genauigkeit beim Ätzvorgang ergeben sich durch die im dickeren Träger weiteren Durchbrüche wesentliche Erleichterungen.

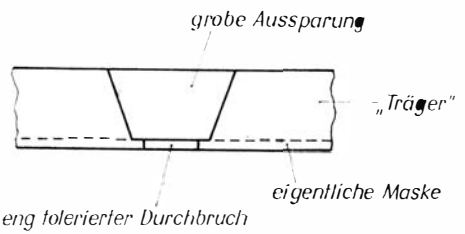


Bild 19
Ausschnitt aus einer großflächigen und deshalb besonders stark gehaltenen Wechselmaske mit abgesetzten Durchbrüchen

Gewissermaßen als Umkehrung des Fotoätzverfahrens ist eine zweite Möglichkeit zur Herstellung von Schablonen anzusehen. Sie basiert auf der elektrolytischen Abscheidung von Metallen. Eine mit Fotolack beschichtete Unterlage wird dazu so maskiert, daß die Flächen, auf denen eine Filmbildung nicht erwünscht ist, weil die Schablone dort Durchbrüche aufweisen soll, durch einen Lackfilm abgedeckt sind. Die auf diese Weise als Metallfilm entstehende Schablone kann in gewünschtem Maße verstärkt werden und läßt sich im Falle größerer Dicken auch in mehreren Stufen aufbauen.

Verfahren, welche die Durchbrüche mit Hilfe der Funkenerosion oder mit verhältnismäßig energiereichen Elektronenstrahlen ausfräsen, eignen sich ebenfalls sehr gut zur Herstellung von Schablonen aus den verschiedensten Materialien. Sie werden in Zukunft wegen der guten Programmierbarkeit des Arbeitsablaufs stark an Bedeutung gewinnen.

Als Material für besonders stabile Schablonen eignet sich ein unter dem Namen »Fotoform« bekanntes Glas, welches ein ähnliches Verhalten aufweist wie eine Fotoemulsion. Nach einer Belichtung über eine optische Maske wandelt eine anschließende Wärmebehandlung die Struktur des Glases. An den belichteten Stellen löst es sich in Flußsäure etwa 15mal schneller als an den unbelichteten. Die Ätzungen sind dabei sehr steilwandig. Während sich bei normalen Materialien ein Winkel von etwa 45° einstellt, liegt er beim Fotoformglas nur bei 4°. Nach einer speziellen Nachbehandlung haben derartige Schablonen eine hervorragende Temperaturbeständigkeit und eine geringe Wärmeausdehnung.

Gegenüber dem Fotoätzverfahren ist die Auflösung der Struktur beim gezielten Aufdampfen wegen der bereits erwähnten Kanteneffekte etwas geringer. Demgegenüber stehen als bedeutende Vor-

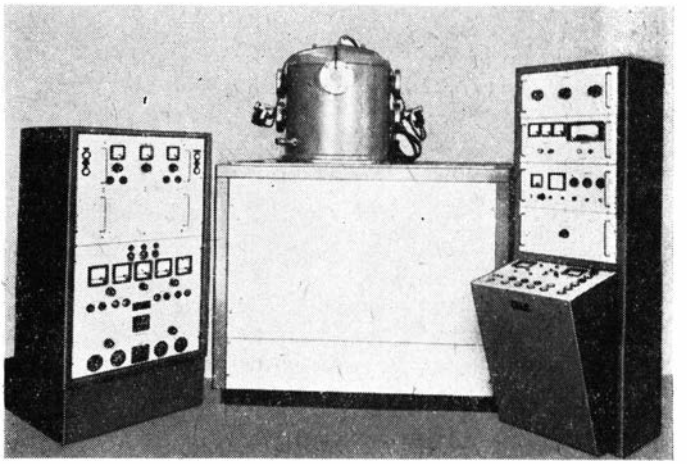


Bild 20. Diskontinuierlich arbeitende Bedampfungsanlage für die Vakuumdeponierung von 12 Substraten mit den Abmessungen 60 mm × 80 mm

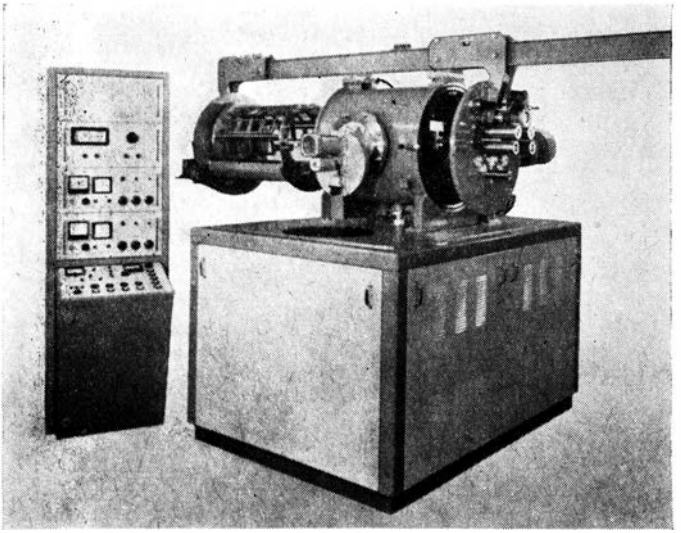


Bild 21. Trommelbedampfungsanlage für diskontinuierlichen Betrieb zur Bedampfung von 48 Substraten mit den Abmessungen 60 mm × 80 mm

teile zugunsten des Aufdampfverfahrens bessere Voraussetzungen zur Gestaltung des Arbeitsablaufs und die Möglichkeit, durch Anwendung verschiedener Materialien einen großen Wertebereich der Elemente und Anpassung an alle Anforderungen der Schaltungstechnik zu erzielen.

Nach einer einmaligen Evakuierung lassen sich mehrere Substrate komplett bedampfen, wenn sie vorher in eine dafür vorgesehene Anlage (Bilder 20 und 21) eingebracht oder in einer Durchlaufanlage bearbeitet werden. Bei den nach dem Durchlaufprinzip arbeitenden Einrichtungen werden die Substrate nacheinander einzeln oder in Gruppen über Druckschleusen eingeführt und durchlaufen in mehreren Stufen die verschiedenen Schablonen sowie die dazugehörigen mit den verschiedenen Materialien beschickten Verdampfungsquellen. Die Substrate weisen üblicherweise eine Fläche von etwa 30 . . . 60 cm^2 auf und können mit mehreren kleineren Schaltkreisen oder einem großen, eine komplexe Schaltung enthaltenden Kreis bedampft werden. Verschie-

dene Hersteller haben Fertigungsanlagen installiert, die eine Stundenleistung von 750 Schaltkreisen bringen können.

»Fräsverfahren«

In neuerer Zeit gewinnen Verfahren, bei denen Schaltkreise auf vorher beschichteten Substraten durch ein »Ausfräsen« der Struktur hergestellt werden, in zunehmendem Maße an Bedeutung. Als »Fräser« dienen Elektronen- oder Laserstrahlen sowie Funkenentladungen im Dielektrikum. Der besondere Vorteil dieser Verfahren sind die überaus günstigen Voraussetzungen, die sie für eine fortgeschrittene Automatisierung bieten.
Alle genannten Verfahren lassen sich durch elektrische Signale in mehr oder weniger einfacher Weise steuern. Die Steuerung kann über einen Rechner oder ein spezielles Steuergerät erfolgen, ohne daß Zeichnungsunterlagen erforderlich sind. Die Speicherbarkeit der Signale gestattet eine einfache Programmierung des Fertigungsablaufs. Durch die Möglichkeit, sie über größere Entfernungen zu übertragen, bestehen günstige Voraussetzungen für eine Steuerung des Fertigungsprozesses von entfernt liegenden Entwicklungsstellen und Betriebsteilen.
Als »Grundmaterial« kommen Substrate zur Anwendung, die entweder über die gesamte Fläche mit einer Schicht aus Widerstands- oder Leitermaterial bedeckt sind oder bereits eine Vorstrukturierung aufweisen. Die Fräsverfahren ermöglichen im Zusammenhang mit diesen vorgefertigten Substraten eine wirtschaftliche Anwendung integrierter Dünnschichtschaltkreise auch dann, wenn nur sehr kleine Stückzahlen gleicher Schaltkreise notwendig sind.
Die Materialabtragung mittels Elektronen- oder Laserstrahlen basiert auf dem Wärmeeffekt, der im Brennpunkt dieser Strahlen auftritt. Unter dem Einfluß der an dieser Stelle wirksamen Erhitzung verdampfen die auf dem Substrat haftenden Metallschichten, andererseits kann die enge örtliche Begrenzung der Hitze zu Mikrorissen im Substrat führen. Der einwandfreie Ablauf des Arbeitsganges erfordert deshalb eine exakte Anpassung der Bearbeitungsparameter.
Einrichtungen, die mit Laserstrahlen arbeiten, haben den Vorteil, daß der Fräsvorgang unter normalen atmosphärischen Bedingun-

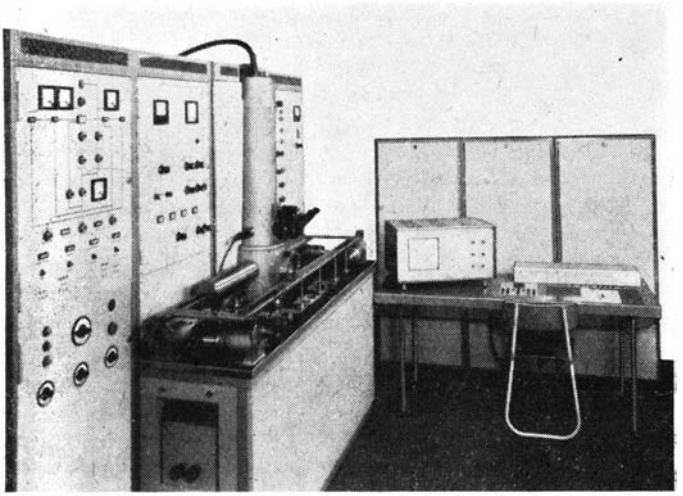


Bild 22. Elektronenstrahl-Bearbeitungsautomat für die Strukturierung und den Abgleich von Widerstandsnetzwerken auf Dünnschichtsubstraten

gen erfolgen kann. Die Materialabtragung mit Elektronenstrahlen erfordert ein Hochvakuum und für diesen Zweck einen beträchtlichen Aufwand an Vakuum- und Steuergeräten (Bild 22).
Laserstrahlen lassen sich nicht wie Elektronenstrahlen durch elektrische oder magnetische Felder trägheitslos steuern. Es sind deshalb in derartigen Einrichtungen bewegliche Präzisionsspiegel zur Strahlablenkung oder präzise Aufspanntische für die Bewegung des Substrats bei feststehendem Strahl notwendig. Auch bei Elektronenstrahlen ist der nutzbare Ablenkwinkel und damit die Bearbeitungsfläche nicht unbegrenzt. Nach dem derzeitigen Stand der Technik liegt die brauchbare Fläche innerhalb eines Durchmessers von etwa 5 cm. Größere Ablenkwinkel führen zu untragbaren Strahlunschärfen. Die Arbeitsgeschwindigkeit des Elektronenstrahls liegt bei 1 m/s. Bild 23 zeigt ein elektronenstrahlbearbeitetes Widerstandsnetzwerk.
Die Mikrogravierung beruht auf der abtragenden Wirkung, die Funkenentladungen in dielektrischen Medien auf elektrisch leitende Materialien ausüben. Die Funken entstehen zwischen der abzu-

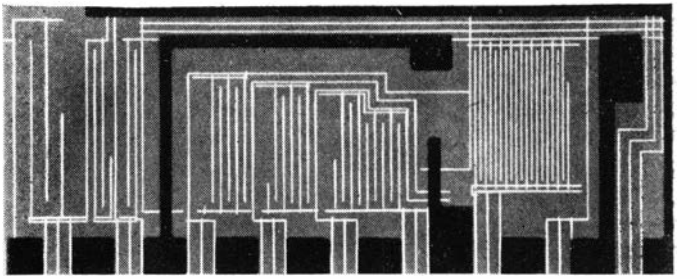
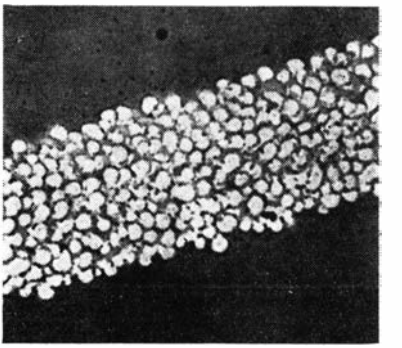


Bild 23. Elektronenstrahlbearbeitetes Widerstandsnetzwerk auf einem Substrat mit den Abmessungen 24 mm × 10 mm

tragenden Schicht und einer Werkzeugelektrode, die in ihren Abmessungen und ihrer Form der gewünschten Bahnbreite angepaßt ist. Der Prozeß kann unter normalen atmosphärischen Bedingungen verlaufen.

Bahnbreiten über etwa 25 µm sind zu verwirklichen. Die Graviergeschwindigkeit hängt vom zu entfernenden Materialvolumen ab. Übliche Werte liegen zwischen etwa 1 cm/s und 1 mm/s. Die Einstellung der gewünschten Arbeitspositionen und damit die Festlegung des auszuarbeitenden Musters erfolgt über elektrisch oder mechanisch gesteuerte Bewegungen eines Präzisionsarbeitstisches, auf dem die Substrate aufgespannt sind. Die Bilder 24, 25 und 26 zeigen Substrate mit mikrogravierten Schichten.

Bild 24. 50 µm breite mikrogravierte »Spur«



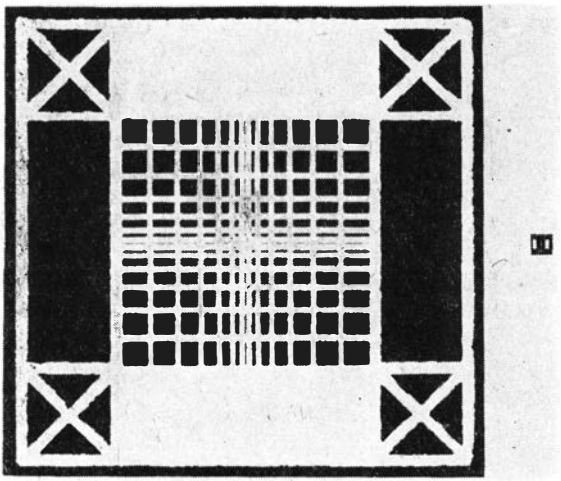


Bild 25. Mikrograviertes Prüfmuster (Originalgröße 3,1 mm × 3,1 mm)
Die Bahnbreite im mittleren Gittermuster ist 25 µm mit einer Abstandsänderung bis herab zu 10 µm. Die das Quadrat umschließenden Linien sind 65 µm breit. Die ausgelöschten Flächen entstehen aus 65 µm breiten Linien im Abstand von 30 µm

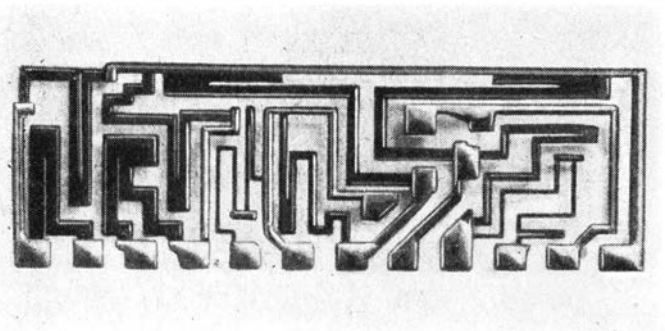


Bild 26. Dünnschichtschaltkreis mit mikrogravierten Widerständen

Neben den genannten Verfahren zur Herstellung des geometrischen Musters, die, was das Fotoätzverfahren und das Aufdampfen über Schablonen anbetrifft, allgemein üblich und hinsichtlich der Fräsverfahren im Vordringen sind, könnte in späterer Zeit auch das gezielte Aufbringen des Musters mittels eines Materialstrahles Bedeutung erlangen. Dabei wird verdampftes Material in einem Plasma ionisiert und zu einem ablenk- und fokussierbaren Materialstrahl vereinigt. Besonders vorteilhaft wirkt es sich aus, daß das Verfahren additiv arbeitet und damit an bestimmten Stellen des Musters dosierbare Mengen eines bestimmten Materials aufgebracht werden können. Neben zahlreichen anderen Problemen steht einer technischen Nutzung die bisher nur unvollkommen gelöste Problematik der Abführung der verhältnismäßig großen Energie des auftreffenden Strahles ohne Beschädigung der vorher aufgebrachten Schichten entgegen.
Für eine Fertigung von Dünnschichtschaltkreisen in geringen Stückzahlen, wie sie beispielsweise bei der Herstellung kleinerer Geräteserien notwendig sein kann, sind von bereits erwähnten Sandwich-Platten Vorteile zu erwarten. Diese Platten lassen sich sowohl im Zusammenhang mit dem Fräsverfahren als auch mit dem Fotoätzverfahren anwenden und sind vor allem dann nützlich, wenn die Herstellung der Schaltkreise unmittelbar im Rahmen der Geräteentwicklung beim Gerätehersteller erfolgen soll.

2.3.3. Passive Elemente

Widerstände

Als Widerstandsmaterialien kommen Metalle und Metallegierungen, metallkeramische Massen, die auch als Cermets bezeichnet werden, und Metalloxide in Betracht. Für den unteren Widerstandsbereich eignen sich nur die erstgenannten Werkstoffe, im mittleren Bereich sind daneben auch die Cermets bedeutungsvoll, und für hochohmige Widerstände stehen die Metalloxide zur Verfügung. Vorzugsweise werden Chromnickel, Tantal, Chrom-Siliziummonoxid und Titanoxid u. a. verwendet.
Chromnickel und fast alle Metalle und Metallegierungen sowie

die metallkeramischen Massen werden üblicherweise im Hochvakuum aufgedampft. Tantal verdampft erst bei sehr hohen Temperaturen, so daß üblicherweise die Katodenzerstäubung angewendet wird. Metalloxide entstehen bei einer reaktiven Katodenzerstäubung in einer mehr oder weniger sauerstoffhaltigen Atmosphäre. Die Dicke der Widerstandsschichten liegt etwa zwischen 10 und 200 nm.

Der charakteristische Kennwert einer Widerstandsschicht ist sein Flächenwiderstand R_F · R_F ist das Verhältnis ϱ/d. Die Einführung dieser Größe ist notwendig, weil der spezifische Widerstand ϱ bei dünnen Schichten aus den im Abschnitt 2.1.1. dargelegten Gründen von der Dicke und Struktur der Schicht sowie den Eigenschaften der Substratoberfläche abhängt.

Der Widerstandswert R eines Dünnschichtwiderstandes mit bestimmten geometrischen Abmessungen (Bild 27) und durch R_F charakterisierten elektrischen Schichteigenschaften folgt der Beziehung

$$R = R_F \frac{l}{b} \cdot$$

d Schichtdicke
l Länge der Schicht
b Breite der Schicht

Es ist zu erkennen, daß der Flächenwiderstand die Annehmlichkeiten einer anschaulichen Darstellung und einer bequemen Mes-

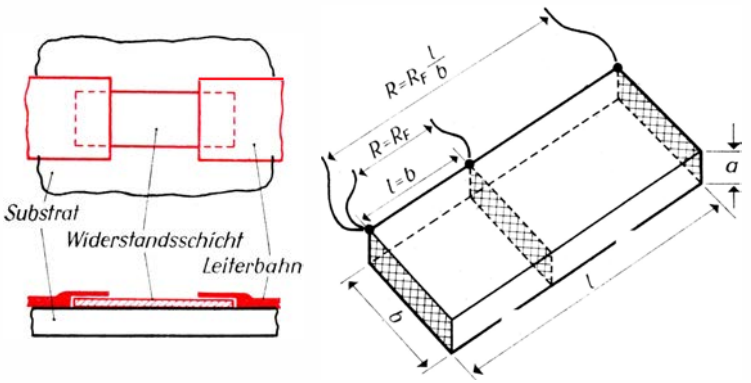


Bild 27. Aufbau und Bemessung eines Schichtwiderstandes

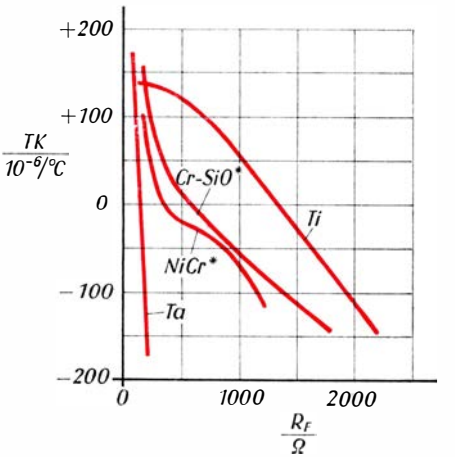


Bild 28. Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten (TK) vom Flächenwiderstand und damit zum erheblichen Teil von der Schichtdicke (* wird stark von der Zusammensetzung beeinflußt)

sung bietet. Im Falle einer quadratischen Fläche wird das Verhältnis $l/b = 1$ und daraus $R_F = R$. Der Flächenwiderstand ist somit der unmittelbar meßbare Widerstand zwischen den gegenüberliegenden Kanten eines Quadrats. Er ist unabhängig von der Kantenlänge.

Der Wert des Flächenwiderstandes ist für jedes Schichtmaterial nur über Probeaufdampfungen im Zusammenhang mit den Oberflächeneigenschaften des Substrats und den Aufdampfbedingungen bestimmbar. Der verwendbare Widerstandsbereich hängt in starkem Maße vom Nulldurchgang des Temperaturkoeffizienten und der zulässigen Abweichung von diesem Punkt ab (Bild 28).

Ist der Flächenwiderstand einer Widerstandsschicht gegeben, so wird der Wert eines Dünnschichtwiderstandes nur noch vom Verhältnis l/b beeinflußt. Ein derartiger Widerstand ist vorstellbar als Reihenschaltung einer Anzahl kleiner Quadrate mit der Kantenlänge b. Soll der Widerstand R einen Wert 3 R_F aufweisen, so muß die Reihenschaltung aus 3 dieser Quadrate bestehen. Die geometrischen Abmessungen sind ausschließlich in Abhängigkeit der vorgesehenen Belastung festzulegen. Eine höhere Verlustleistung bringt eine größere Verlustwärme und erfordert demzufolge eine größere Fläche. Hohe thermische Belastungen des Wi-

derstandes führen zunächst zu Widerstandsänderungen entsprechend dem Temperaturkoeffizienten und im Extremfall zur Zerstörung.

Bei konstantem Flächenwiderstand wächst das Verhältnis l/b mit steigendem Widerstandswert. Lange, schmale Widerstände stehen jedoch im Gegensatz zum Trend nach kleinen Substratabmessungen und bringen Probleme bei der Gestaltung des geometrischen Musters. Eine Lösung der Problematik ist im Extremfall auf zwei Wegen möglich: durch Wahl eines Materials mit entsprechend großem Flächenwiderstand und durch schmale Widerstandsbahnen in mäanderförmiger Anordnung. Der erste Weg führt zu kurzen, geraden und verhältnismäßig dicken Bahnen. Er ist technologisch angenehm und gewährleistet vor allem, wenn eine gewisse Mindestschichtdicke eingehalten wird, hinreichend stabile und reproduzierbare Widerstände. Der zweite Weg bringt erhebliche Probleme für die Technologie und hat wesentlichen Einfluß auf den Toleranzbereich des Widerstandswertes. Bahnen sehr geringer Breite sind für geometrische Maßabweichungen naturgemäß bedeutend anfälliger und bedingen deshalb einen wesentlich weiteren Toleranzbereich. Andererseits ermöglicht natürlich die sichere Beherrschung der geometrischen Toleranzen die Herstellung im Widerstandswert eng tolerierter Widerstände mit kleinen geometrischen Abmessungen. Der Flächenbedarf eines Widerstandes steigt quadratisch mit der erforderlichen Toleranz der Abmessungen. Für die Fertigung muß ein Optimum zwischen den beiden extremen Wegen gefunden werden. Übliche Bahnbreiten liegen dabei zwischen 25 und 500 µm. Die Bilder 29 und 30 veranschaulichen Ausführungsformen über Masken aufgedampfter Widerstände.

Für einige häufig angewandte Materialien sind in Tabelle 8 Kennwerte angegeben, die den Anwendungsbereich von Dünnschichtwiderständen umreißen sollen. Da alle Kennwerte in starkem Maße von den unterschiedlichsten Einflüssen abhängen, können sie nur der Orientierung dienen.

Die in Tabelle 8 genannten engen Toleranzen erfordern in jedem Falle einen nachträglichen Abgleich.

Für Widerstände auf Tantalbasis bietet sich dafür ein elegantes Verfahren. Bei der anodischen Oxydation von Tantal wächst in einem Elektrolyten eine dichte Schicht aus Tantaloxid auf. Dabei

Tabelle 8. Kennwerte technisch realisierbarer Dünnschichtwiderstände

		Widerstandsmaterial			
		Metall bzw. Metalleg.		Cermet	Metalloxid
		NiCr	TaN	CrSiO	TiO_2
Flächenwiderstand	Ω	40 bis 300	10 bis 60	100 bis 3000	
Widerstandsbereich	Ω	20 . . . 10^5	10 . . . 10^4	200 bis	. . . 10^{13}
Flächenbelastung (auf Glassubstrat)	$\frac{mW}{cm^2}$	≈300	≈300	≈300	
Temperaturkoeffizient	10^{-6}/°C	+50 bis +100	+50 bis —200	—50 bis —150	
Toleranz oh. Nachbehandlg.	%	10	10	10	
mit Abgleich	%	0,1	0,05	1	
Drift nach 1000 Std. bei Nennlast und T_U = 100 °C	%	0,1	0,1	0,5	

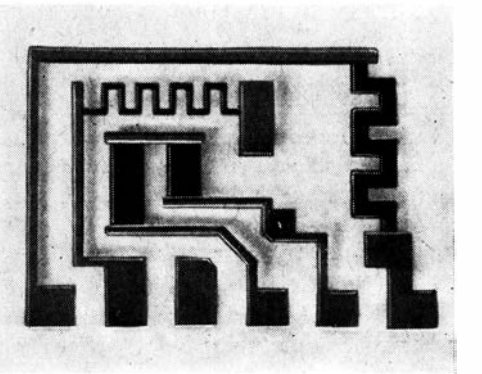


Bild 29
Dünnschichtsubstrat mit verschiedenen über Masken aufgedampften Widerständen

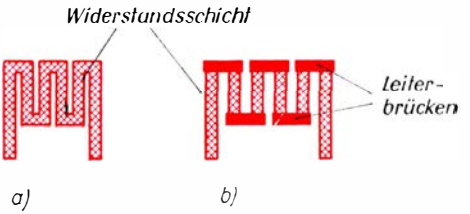


Bild 30. Ausführungsformen mäandrierter Widerstände
a) durchgehende Form; Herstellung mit einer Maske, deren stabile Ausführung jedoch Schwierigkeiten bereitet
b) unterbrochene Form mit Leiterbrücken; Herstellung erfordert zwei Masken, die relativ einfach zu verwirklichen sind

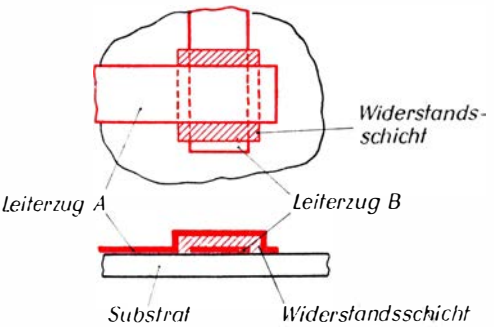


Bild 31. Prinzip des Sandwich-Aufbaus von Schichtwiderständen

wird die Widerstandsschicht dünner und, weil Tantaloxid ein guter Isolator ist, hochohmiger. Auf diese Weise lassen sich Widerstände, die zunächst niederohmiger aufgebracht wurden, in einem weiten Bereich sehr genau abgleichen. Schaltkreiselemente, die nicht oxydieren sollen, werden abgedeckt. Die Oxidschicht bietet gleichzeitig einen widerstandsfähigen Schutz gegen Klimaeinflüsse.

Widerstände, die über Schablonen aufgedampft wurden, sind am zweckmäßigsten durch eine Veränderung des Länge-/Breite-Verhältnisses abzugleichen. Dafür bieten sich die bereits erwähnten Fräsverfahren mittels Elektronen- oder Laserstrahlen bzw. Mikrogravierung an. Gegen Klimaeinflüsse werden derartige Wider-

stände durch aufgedampfte SiO-Schichten geschützt. Diese Schichten sind wesentlich poröser als gewachsene Oxidschichten und erfordern eine bessere Verkappung der Schaltkreise.
Eine besondere Form des ebenen Schichtwiderstandes verkörpert der Sandwich-Aufbau (Bild 31), der sich vor allem für hochohmige Widerstände mit sehr geringen Abmessungen eignet. Bei dieser Anordnung wird die Widerstandsschicht auf eine »Grundelektrode« aufgedampft und erhält anschließend eine »Deckelektrode«. Bestimmend für den Widerstandswert ist ausschließlich die zwischen den beiden Elektroden liegende Dicke der Schicht. Als Widerstandsmaterial kommen vorwiegend hochohmige Verbindungen in Betracht.

Kondensatoren

Der kritische Teil ist für die »Plattenkondensatoren« der Dünnschichttechnik (Bild 32), ebenso wie bei allen anderen Kondensatoren, das Dielektrikum. Um eine große Kapazität je Flächeneinheit zu erzielen, wie es im Interesse kleiner Substratabmessungen im allgemeinen notwendig ist, muß das Dielektrikum eine hohe Dielektrizitätskonstante aufweisen und so dünn aufgebracht werden, wie es die Durchbruchfeldstärke eben noch zuläßt.
Weitere Anforderungen an das Dielektrikum zielen auf einen kleinen Verlustfaktor, eine geringe Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der Parameter und eine niedrige Feuchtigkeitsaufnahme der Schicht. Bemerkenswert erscheint die Tatsache, daß Fehler in der Schichtstruktur und scharfkantige Unebenheiten in

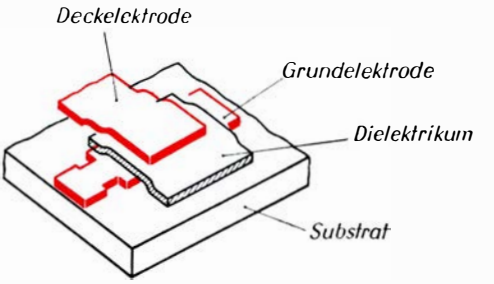


Bild 32. Aufbau eines Dünnschichtkondensators

der Substratoberfläche zu hohen Feldstärken und dadurch zum Durchschlag führen.

Als Dielektrikum finden vorwiegend Siliziummonoxid (SiO), Tantalpentoxid (Ta_2O_5), Siliziumdioxid (SiO_2) und Aluminiumtrioxid (Al_2O_3) u. a. Anwendung. SiO wird im Vakuum aufgedampft, Ta_2O_5 und Al_2O_3 durch anodische Oxydation von Tantal- bzw. Aluminiumschichten gewonnen und SiO_2 meist auf dem Wege der Katodenzerstäubung aufgebracht. Die Dicke der dielektrischen Schicht liegt üblicherweise zwischen 100 und 1000 nm, bei Tantalpentoxid zwischen 10 und 100 nm.

Als Material für die Elektroden kommen häufig Aluminium, Gold, Tantal oder Platin in Betracht. Nach Möglichkeit wird auf Werkstoffe zurückgegriffen, die der Herstellungstechnologie des jeweiligen Schaltkreises angepaßt sind, u. a. deshalb, weil die Grundelektrode oft gemeinsam mit den Leiterzügen aufgebracht werden kann. Da die Elektroden jedoch als Serienverlustwiderstand in Erscheinung treten, macht sich mitunter, wie bei den relativ hochohmigen Tantalgrundelektroden, eine Unterschichtung mit einem Werkstoff höherer Leitfähigkeit notwendig. Als Deckelektroden werden auch in der Tantaltechnik Aluminium- oder Goldelektroden über Schablonen aufgedampft. Tabelle 9 soll den Anwendungsbereich von Dünnschichtkondensatoren veranschau-

Tabelle 9. Kennwerte technisch realisierbarer Dünnschichtkondensatoren

		Dielektrikum		
		SiO	Ta_2O_5	SiO_2
spezifische Kapazität	pF/mm²	20 ... 100	600 ... 3000	50 ... 100
Dielektrizitätskonstante ε		4 ... 7	14 ... 28	≈ 4
Temperaturkoeffizient	10^{-6}/°C	± 100	+100 bis + 400	+20 bis + 40
Verlustfaktor tan δ	10^{-3}			
bei 100 kHz		1	5 ... 10	0,1
bei 1 MHz		0,7	10 ... 30	1
Toleranz		10	5	5
Durchbruchfeldstärke	V/cm	$2 \cdot 10^6$	... $5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$

lichen. Die gewählten Dielektrika werden häufig angewandt und sind für den gegenwärtigen Stand der Technik charakteristisch. Da die genannten Parameter dem Einfluß sehr vieler Faktoren unterliegen, sind sie nur als Richtwerte zu betrachten.
Die Herstellung eines breiten Spektrums von Dünnschichtkondensatoren bereitet in der Fertigung z. Z. noch erhebliche Probleme. Größere Kapazitätswerte sind, bedingt durch die in dieser Hinsicht sehr ungünstigen Dielektrika mit großer Dielektrizitätskonstante, mit einem hohen Verlustfaktor behaftet, und auch für kleinere Kapazitätswerte stehen kaum Dielektrika zur Verfügung, die eine Anwendung der Kondensatoren beispielsweise in anspruchsvollen Filterschaltungen gestatten. Kapazitäten in der Größenordnung von etwa 0,5 μF lassen sich in Form von mehrschichtigen Kondensatoren, die durch ein wechselweises Übereinanderlegen von Metall- und Isolierschichten entstehen, realisieren; z. Z. werden derartige Anordnungen technologisch jedoch noch nicht sicher beherrscht.
Alle diese Probleme, zu denen noch die Tatsachen treten, daß Kondensatoren im Vergleich zu den Widerständen eine sehr große Substratfläche und bei der Herstellung eine größere Anzahl von Arbeitsgängen benötigen, führen zu Bestrebungen, Kondensatoren in integrierten Schaltkreisen durch geeignete Schaltungsvarianten nach Möglichkeit zu umgehen.
Ein Abgleich von Kondensatoren auf einen engeren Toleranzbereich ist beispielsweise mittels der Mikrogravierung prinzipiell möglich, bereitet jedoch erheblich mehr Schwierigkeiten als bei den Widerständen. Gegen klimatische Einflüsse sind auch für Kondensatoren Schutzschichten erforderlich.

Induktive Elemente

Für die Verwirklichung von Induktivitäten stehen in Dünnschichtschaltkreisen nur ebene Leiteranordnungen zur Verfügung. Verfahren, die einen induktiven Effekt — das zeitliche Nacheilen des Stroms hinter der Spannung — auf andere Art als über das mit dem Strom verkoppelte Magnetfeld in stromdurchflossenen Schleifen bzw. Spulen erreichen, sind z. Z. nicht in einer geeigneten Form bekannt.

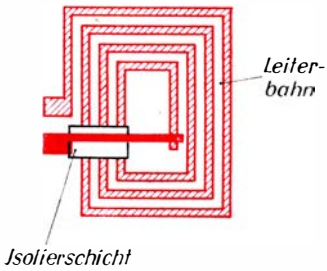


Bild 33. Ebene Rechteckspule

Maximale Induktivitätswerte lassen sich unter den gegebenen Bedingungen mit kreisförmigen oder quadratischen Spiralen (Bild 33) auf nichtmagnetischen oder Ferritunterlagen erzielen. Bei Leiterbreiten von etwa 100 µm ergibt eine nichtmagnetische Substratfläche von etwa 50 mm² eine Induktivität in der Größenordnung von 1 µH. Ferritunterlagen, gegebenenfalls durch eine Ferritschale ergänzt, bringen eine Erhöhung um einen Faktor zwischen 3 . . . 30.

Die Verlustfaktoren der genannten Anordnungen liegen sehr hoch und die Gütewerte demzufolge entsprechend niedrig, in den meisten Fällen weit unter 100. Derartige Werte sind auf den im Verhältnis zu den geringen Induktivitätswerten sehr hohen Serienverlustwiderstand der dünnen Schichten zurückzuführen, die im Interesse eines geringen Flächenbedarfs auch möglichst schmal ausgelegt werden. Die Dicke aufgedampfter Schichten ist durch die notwendige Haftfestigkeit auf dem Substrat auf Werte unter 1 µm begrenzt. Auch eine nachträgliche Verstärkung, beispielsweise durch eine Elektroplattierung, bringt nur eine bescheidene Verbesserung der Gütewerte.

Dünnschichtspulen eignen sich auf Grund ihrer Eigenschaften im wesentlichen für den Frequenzbereich oberhalb von etwa 10 MHz. Vorteilhaft wirkt sich bei hohen Frequenzen der flache Querschnitt der Schicht aus. Er paßt sich den Bedingungen des Skineffektes an und läßt Güteverluste durch den Skineffekt erst im GHz-Bereich in Erscheinung treten.

Die Induktivität ist neben der Kapazität das zweite für LC-Filter erforderliche Element, das innerhalb von Dünnschichtschaltkreisen nicht in einem ausreichenden Spektrum verfügbar ist. Eine Einbe-

ziehung diskreter Elemente in Dünnschichtschaltkreise ist in den meisten Fällen nicht diskutabel. Hochwertige Filterbaugruppen, wie sie für die Frequenzselektion im ZF-Verstärker kommerzieller Geräte notwendig sind, lassen sich deshalb nur durch eine Kombination der Schaltkreise mit konzentrierten Selektionsmitteln in Form von elektromechanischen, keramischen, Quarz- und LC-Filtern verwirklichen. In elektrischer Hinsicht erfüllen derartige Anordnungen alle Anforderungen, und in ihren Abmessungen und der Bauform passen sie sich den Schaltkreisen weitgehend an.

2.3.4. Aktive Elemente

Aktive Elemente, die sich integriert in Dünnschichtschaltkreise einfügen lassen, stehen z. Z. nicht zur Verfügung. Dem Dünnschichttransistor galten bereits recht umfassende Untersuchungen, jedoch konnten die Muster bisher vor allem hinsichtlich Stabilität und Zuverlässigkeit in keiner Weise mit den nach Planartechnologien hergestellten Halbleiterbauelementen konkurrieren. Für die Herstellung von aktiven Dünnschichtschaltkreisen besteht damit nur die Möglichkeit einer Kombination mit Halbleiterbauelementen, wie sie in einkristallinem Material hergestellt werden. Vorzugsweise wird dabei wegen der ebenen Oberfläche – wenn es sich um Chip-Elemente handelt – und wegen der hohen Zuverlässigkeit auf Elemente in Planartechnologie zurückgegriffen.

Für die Art und Weise der Kombination bestehen mehrere Möglichkeiten: das Einfügen der Halbleiterbauelemente in verkappter Bauweise oder in Form von Chips in den auf einem Glas- oder Keramiksubstrat angeordneten Dünnschichtschaltkreis; das Anordnen von Dünnschichtschaltkreisen auf der durch eine Oxidschicht isolierten Oberfläche eines Halbleitersubstrats, in welches die aktiven Elemente in Planartechnologie eindiffundiert sind, und das Zusammensetzen eines Schaltkreises innerhalb eines Gehäuses aus verschiedenen Substraten, die entweder Dünnschichtschaltkreise oder diffundierte Halbleiterbauelemente enthalten. Die einzelnen Formen werden als Dünnschicht-Hybrid-Technik, Festkörper-Hybrid-Technik und Multichip-Hybrid-Technik bezeich-

net. Die Bauweise mit aufgedampftem Dünnschichttransistor ist im Gegensatz zur bisher betrachteten passiven Dünnschichttechnik als aktive Dünnschichttechnik bekannt. Die Kombination passiver Dünnschichtschaltkreise mit Transistoren und Dioden, die in einer anderen Technologie hergestellt wurden — dazu gehören im weiteren Rahmen auch passive Bauelemente, für die diese Art der Herstellung irgendwelche Vorteile bringt —, ist nicht nur als Behelfslösung zu betrachten. Sie kann für sehr viele Anwendungen, natürlich in Abhängigkeit der Zeit, als Ideallösung angesehen werden. So ist es beispielsweise möglich, Transistoren, die in bestimmten Parametern noch nicht gezielt hergestellt, sondern aus einer größeren Menge ausgesucht werden müssen, vor dem Einbau in den Schaltkreis auszuwählen. Beim reinen Festkörperschaltkreis, wo ein derartiges Verfahren in einfacher Form nicht möglich ist, sinkt die Ausbeute in solchen Fällen erheblich ab. Für allgemeine Anwendungen ergibt sich aus der Kombination von Bauelementen in den verschiedenen Herstellungstechnologien eine Erweiterung des Wertespektrums und eine Anpassung an spezielle Stabilitäts- und Linearitätsforderungen.

Ein empfindlicher Nachteil der Kombinationstechnik liegt offensichtlich darin, daß das Zusammenfügen der einzelnen Komponenten meist schwer automatisierbar ist. Am günstigsten ist in dieser Hinsicht die Festkörper-Hybrid-Technik, weil dort die Verbindungsleitungen in den meisten Fällen in das Dünnschichtmuster einbezogen werden können. Andererseits haften diesem Verfahren zahlreiche technologische Probleme an. Bei der Entscheidung für die eine oder die andere Form der Kombination ist die Frage der Substratkosten ein wesentlicher Gesichtspunkt. Halbleitermaterial ist wesentlich teurer als Glas oder Keramik. Eine Kombinationstechnik auf der Basis von Siliziumsubstraten ist somit für Schaltkreise, die Kondensatoren und Widerstände mit großem Flächenbedarf enthalten, kaum ernsthaft in Erwägung zu ziehen.

Die Hybridtechniken stehen für eine Vielzahl der verschiedenen Anwendungen beim gegenwärtigen Stand der Technik im Vordergrund. Eine reine Festkörpertechnik ist nur dann am Platze, wenn eine sehr große Anzahl gleicher Schaltungen mit einem hohen Anteil an Transistoren und Dioden hergestellt werden kann, wie dies für digitale Anwendungen der Fall ist.

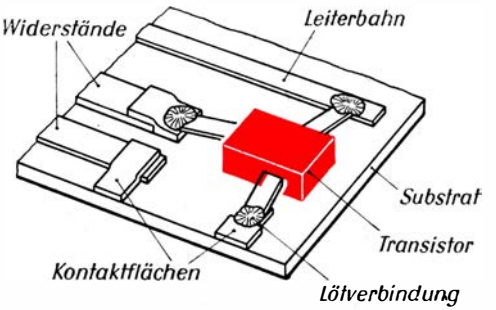


Bild 34
Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreis (Prinzip)

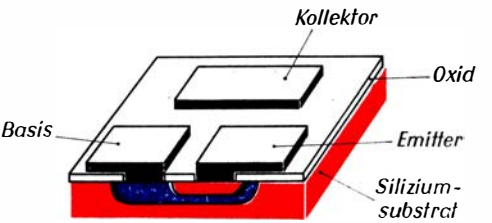


Bild 35
Chip-Transistor

Dünnschicht-Hybrid-Technik

Die einfachste Art der Kombination passiver Dünnschichtschaltkreise mit Transistoren und Dioden besteht im Zusatz dieser Elemente in konventioneller verkappter Bauform (Bild 34). Derartige Bauelemente existieren in einem breiten Spektrum und können in Anpassung an die jeweilige Anforderung ausgemessen in den Schaltkreis eingesetzt werden. Die elektrische Verbindung erfolgt durch Löten oder Schweißen der Anschlußdrähte.
Eine fortgeschrittenere Form des Zusatzes konventioneller Elemente ist die Verwendung plastverkappter oder eingeglaster Ausführungen, die sich in ihrer Form und teilweise auch in der Art der Anschlüsse besser den Erfordernissen anpassen.
Die wesentlichen Probleme beim Einsatz konventioneller Transistoren in Dünnschichtschaltkreise liegen in den beträchtlichen, jedoch unnötigen Kosten, die beim Verkappen der Elemente entstehen, im großen Raumbedarf und in der Notwendigkeit, die

Montage weitgehend manuell durchzuführen. Es setzte sich deshalb das Verfahren durch, Halbleiterbauelemente in Chipform einzusetzen.

Die Chips sind kleine Plättchen aus Halbleitermaterial, welche einen oder mehrere Transistoren und Dioden enthalten (Bild 35). Anstelle von Anschlußdrähten haben die Chips Auflagen in Form ebener Beläge oder Kugeln, die ein ebenes Aufsetzen auf die Leiter und Kontaktstellen von Dünnschichtschaltkreisen gestatten. In der Struktur entsprechen die Chip-Elemente vollkommen den Elementen verkappter Transistoren und Dioden; um jedoch die Kontaktfläche in eine Ebene zu legen, ist es üblich, den Kollektoranschluß nicht wie bei verkappten Elementen an der Rückseite zu kontaktieren, sondern wie in Festkörperschaltkreisen auf der Vorderseite. Der nicht zu den Kontaktflächen gehörende Teil der Vorderseite ist mit einer Oxidschicht und einer zusätzlichen Schutzschicht (z. B. Siliziumnitrid oder Glas) überzogen.

Da die Kontaktstellen der Elemente selbst sehr geringe Abmessungen aufweisen, werden sie üblicherweise durch Anschlußflächen, die über der Oxidschicht liegen, auf einen Durchmesser von etwa 100 µm erweitert. Die Anschlußflächen oder Kugeln sind entweder mit einem Lot bedeckt oder in anderer Weise für die Kontaktierung im Dünnschichtschaltkreis vorbereitet. Neben dem Löten kommen Verbindungen durch Ultraschallschweißungen und ein Anlegieren der Kontaktflächen in Betracht.

In ihren elektrischen Kennwerten ähneln die Chip-Elemente weitgehend vergleichbaren konventionellen Bauelementen. Abstriche sind z. Z. noch hinsichtlich der Grenzfrequenz und der Leistung notwendig. Die niedrigere Grenzfrequenz folgt aus den Streukapazitäten zwischen dem Element und den über der Oxidschicht liegenden Anschlußflächen und die geringere Verlustleistung aus der schlechten Wärmeabführung über die relativ kleinen Berührungsflächen zwischen Chip und Schaltkreis.

Eine andere Form der Verwendung von Chips beruht auf einer mechanischen Befestigung durch Auflegieren des Halbleitersubstrats auf den Träger des Dünnschichtschaltkreises und Drahtverbindungen zwischen den Kontaktflächen der Chips und denen der passiven Dünnschichtelemente. Das Auflegieren erfolgt über aufgebrachte Goldschichten und zwischengelegte Goldfolie und die Kontaktierung der Drähte mittels Thermokompression. Die ma-

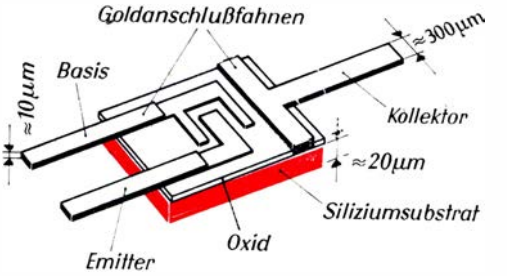


Bild 36
Beam-lead-Transistor (Anordnung der Anschlüsse)

nuell auszuführenden zwei Kontaktierungen je Verbindung bringen jedoch eine Verringerung der Zuverlässigkeit und keine Verbesserung im Arbeitsablauf.

Zweckmäßiger erscheint eine andere Variante, die zwischen der Nutzung konventioneller Bauelemente und der Anwendung von Chips eingestuft werden kann: der Zusatz von Transistoren und Dioden in Beam-lead-Ausführung. Diese Elemente sind schon von der Herstellung her für diesen Zweck prädestiniert. Sie bieten durch ihre dünnen Anschlußbändchen (Bild 36) günstige Anschlußmöglichkeiten und durch die Art der Verbindung dieser Bändchen mit den Halbleiterbauelementen hochtemperaturbeständige Kontakte.

Die Kontaktierung der konventionellen Halbleiterbauelemente bzw. Chips ist als eine entscheidende Problematik der Dünnschicht-Hybrid-Technik anzusehen. Bisher ist keine Technologie bekannt, die vollkommen den Anforderungen gerecht wird, die im Hinblick auf Zuverlässigkeit, und zwar auch bei hohen Temperaturen, und Kosten an eine Verbindung in der integrierten Schaltungstechnik gestellt werden müssen. Die konventionellen Bauelemente sind durch eine separate Verkappung und die einzelnen Chips durch Oxid- und andere Schutzschichten gegen störende Umgebungseinflüsse geschützt. Der komplette Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreis wird nach der Montage der Halbleiterbauelemente üblicherweise vergossen bzw. umpreßt.

Passive Bauelemente und komplette Schaltungsteile in Form von kleineren Chips bzw. Festkörperschaltkreisen lassen sich in der gleichen Weise wie Transistoren und Dioden in Dünnschichtschaltkreise einbeziehen. Diese Art der Kombination der passiven

Dünnschichttechnik mit der Festkörpertechnik wird in der Zukunft Bedeutung erlangen.

Festkörper-Hybrid-Technik

Eine zweite Form der Kombination von Dünnschichtschaltkreisen mit den erforderlichen aktiven Elementen beruht auf der Verwendung eines Substrats aus einem Halbleitermaterial. Die Transistoren und Dioden können in dieses Substrat diffundiert werden, und der passive Dünnschichtschaltkreis findet, isoliert durch eine Oxidschicht, wie üblich auf der Oberfläche Platz (Bild 37). Die Oxidschicht weist ähnliche Eigenschaften wie ein Glassubstrat auf, so daß sich für die passiven Elemente des Schaltkreises kaum veränderte Bedingungen ergeben. Bei dieser unter dem Namen Festkörper-Hybrid-Technik bekannten Kombinationstechnik sind die Transistoren und Dioden gewissermaßen das tragende Element des Schaltkreises.
Der Schritt zu einer derartigen Form der Vereinigung von Halbleiterelement und Dünnschichtelement berührt im Prinzip kein Neuland. Beim Festkörperschaltkreis ist das Aufdampfen des Leitungsmusters bereits seit langem üblich. Das Zufügen von Dünnschichtwiderständen und einiger anderer Elemente ist in diesem Rahmen nur als Erweiterung der bei der Herstellung von Festkörperschaltkreisen erprobten Verfahren zu betrachten.
Die Vorteile gegenüber der Dünnschicht-Hybrid-Technik liegen in

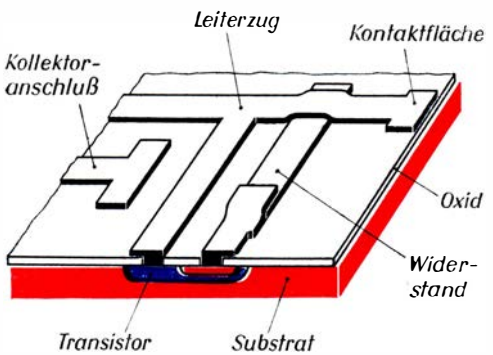


Bild 37
Festkörper-Hybrid-Schaltkreis (Prinzip)

der Möglichkeit, die Halbleiterelemente über Leiterzüge, die unmittelbar zum Schaltkreismuster gehören, oder durch eine direkte Kontaktierung mit den verschiedenen Dünnschichtelementen zuverlässig in den Schaltkreis einzubeziehen. Dabei sind alle Arbeitsgänge einer Automatisierung zugänglich. Die Festkörper-Hybrid-Technik beweist ihre Nützlichkeit besonders in solchen Fällen, wo Schaltkreise herzustellen sind, die zu einem hohen Anteil aus Transistoren und Dioden bestehen. Als Nachteil tritt vor allem die bei den notwendigen technologischen Prozessen auftretende starke Erwärmung des Substrats in Erscheinung. Sie resultiert aus der Kontaktierung der Schaltkreise, die in gleicher Weise wie bei den Festkörperschaltkreisen durch Thermokompression erfolgt, sowie daraus, daß die Substrate auf den Boden des notwendigen, dichten Gehäuses anlegiert oder angeglast werden. Die bei beiden Prozessen auftretenden Temperaturbelastungen können zu Änderungen der Dünnschichtelemente führen. Abhilfe ist durch Schweißverfahren, die mit niederen Temperaturen auskommen, oder durch neuere Verkappungsmethoden zu erwarten.

Verschiedene Firmen fertigen als Halbfabrikate oxydierte Siliziumscheiben mit diffundierten Transistoren und Dioden, die zu einem späteren Zeitpunkt, gegebenenfalls im Rahmen der Geräteentwicklung und -fertigung, als Substrate für eventuell kurzfristig in kleineren Stückzahlen notwendige aktive Dünnschichtschaltkreise dienen können. Die geringen Abmessungen der Scheiben und die Notwendigkeit, sie dicht zu verkappen, erfordern jedoch die Beherrschung komplizierter technologischer Prozesse und einen erheblichen Aufwand an Einrichtungen. Beide Voraussetzungen sind sicher nur bei versierten Herstellern von Halbleiterbauelementen und Festkörperschaltkreisen zu erwarten. Neben Transistoren und Dioden können auch andere Elemente, für die sich das aus bestimmten Gründen als zweckmäßig erweist, in das Halbleiterplättchen diffundiert werden. Die Kombination zwischen einem Dünnschichtschaltkreis und den zugehörigen aktiven Elementen geht dann in eine Kombination zwischen einem Dünnschichtschaltkreis und einem Festkörperschaltkreis über. Auch diese Variante wird ihre Nützlichkeit noch in großem Umfang beweisen.

Multichip-Hybrid-Technik

Neben den beiden bereits erwähnten Hybridvarianten existiert noch eine dritte Variante, die in der gleichen Weise, wie dies die Dünnschicht-Hybrid-Technik im wesentlichen tut, auf unverkappte Transistoren und Dioden zurückgreift. Die Chips werden hier jedoch nicht auf dem Substrat des Dünnschichtschaltkreises angeordnet, sondern neben diesem Substrat gleichberechtigt auf einem Gehäuseboden oder einem anderen gemeinsamen Träger befestigt (Bild 38). Die elektrischen Verbindungen erfolgen über Drähte, die Kontaktierungen mittels der Thermokompression. Der Verkappung dieser unter der Bezeichnung Multichip-Hybrid-Technik bekannten Bauweise dienen meist TO-Rundgehäuse, wie sie auch bei Transistoren üblich sind.
Die Multichip-Hybrid-Technik hat gegenüber der Dünnschicht-Hybrid-Technik nur in Sonderfällen Vorteile und ist im allgemeinen mit einem höheren technologischen Aufwand verknüpft. Sie kommt deshalb normalerweise nur für Versuchsmuster und Kleinserien sowie beispielsweise dann zur Anwendung, wenn bei einer Stufe höherer Leistung der Leistungstransistor in den Schaltkreis einbezogen werden soll, die auftretende Verlustwärme dies jedoch ausschließt. In diesem Fall bietet diese Hybrid-Variante den bedeutenden Vorteil, daß der Leistungstransistor unmittelbar auf dem Gehäuseboden anlegiert werden kann.
Eine Ausdehnung der Kombination auf komplette Festkörperschaltkreise ist grundsätzlich möglich, wird in größerem Rahmen jedoch kaum Bedeutung erlangen.

Aktive Dünnschichttechnik

Während die Hybrid-Formen zumindest hinsichtlich der Montage der Transistoren und Dioden als Ausweichlösung angesehen werden müssen, weist die aktive Dünnschichttechnik eine homogene Struktur auf. Sowohl die passiven Elemente als auch die Transistoren und Dioden lassen sich in einer einheitlichen Technologie auf einem gemeinsamen Träger herstellen. Damit gibt es für den aktiven Dünnschichtschaltkreis keine Probleme durch den nachträglichen Einbau dieser Elemente; andererseits sind dadurch

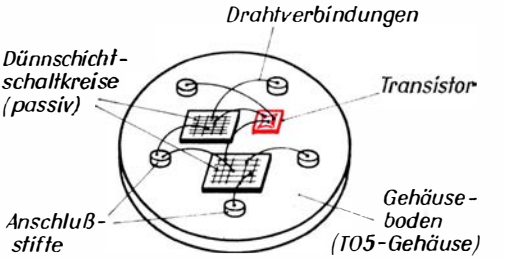


Bild 38
Multichip-Hybrid-Schaltkreis

jedoch die sehr vorteilhaften Möglichkeiten der Vorauswahl ausgeschlossen.

Der zur Diskussion stehende aufdampfbare Dünnschichttransistor ist ein Feldeffekttransistor (Bild 39). Alle Elektroden — Quelle, Senke und Steuerelektrode — sind Metallschichten. Zwischen Quelle und Senke liegt eine aufdampfbare polykristalline Halbleiterschicht. Für die Elektroden eignen sich Gold und Aluminium u. a., als Halbleitermaterialien Kadmiumsulfid und Kadmiumselenid. Die Dicke der gesamten Anordnung beträgt etwa 1 µm.

Die Steuerung des Transistors erfolgt durch eine Beeinflussung der Leitfähigkeit des in der Halbleiterschicht zwischen Quelle und Senke liegenden Kanals über eine an der Steuer- oder Torelektrode liegende Spannung. Die elektrischen Eigenschaften sind für einen großen Teil der Anwendungen sehr günstig. Der Eingangswiderstand weist bis zu verhältnismäßig hohen Frequenzen große Werte auf und gestattet dadurch im Gegensatz zu den bisher üblichen Transistoren eine leistungslose Steuerung. Die Tatsache, daß bei einer bestimmten Anwendung 100 dieser Transistoren auf einer Fläche von etwa 1 cm^2 angeordnet wurden, veranschaulicht den geringen Flächenbedarf dieser Elemente.

Leider führten die in den letzten Jahren sehr intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bisher nur im Labor zu befriedigend arbeitenden Dünnschichttransistoren. Die Ursachen dafür liegen darin, daß die maßhaltige Herstellung des nur wenige Mikrometer breiten Spaltes zwischen den Elektroden Quelle und Senke ebenso große Schwierigkeiten bereitet wie das reproduzierbare Aufbringen der Halbleiter- und Isolierschichten. Im wesentlichen sind es die ungeklärten und schlecht reproduzierbaren

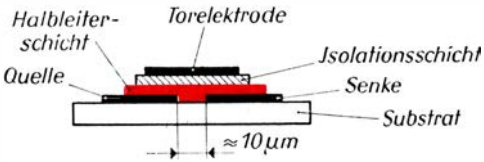


Bild 39
Aufbau des Dünnschichttransistors (Prinzip)

elektrischen Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften der polykristallinen Halbleiterschicht sowie deren Feuchtigkeitsempfindlichkeit, an denen bisher eine Großproduktion scheiterte.
Weitere aktive Elemente, die sich integrierend in Dünnschichtschaltkreise einfügen, sind der Metallbasistransistor und ein Feldeffekttransistor, der auf der Züchtung einer einkristallinen Siliziumschicht auf einem eine ähnliche Gitterstruktur aufweisenden Saphirsubstrat basiert. Der Metallbasistransistor besteht nur aus dünnen Metall- und Oxidschichten und beruht auf der Durchquerung einer extrem dünnen Basisschicht durch angeregte, sogenannte heiße Elektronen.
Die Ergebnisse der seit langem am aktiven Dünnschichtelement laufenden Forschungsarbeiten lassen erkennen, daß derartige Elemente, wenn überhaupt, dann sicher nur für spezielle Bereiche Bedeutung erlangen werden. Ausschlaggebend für diese Entwicklung sind neben den bereits erwähnten technischen Aspekten auch ökonomische, durch die sehr forcierte Entwicklung der Festkörpertechnik geprägte Gesichtspunkte.

2.3.5. Verbindungs- und Anschlußtechnik

Die Verbindung der einzelnen Elemente und Anschlußpunkte innerhalb des Dünnschichtschaltkreises erfolgt durch mehr oder weniger breite Metallschichten möglichst hoher Leitfähigkeit. In den meisten Fällen werden sie unter bevorzugter Verwendung von Aluminium, Gold, Kupfer, Silber u. a. aufgedampft. Ein üblicher Widerstand von 1 Ω/cm Bahnlänge erfordert Bahnbreiten von etwa 200 µm. Schmalere Bahnen sind realisierbar, jedoch bedingen die genannten Werte bereits eine Schichtdicke in der Größenordnung von 1 µm und damit, um die Haftfestigkeit dieser dicken Schichten zu erhöhen, eine Vorbehandlung des Sub-

strats. Bei Glassubstraten besteht sie in einem vorherigen Bekeimen mit Chrom.

An Überkreuzungsstellen müssen die Leiterbahnen durch eine Isolierschicht voneinander isoliert werden. Da eine Leiterkreuzung als Kapazität in Erscheinung tritt und zusammen mit dem Serienwiderstand der Leiterzüge und den parasitären Kapazitäten auf die Grenzfrequenz der Schaltung einwirkt, muß die Isolierschicht eine geringe Dielektrizitätskonstante aufweisen. Nichtleitende Oxidschichten, wie sie sich bei Aluminium- und Tantalleiterzügen herstellen lassen, überschreiten in dieser Hinsicht oft die zulässigen Werte, so daß vorzugsweise verhältnismäßig dicke SiO-Schichten aufgedampft werden.

Neben der Verträglichkeit mit dem Substrat und den Schichten der einzelnen Elemente ist bei der Wahl des Leitermaterials auch das für die Verbindung nach außen vorgesehene Kontaktierungsverfahren in Rechnung zu setzen. Eine Beschränkung auf die Lötverbindung führt zwangsläufig zu lötbaren Leitermaterialien, wie Kupfer, Silber u. a., während Aluminiumschichten nur Ultraschallschweißungen und die Thermokompression zulassen. Goldschichten sind lötbar, sie erfordern jedoch ein besonderes Lot, weil das übliche Lötzinn Verbindungen mit Gold eingeht und dadurch die die Lötstelle umgebende Schicht zerstört.

Die Kontaktierungsverfahren selbst müssen sich ihrerseits den Besonderheiten der Dünnschichtschaltkreise anpassen. Dabei sind insbesondere die oft in großer Zahl in geringen Abständen nebeneinander liegenden Anschlußpunkte, die dünnen Schichten und Substrate und die Grundtendenzen der integrierten Schaltungstechnik nach hoher Zuverlässigkeit bei geringen Kosten zu berücksichtigen. Die Grundforderungen zielen auf Verfahren, die gute elektrische und mechanisch feste Verbindungen auf kleinstem Raum ohne thermische Beschädigung des Schaltkreises herzustellen gestatten. Aus den ökonomischen Bedingungen resultiert im Endeffekt eine gleichzeitige, automatische Kontaktierung aller äußeren Schaltkreisanschlüsse (Bild 40).

Die Löttechnologie kann den Vorteil umfangreicher Erfahrungen ins Feld führen und bietet eine billige und einfach herzustellende Verbindung. Ihre Grenzen sind erreicht, wenn der freie Abstand der Kontaktflächen unter etwa 200 µm absinkt. Die Oberflächenspannung des flüssigen Lötzinns und die auch bei normalen Um-

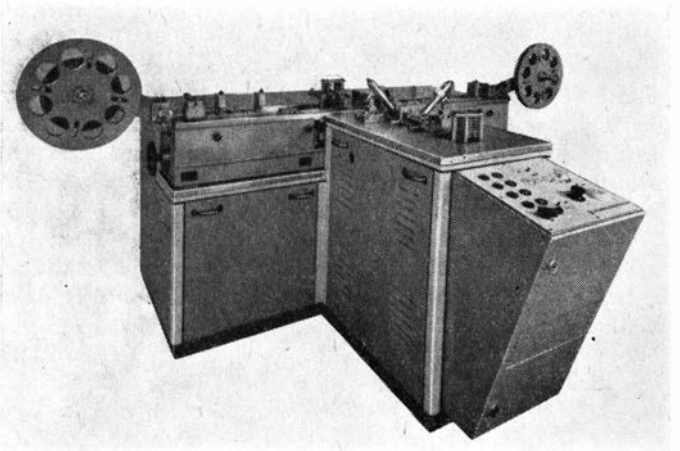


Bild 40. Automatische Duplex-Kontaktieranlage zum Anbringen der Anschlußarmaturen an die Schaltkreise

gebungsbedingungen im Laufe der Zeit an der Lötstelle entstehenden nadelförmigen Kristalle können dann zu einer Brückenbildung und damit zu Kurzschlüssen zwischen den Leiterzügen führen. Als ernstzunehmende Probleme treten im allgemeinen die den Lötvorgang störenden Oxidfilme, welche die Zuführung eines Flußmittels und die abschließende Beseitigung der Rückstände verlangen, sowie die erheblichen Wärmemengen bis zum Fließen des Lötzinns in Erscheinung.

Schweißverfahren, bei denen eine Erhitzung der Berührungsstellen der zu kontaktierenden Gebilde zur Verschmelzung führt, entsprechen nicht den Erfordernissen, weil sie annähernd gleiche Querschnitte der Gebilde voraussetzen. Diese Bedingung ist bei den gegenwärtig verarbeitbaren geringsten Drahtdurchmessern von etwa 10 µm und Schichtdicken um 1 µm nicht erfüllbar. Das bekannte Widerstandsschweißverfahren und selbst so moderne Verfahren wie das Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißen kommen deshalb normalerweise nicht in Betracht.

Von den Schweißverfahren hat für den vorliegenden Zweck lediglich die Ultraschallschweißung Bedeutung erlangt. Bei diesem Verfahren wird der leicht zusammengedrückten Kontaktstelle eine

Schwingungsenergie im Ultraschallbereich zugeführt, wobei ein »Ineinanderreiben« der Berührungsflächen in einer quasiplastischen Phase erfolgt. Die entstehende Verbindung weist gute elektrische und mechanische Eigenschaften auf und ist weitgehend unabhängig von den Querschnitten und dem Material der zu verbindenden Teile. Oxidschichten und ähnliche Verunreinigungen stören den Ablauf des Schweißvorganges ebensowenig, wie eine Temperaturbelastung des Schaltkreises auftritt.

Die Thermokompression ist ein weiteres brauchbares Kontaktierverfahren. Für Kontaktierungen in Festkörperschaltkreisen kommt es nahezu ausschließlich zur Anwendung. Bei sehr kleiner Kontaktfläche und geringen Drücken liefert die Thermokompression gute elektrische Übergänge. Die Temperaturbelastung für einen Dünnschichtschaltkreis ist verhältnismäßig gering.

Verbindungen durch Leitlacke haben für Dünnschichtschaltkreise nur in Sonderfällen Bedeutung. Sie kommen bisweilen zur Anwendung, wenn innerhalb der Schaltkreise Halbleiterbauelemente und gegebenenfalls auch andere diskrete Bauelemente angeordnet werden sollen und die bereits erwähnten Verfahren aus irgendwelchen Gründen ungeeignet sind.

Die hohe innere Zuverlässigkeit der Schaltkreise erfordert auch für die Zusammenschaltung im Gerät Verbindungsverfahren, welche diese Zuverlässigkeit weitgehend erhalten und darüber hinaus ausbauen. Lötverbindungen zeichnen sich durch geringe Kosten sowie eine leichte Reparierbarkeit aus und sind bei einer guten Überwachung des Lötvorganges hinreichend zuverlässig. Bei erhöhten Temperaturen und anderen ungünstigen Einflüssen treten den jeweiligen Bedingungen angepaßte Schweißverfahren in den Vordergrund. Bei einer geringen Anzahl herzustellender Verbindungen werden sie jedoch erhebliche Kosten verursachen, wenn nicht anderweitig nutzbare Einrichtungen verfügbar sind.

Steckverbindungen sind verhältnismäßig unzuverlässig und vor allem in miniaturisierter Form sehr teuer. Sie sollten nur dort eingesetzt werden, wo die Anwendung unumgänglich ist.

Die Miniaturisierung im Schaltkreis ermöglicht bei der Gerätekonstruktion eine große Bauelementedichte. Der Schaltungsumfang innerhalb einer konstruktiven Einheit, beispielsweise einer Leiterplatte, läßt sich dadurch soweit vergrößern, daß in zunehmendem Maße nicht mehr die geometrisch erreichbare Bauele-

mentedichte, sondern die zur Verfügung stehende Verdrahtungsfläche bzw. bei größeren Einheiten der Verdrahtungsraum und der für die Wärmeabfuhr notwendige Raum die Packungsdichte bestimmen. Eine Zwei- oder Mehrebenenverdrahtung mit entsprechenden Leiterplatten oder flexiblen Leiterfolien kann Vorteile bringen, erfordert jedoch in jedem Falle eine Abstimmung des technischen Problems mit dem ökonomischen Aufwand.
Die Verlustwärme je Volumeneinheit steigt mit zunehmender Miniaturisierung vor allem in Abhängigkeit der Arbeitsgeschwindigkeit bzw. der Grenzfrequenz und des geforderten Signal-Rausch-Abstandes an, da sie nicht im gleichen Maße verringert werden kann wie das Volumen. Das Optimum der Miniaturisierung dürfte dort liegen, wo die technischen und ökonomischen Vorteile einer weitergehenden Miniaturisierung durch die Aufwendungen für eine zusätzliche Wärmeabführung ausgeglichen werden.

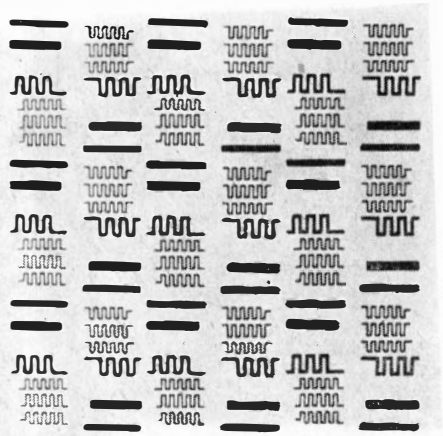
2.3.6. Umhüllung bzw. Verkappung

Dünnschichtschaltkreise sind, wie dies bereits bei der Betrachtung der verschiedenen Dünnschichtelemente dargelegt wurde, gegenüber klimatischen Einflüssen und aggressiven Industriegasen verhältnismäßig empfindlich. Die unmittelbar im Zusammenhang mit der Herstellung der Elemente aufgebrachten Oxidschichten sind nicht als ausreichender Schutz anzusehen. Zusammen mit den Anschlußelementen bedürfen die Schaltkreise außerdem eines geeigneten Schutzes gegen mechanische Beschädigungen sowie Stoß- und Schwingungsbelastungen.
Die üblicherweise relativ großen passiven Schaltkreise werden mit einer »Kunststoffschale« umgeben, die auch den Anschlußelementen eine bessere Stabilität verleiht. Häufig angewandte Umhüllungsverfahren sind das Eingießen und das Umpressen. Die umhüllende Masse muß sich dabei dem Wärmeausdehnungskoeffizienten des Substrats anpassen, eine gute Wärmeleitfähigkeit und geringe Schrumpfung aufweisen, feuchtigkeitsabweisend sein sowie gute elektrische Eigenschaften haben.
Für Hybridschaltkreise ist eine Kunststoffumhüllung nicht immer ausreichend. Forderungen nach dichteren Umhüllungen können

dabei aus der Verwendung nackter Halbleiterchips resultieren. In solchen Fällen wird häufig auf die bekannten TO-Rundgehäuse und auf Flachgehäuse zurückgegriffen, wie sie in der gleichen Art für Festkörperschaltkreise üblich sind. Diese Gehäuse gewährleisten einen vollkommenen Abschluß gegen Feuchtigkeit und Gase und ermöglichen das Einschließen in eine Schutzgasatmosphäre. Durch Auflöten der Substrate auf den Boden von Metallgehäusen ist eine ausgezeichnete Wärmeableitung zu erzielen. Neben den Hybridschaltkreisen werden auch passive Dünnschichtschaltkreise mit entsprechend kleinen Abmessungen bisweilen in dichte Gehäuse eingesetzt. Die sich neuerdings auch für Halbleiterbauelemente durchsetzende Umhüllung mit geeigneten Plasten läßt neue Umhüllungstechnologien auch für diese Gruppe von Schaltkreisen erwarten.

2.3.7. Angebot an Dünnschichtschaltkreisen

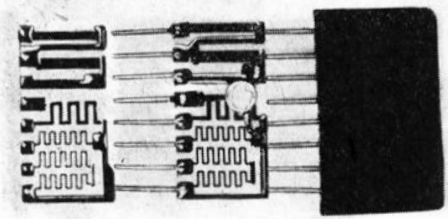
Bei der Dünnschicht- bzw. Dünnschicht-Hybrid-Technik steht nicht das vorbereitete, abgestufte Sortiment im Vordergrund, sondern die Anpassungsfähigkeit des Schaltkreisherstellers, was darauf zurückzuführen ist, daß diese Form der integrierten Schaltkreise aus den bereits mehrfach erwähnten Gründen besonders dann vorteilhaft in Erscheinung tritt, wenn ein flexibler Schaltungsentwurf und eng tolerierte, stabile Parameter notwendig sind. Auf dem internationalen Markt gibt es nur wenige Hersteller, die ein universelles Sortiment anbieten; es wird jedoch von allen Seiten auf die umfangreichen Möglichkeiten der Dünnschichttechnik und das realisierbare Elementespektrum hingewiesen (Bild 41). Sicher ist auch kaum eine technische Grenze für den Dünnschichtschaltkreis zu finden, die nicht auch für die gleiche Schaltung mit diskreten Elementen besteht. Gegenwärtig noch vorhandene, durch die Mindeststückzahlen zum Ausdruck kommende ökonomische Grenzen werden durch die zunehmende Flexibilität der Fertigungseinrichtungen mit fortschreitender Zeit ständig weiter abgebaut. Die sinnvolle Lösung des Problems liegt in der direkten Kopplung zwischen der Entwicklung und Herstellung der Schaltkreise und der Geräte, in der gleichen Weise, wie dies bereits seit langem im Zusammenhang mit der gedruckten



a)



b)



c), d), e)

Leiterplatte üblich ist. Hinsichtlich der Temperaturfestigkeit bestehen im kommerziell genutzten Bereich zwischen etwa −40 und + 85 °C technischerseits kaum Einschränkungen.

Festkörper-Hybrid-Schaltkreise werden wie die Festkörperschaltkreise in Baureihen oder als Einzeltypen für eine bestimmte Funktion angeboten. In diesem Rahmen sind sie für einen breiten Anwenderkreis nutzbar. Multichip-Hybrid-Schaltkreise bleiben sowohl hinsichtlich der Herstellung als auch der Anwendung speziellen Aufgaben vorbehalten und eignen sich kaum für eine Großserienfertigung. Diese Tatsachen schlagen sich im Angebot nieder.

Neben den Standardschaltkreisen und den Schaltkreisen nach Kundenwunsch bietet sich für spezielle Anwendungen eine dritte Form: das Halbfabrikat mit Verarbeitungstechnologie. Diese Variante bringt für die Kleinserienherstellung von Baugruppen und Geräten neben den Dickschichttechnologien eine weitere Möglichkeit der Realisierung integrierter Schaltungen in geringen Stückzahlen. Als Halbfabrikate stehen Sandwichplatten zur Verfügung, wie sie im Zusammenhang mit der Tantaltechnik erwähnt wurden; es sind dabei neben Tantal jedoch auch andere Schichtmaterialien üblich. Das gleiche gilt für die Verarbeitungstechnologien, die im allgemeinen zusammen mit dem Halbfabrikat gekauft werden.

Besonders betont sei abschließend die Tatsache, daß das Marktangebot auf Grund der bereits erwähnten Situation (Schaltkreisherstellung in unmittelbarer Zusammenarbeit zwischen Bauelemente- und Gerätehersteller) in keiner Weise die erhebliche Bedeutung des Dünnschicht- bzw. Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreises widerspiegelt.

Bild 41. Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreis in den verschiedenen Stufen seiner Herstellung

a) Grundsubstrat (enthaltend mehrere Schaltkreise) mit strukturiert aufgedampften Widerstandsschichten
b) Grundsubstrat nach dem Aufdampfen der Schichten für Leiterbahnen und Kontakte
c) Schaltkreis nach dem Trennen des Grundsubstrats und dem Tauchverzinnen
d) Schaltkreis mit eingesetztem Transistor und Anschlüssen
e) vergossener Schaltkreis

3

Festkörperschaltkreise

Definition: Der Festkörper- oder Halbleiterblock-Schaltkreis ist eine integrierte Anordnung mehrerer zu einer bestimmten Schaltung gehörender Elemente. Er enthält aktive und passive Elemente, die durch gezielte Einstellung des Leitungstyps (Elektronen- oder Löcherleitung) und der elektrischen Leitfähigkeit bestimmter Gebiete eines Halbleitersubstrats hergestellt werden. Das Substrat ist dabei neben seiner Funktion als mechanischer Träger mehrerer Elemente gleichzeitig auch Träger der elektrischen Vorgänge im Schaltkreis.

Formen: Der Herstellung von Festkörperschaltkreisen dienen die gleichen Technologien, wie sie auch für Planartransistoren in großem Umfang üblich sind (Bild 42). Neben den Transistoren entstehen im gleichen Arbeitsgang jedoch auch die passiven Elemente mit ein und demselben Maskensatz. Eine wesentliche Voraussetzung für die Herstellung von Festkörperschaltkreisen ist die mit den Planartechnologien verbundene ebene Oberfläche über den innerhalb des Substrats liegenden Elementen. Diese ermöglicht die sehr zuverlässige und ökonomisch günstige Verbindung der Elemente untereinander über aufgedampfte Leiterzüge, die wiederum mittels einer Maske für eine große Anzahl von Schaltkreisen gemeinsam herstellbar sind.

Die Substrate haben Flächen von einem bis zu einigen Quadratmillimetern. Sie treten mit diesen geringeren Abmessungen beim Gerätetechniker allerdings nicht in Erscheinung. Sie sind entweder in den vom Transistor bekannten TO 5-Rundgehäusen, die für diesen Zweck bis zu 10 Anschlüsse haben können, oder in verschiedenen Flachgehäusen verkappt. Bedeutende Bauformen

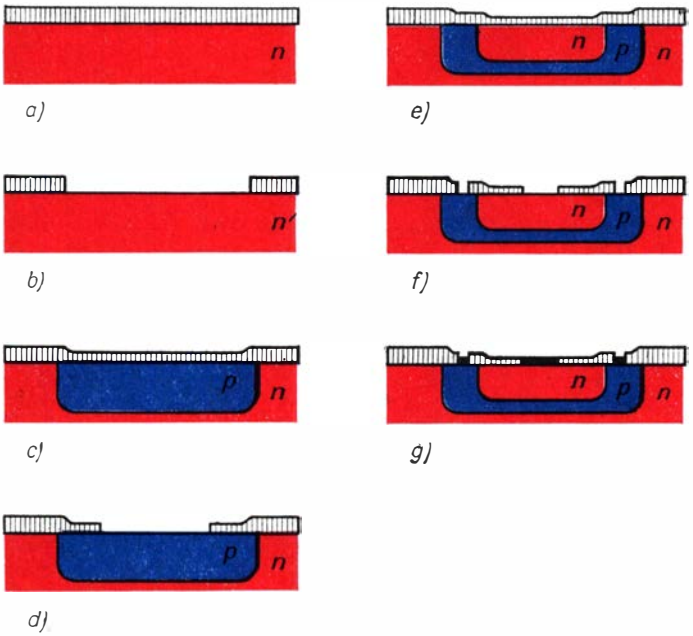


Bild 42. Entstehung eines Planartransistors

a) Ausgangsmaterial (oxydierte Siliziumscheibe)
b) Oxidmaske für Basisdiffusion nach selektiver Ätzung der Oxidschicht
c) Substrat nach der Basisdiffusion
d) Oxidmaske für Emitterdiffusion nach wiederholter Ätzung
e) Transistor nach Abschluß der Diffusionsprozesse
f) Transistor mit freigeätzten Kontaktflächen
g) Transistor mit metallisierten Kontaktflächen in der Ebene der Oxidschicht

sind die Flachgehäuse für 1,25-mm-Anschlußraster und die »dual-inline«-Gehäuse für 2,5-mm-Raster. Die letztgenannte Form ist in jüngster Zeit sehr in den Vordergrund getreten, weil sie eine einfachere Montage und billige Technologien bei der Leiterplattenherstellung zuläßt, während die flat packs in dieser Hinsicht einen hohen Aufwand erfordern, wobei die stärkere Miniaturisierung nur in wenigen Fällen echte Vorteile bringt.

Als Grundform des Festkörperschaltkreises ist der vollständig diffundierte monolithische Schaltkreis zu betrachten, bei dem alle

3

Elemente in einem gemeinsamen Substrat angeordnet und durch pn-Übergänge (sperrgepolte Dioden) voneinander isoliert sind. Ebenfalls ein geschlossenes Substrat, jedoch eine SiO_2-Isolation anstelle der mit starken parasitären Effekten behafteten pn-Isolation sind die Kennzeichen einer weiteren sehr bedeutungsvollen Variante. Eine wesentlich andere Gestalt zeigen dagegen die Schaltkreise, bei denen der gemeinsame mechanische Träger zwar die Ausgangsbasis darstellt, die dielektrische Isolation jedoch im Verlauf des Herstellungsprozesses, wie beispielsweise bei der »beamlead«-Technik, zu einer Zerlegung des Silizium-Grundsubstrats in mehrere Teilsubstrate führt. Weitere Varianten sind der Festkörper-Hybrid- und der Multichip-Schaltkreis, die bereits im Zusammenhang mit der Dünnschichttechnik Erwähnung fanden. Die Wiederholung an dieser Stelle verdeutlicht die Tatsache, daß die einzelnen Technologien kaum streng zu trennen sind und vielerlei Kombinationen zur Anwendung kommen.

Ausschlaggebend für die Wahl der einen oder anderen Kombination sind neben technischen auch ökonomische Gesichtspunkte. Letztere zwingen in jedem Falle zu rationellen Entwicklungs- und Fertigungsmethoden, das um so mehr, je niedriger die jeweiligen Fertigungszahlen liegen. Ausdruck von Bemühungen in dieser Richtung sind unter anderem der sogenannte Matrix-Schaltkreis und das allgemein übliche Verfahren der Nutzung bereits erprobter Strukturen von Schaltkreisen kleineren Umfangs bzw. Schaltkreisteilen bei der Verwirklichung komplexer Schaltkreise. Matrix-Schaltkreise enthalten auf einem gemeinsamen Substrat Anordnungen von Elementen, die erst später im Zusammenhang mit einem bestimmten Anwendungsfall zusammengeschaltet werden. Wachsende Bedeutung erlangen in diesem Zusammenhang Methoden des Schaltkreisentwurfs mit Hilfe elektronischer Rechenmaschinen.

Die umfassendste Stufe der Integration ist die »large-scale integration«. In dieser fortgeschrittenen Form der Festkörpertechnik läßt sich eine größere digitale Schaltungsgruppe, die bisher aus mehreren Einzelschaltkreisen auf einer Leiterplatte zusammengeschaltet wurde und z. Z. in den meisten Fällen auch noch wird, unmittelbar auf einem gemeinsamen Substrat integrieren. Die Vorteile, eine höhere Zuverlässigkeit und rationellere Fertigung für das gesamte Gerät, liegen auf der Hand. Die entstehenden

Entwurfs- und Sortierungsprobleme sind nur mit Computern zu beherrschen.

Alle Festkörperschaltkreise sind als abgeschlossene Elemente anzusehen und gestatten außerhalb der Schaltkreisfertigung keine Eingriffe.

Anwendung: Die Kosten der Festkörperschaltkreise sind unterhalb einer Mindeststückzahl proportional der insgesamt herzustellenden Stückzahl. Sie bieten dazu das gegenwärtig technisch erreichbare Maximum an Zuverlässigkeit und sehr geringe geometrische Abmessungen. Sie sind damit den Bedingungen der Digitaltechnik, wo ein verhältnismäßig schmales Sortiment mit großer Anwendungsbreite eingesetzt wird, ideal angepaßt, zumal diese Technik für die Nachteile dieser Schaltkreise — die verhältnismäßig weiten Toleranzen und die teilweise starke Temperaturabhängigkeit — relativ unempfindlich ist. Für dieses Gebiet der Elektronik ist die Festkörpertechnologie hervorragend geeignet und jeder anderen Technologie weit überlegen.

Die Heimelektronik, insbesondere die Fernsehtechnik, ist ein weiterer elektronischer Sektor, wo vor allem die großen Stückzahlen gleicher Schaltkreise im Vordergrund stehen. Im Hinblick auf die technischen Parameter stellt diese Technik relativ bescheidene Ansprüche. Im Gegensatz zur Digitaltechnik kommen hier jedoch vor allem lineare Festkörperschaltkreise in Betracht.

Wesentlich anders liegen die Verhältnisse in den analogen Zweigen der kommerziellen Elektronik. Neben sehr hohen Anforderungen an die technischen Parameter steht der Wunsch nach einem verhältnismäßig breiten Sortiment mit jeweils nur geringen Stückzahlen. Obwohl diese Erfordernisse der Gerätetechnik und der Zwang zur Fertigung mit hohen Stückzahlen zunächst einen Widerspruch bilden, bieten universell nutzbare und damit auch in Großserie herstellbare Verstärker und in gewissem Umfang auch Multifunktionskreise zumindest für Teilbereiche technisch und ökonomisch vorteilhafte Bedingungen.

Mit zunehmender Beherrschung der Diffusions-, Isolations-, Maskierungs- und Sortierungstechnologien werden in ständig wachsendem Umfang auch kleinere Mengen spezieller Schaltkreise wirtschaftlich und dazu mit verbesserten Parametern zu fertigen sein, wobei eine geeignete, wenn auch teuere dielektrische Isolation die Arbeitsgeschwindigkeit bis etwa 1 GHz verschieben

wird. Diese Entwicklung eröffnet Möglichkeiten für den Einsatz von Festkörperschaltkreisen auch in kommerziellen analogen Geräten und Einrichtungen, für die bisher die Filmtechnologien prädestiniert erschienen.

Ein anderer Weg zur Vermeidung von Kleinserien für analoge Baugruppen führt über Veränderungen in den Geräte- und Systemkonzeptionen zur verstärkten Anwendung digitaler Festkörperschaltkreise. Obwohl die analoge Technik dadurch bei weitem nicht vollkommen zu ersetzen ist und sich neue Konzeptionen nur sehr langsam einführen, ist auch durch diese Bestrebungen eine Zunahme der Bedeutung der Festkörpertechnik für den analogen Teil der Gerätetechnik zu erwarten.

Im Zusammenhang mit der Einschätzung der Anwendbarkeit der Festkörperschaltkreise in der Analogtechnik scheint die folgende Betrachtung notwendig: Mit einer wachsenden Anzahl von Transistoren und Dioden je Schaltkreis steigt die Wirtschaftlichkeit der Festkörpertechnologie und sinkt die Zweckmäßigkeit des Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreises. Andererseits sind in analogen Schaltungen oft engtolerierte und besonders stabile passive Bauelemente erforderlich, die sich z. Z. nur mit Dünnschichttechnologien verwirklichen lassen. Diese Erscheinungen deuten darauf hin, daß eine allen Anforderungen gerecht werdende Integration eine zweckentsprechende Kombination der verschiedenen Technologen anstreben muß. Mit der zunehmenden Beherrschung der verschiedenen Technologien erweitert sich ständig die Basis für derartige Verfahren, und im Endeffekt wird nicht mehr die Frage Festkörper- oder Dünnschichtschaltkreis im Vordergrund stehen, sondern die weitgehend automatisierte Fertigung von Schaltkreisen mit bestimmten elektrischen Eigenschaften, für die alle notwendigen Technologien nach Bedarf eingesetzt und der Ökonomie untergeordnet werden.

Die Tatsache, daß der internationale Markt wegen der umfangreichen Investitionen für Forschung und Entwicklung sowie die Fertigungsanlagen auch gegenwärtig nur von wenigen großen Herstellern beherrscht wird und nur diese in der Lage sind, ein breiteres Sortiment ökonomisch herzustellen, deutet darauf hin, daß es nur in Sonderfällen möglich ist, Festkörperschaltkreise im kleineren Rahmen im Zusammenhang mit der Gerätefertigung herzustellen.

3.1. Physikalische Grundlagen

Die elektrischen Verhältnisse in Festkörperschaltkreisen weichen erheblich von denen in Dünn- bzw. Dickschichtschaltkreisen ab.
In Dünn- bzw. Dickschichtschaltkreisen dient das Substrat ausschließlich als mechanischer Träger der einzelnen Elemente und hat unter der Voraussetzung idealer Eigenschaften keinen Einfluß auf die elektrischen Vorgänge im Schaltkreis. Diese beschränken sich auf die aufgebrachten Schichten selbst, wobei dort der gleiche Leitungsmechanismus in Erscheinung tritt wie bei vergleichbaren konventionellen Bauelementen. Die bei der Herstellung und Anwendung derartiger Schaltkreise mehr oder weniger feststellbare Verknüpfung zwischen Schicht und Substrat ist offensichtlich auf eine unzureichende Qualität der Oberflächen sowie auf die dielektrischen und elektrischen Verluste des isolierenden Trägers zurückzuführen.
Die Festkörperschaltkreise basieren auf Halbleitersubstraten, vorwiegend aus Silizium. Die einzelnen Elemente werden in den meisten Fällen durch örtlich begrenzte Veränderungen des Grundmaterials unmittelbar innerhalb des Substrats verwirklicht. Das Substrat dient in diesem Falle nicht als mechanischer Träger der im Schaltkreis enthaltenen Elemente, sondern ist gleichzeitig auch Träger der elektrischen Vorgänge im Schaltkreis. Dabei ist innerhalb des Halbleiters ein bereits von der Transistortechnik bekannter Leitungsmechanismus wirksam, der durch die unterschiedliche Besetzung der in Betracht kommenden Energiebänder von dem in metallischen Leitern abweicht.
Es ist im Rahmen dieses Buches nicht möglich, die physikalischen Grundlagen für ein solches Verhalten und die sehr interessanten und für den Festkörperschaltkreis auch außerordentlich bedeutungsvollen Vorgänge an Metall-Halbleiter-Übergängen und Sperrschichten darzulegen. Dazu wäre ein weiter Ausflug in die Festkörperphysik und deren Darstellungsweisen erforderlich. An dieser Stelle soll lediglich versucht werden, eine einführende Vorstellung vom Leitungsmechanismus in Halbleitern zu vermitteln. Für eine gründliche Beschäftigung mit dieser Problematik stehen zahlreiche Veröffentlichungen im Zusammenhang mit der Transistortechnik und in speziellen Fällen der Festkörperphysik zur Verfügung.

3

Leitungsmechanismus in Halbleitern

Silizium hat eine kristalline Struktur und ist in reiner Form bei — 273 °C (dem absoluten Nullpunkt) ein Isolator. Die Atome befinden sich in ihrer Ruhelage an den Kristallgitterplätzen, und alle Valenzelektronen sind fest an ihre Atome gebunden.

Bei Raumtemperatur weist auch reines Silizium bereits eine Leitfähigkeit auf. Dieser Zustand ist auf Auswirkungen der zugeführten Wärmeenergie zurückzuführen. Die Atome im Kristallgitter geraten mit zunehmender Erwärmung des Materials in Bewegung und beginnen um ihre Ruhelage zu schwingen. Einige Elektronen werden durch die Wärmeenergie auf ein höheres Energieniveau gehoben, was gleichbedeutend dafür ist, daß es Valenzelektronen gelingt, aus den Gitterbindungen auszubrechen. Jedes dieser Elektronen als negativer Ladungsträger hinterläßt an seinem Platz eine positive Ladung, die es bisher dort festhielt. Diese positiven Ladungsstellen im Kristallgitter werden als »Löcher« oder Defektelektronen bezeichnet. Die Anzahl der Ladungsträgerpaare – negative freie Elektronen und positive Löcher – wächst mit der Kristalltemperatur.

Beide Arten von Ladungsträgern sind an der Leitung beteiligt. Die aus der Bindung gelösten freien Elektronen wandern beim Anlegen einer Gleichspannungsquelle auf mehr oder weniger geradlinigen Wegen zur positiven Elektrode. Die positiven Ladungen, die Löcher, tragen zur Leitung bei, indem sie die zur positiven Elektrode laufenden negativen Ladungsträger aufnehmen, die ihrerseits an anderer Stelle Löcher zurücklassen. Eine fortlaufende Wiederholung dieses Vorganges erweckt den Eindruck einer Wanderung dieser Löcher zur negativen Elektrode. Das »Einfangen« der negativen Ladungsträger durch die Stellen positiver Ladung und damit die Wiederherstellung des Gleichgewichtes im Kristallgitter ist als Rekombination bekannt. Bedingt durch diesen Effekt haben die freien Elektronen und Löcher nur begrenzte Lebensdauer. Bei einer bestimmten Temperatur werden jedoch im Mittel so viele neue Ladungsträgerpaare erzeugt (Generation) wie verschwinden, so daß die mittleren Dichten von Elektronen und Löchern konstant bleiben.

Für die Leitung, die durch die negativen Elektronen getragen

wird, ist der Begriff n-Leitung und für die positive »Löcher«-Leitung der Begriff der p-Leitung geläufig.

Die Leitfähigkeit des reinen Siliziums, die als Eigenleitung — p- und n-Leitung sind gleich stark — bezeichnet wird, ist auf Grund ihrer Entstehung sehr stark temperaturabhängig. Bei Raumtemperatur wird sie von der Störstellenleitung, über die anschließend noch zu sprechen ist, nahezu vollkommen überdeckt; beim Transistor tritt sie beispielsweise nur im Zusammenhang mit dem Reststrom in Erscheinung. Der die Eigenleitfähigkeit charakterisierende spezifische Widerstand liegt im Bereich der Raumtemperatur bei etwa 200 000 Ω · cm. Nur bei relativ hohen Temperaturen macht sich die Eigenleitfähigkeit des reinen Siliziums neben der Störstellenleitung in starkem Maße, dann allerdings auch überaus störend, bemerkbar.

Die Kennwerte des für die Herstellung von Transistoren und Festkörperschaltkreisen genutzten Siliziums werden im Betriebstemperaturbereich durch die bereits erwähnte Störstellenleitung be-

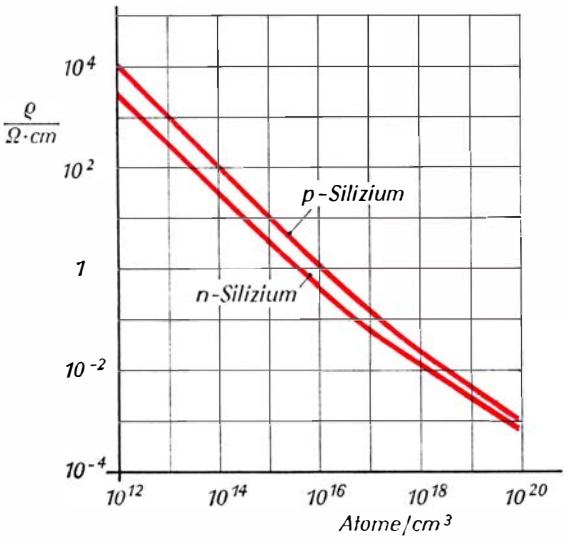


Bild 43. Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Störstellenkonzentration

stimmt. Das reine Siliziumgitter, welches $5 \cdot 10^{22}$ Plätze/cm^3 aufweist, wird dazu bewußt in einer bestimmten Art und Weise verunreinigt, um eine definierte Leitfähigkeit bzw. einen bestimmten Wert des spezifischen Widerstandes zu erzielen.
Die Verunreinigung erfolgt durch das Zusetzen bestimmter Materialien in der in Bild 43 angegebenen äußerst geringen Konzentration. Sie führt dazu, daß im Kristallgitter (Bild 44) an die Stelle einiger Siliziumatome, die 4 Valenzelektronen haben, Atome (Störstellen) treten, die entweder 3 oder 5 Valenzelektronen aufweisen. Materialien mit 3 Elektronen, wie Bor (B), Aluminium (Al) und Indium (In), ergeben p-leitendes Silizium und Phosphor (P), Antimon (Sb) und Arsen (As) u. a. n-leitendes Silizium. Der Mechanismus besteht dabei darin, daß die 5wertigen Atome bereits bei sehr geringer Energiezufuhr das für den Einbau in das Siliziumkristallgitter nicht notwendige Elektron abgeben und dadurch einen Überschuß an frei beweglichen negativen Ladungsträgern herstellen, die 3wertigen Atome jedoch für den Einbau in dieses Gitter ein Elektron zu wenig haben, das aus dem Siliziumgitter zur Verfügung gestellt wird, so daß an der Stelle des fehlenden Elektrons eine frei bewegliche positive Ladungsstelle und damit p-Leitung entsteht. Die Elektronen abgebenden 5wertigen Fremdatome sind als Donatoren und die Elektronen aufnehmenden 3wertigen Fremdatome als Akzeptoren bekannt. Der Zusatz des Fremdmaterials wird als Dotierung bezeichnet. Die Dotierung kann, wenn sie bei der Aufbereitung des Grundmaterials vorgenommen wird, zu einer gleichmäßigen Verunreinigung des gesamten Siliziumblockes führen, wenn sie durch eine Diffusion erfolgt, auf einen örtlich scharf begrenzten Teil eines Substrats beschränkt bleiben.
Zwei Erscheinungen können die Parameter des Festkörperschaltkreises in verhältnismäßig starkem Maße beeinflussen: die Oberflächenleitung und die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit. Es erscheint deshalb unerläßlich, den damit verbundenen Problemen einige Aufmerksamkeit zu widmen.

Oberflächenleitung

Die Oberflächenleitung ist offensichtlich, obwohl die Verhältnisse noch nicht bis ins letzte Detail geklärt sind, zum erheblichen Teil

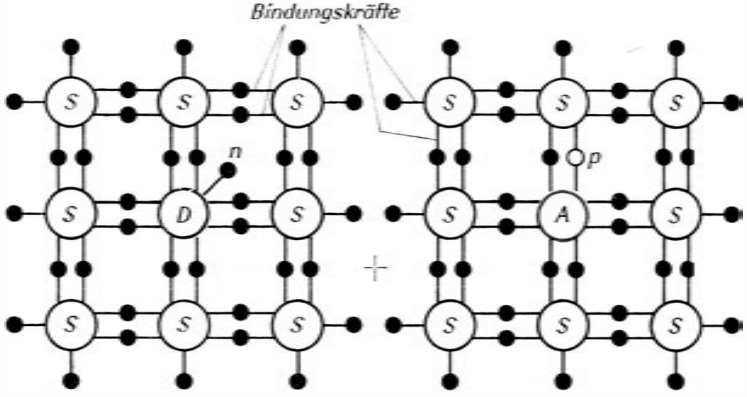


Bild 44. Ebene Darstellung eines dotierten Siliziumkristallgitters
a) Dotierung mit 5wertigem Donatoratom
b) Dotierung mit 3wertigem Akzeptoratom

auf die Störung des Kristallgitters an der Substratoberfläche zurückzuführen. Durch das Fehlen von Nachbaratomen und durch Bildung von Oberflächenschichten (Oxide, Feuchtigkeitsfilme usw.) entstehen an der Oberfläche noch weitgehend unkontrollierbare Störstellen, die sogenannte Oberflächenzustände bilden und in ebenso unkontrollierbarer Weise die Leitfähigkeit und die Rekombinationsrate an der Oberfläche verändern. So kann es häufig zu einer Umkehr des Leitungstyps in den Randgebieten der Substrate kommen (Inversion). Um wenigstens die Oberflächenleitung gegen zeitliche Änderungen zu stabilisieren, ist eine sogenannte Passivierung der Oberfläche erforderlich. Das modernste Passivierungsverfahren ist die in der Planartechnik angewandte Bedeckung der Substratoberfläche mit einer dünnen SiO_2- oder Si_3N_4-Schicht.

Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit

Die bereits im Zusammenhang mit dem reinen, undotierten Silizium erwähnten Schwingungen im Kristallgitter, die mit steigender Temperatur stärker werden, zu einem Aufreißen der Gitterbindungen und damit zu einer wachsenden Anzahl freier Ladungsträger führen, lassen eine Zunahme der Leitfähigkeit mit ansteigender Temperatur erwarten. Entgegen diesen Erwartungen ist jedoch in einem weiten Bereich um die Raumtemperatur zumindest bei stark dotiertem Material ein schwacher Abfall der Leitfähigkeit zu beobachten. Dieses Verhalten ist auf die wachsende Anzahl der Zusammenstöße der freien Ladungsträger mit den intensiver schwingenden Gitteratomen zurückzuführen: Die Beweglichkeit als der eine bestimmende Faktor für die Leitfähigkeit nimmt ab; die Ladungsträgerdichte als zweiter Faktor bleibt dagegen zunächst nahezu konstant. Erst bei höheren Temperaturen setzt sich die steigende Zahl der sich durch Zuführung thermischer Energie lösenden Ladungsträger gegenüber den bereits bei geringer Energiezufuhr vollkommen abgespaltenen Störstellenladungsträgern durch und bewirkt ein Ansteigen der Leitfähigkeit.

3.2. Technologische Grundlagen

3.2.1. Aufbereitung des Substratmaterials

Die im vorangegangenen Abschnitt skizzierte Anpassung der Leitfähigkeit des Halbleitermaterials an die verschiedenen Bedürfnisse erfordert eine enorme Reinheit des Ausgangsmaterials und eine sichere Beherrschung der gezielten Verunreinigung. Die folgenden Betrachtungen werden sich mit den zur Verwirklichung der Forderungen notwendigen technologischen Prozessen beschäftigen. Bemerkenswert erscheint zunächst die Tatsache, daß die z. Z. verfügbaren chemischen Meßverfahren nicht ausreichen, um geringe Veränderungen der Materialeigenschaften, die bereits genügen, um die elektrischen Parameter der Halbleiterelemente erheblich zu beeinflussen, sicher zu erfassen. Die Zuführung einer neuen Silizium- oder Dotierungsmaterialcharge oder eine geringfügige Änderung in den Aufbereitungstechnologien kann, ohne daß sich bei den Messungen Abweichungen zeigen, bereits zu kritischen Materialänderungen führen. Neben einer sorgfältigen und sauberen Arbeitsweise ist deshalb für die Materialaufbereitung eine solide Erfahrung notwendig, wenn empfindliche Pannen, wie sie in der Anfangszeit der Transistorherstellung als Fertigungseinbrüche in Erscheinung traten, vermieden werden sollen.

Zonenschmelzverfahren

Als Ausgangsmaterial steht ein auf chemischem Wege gereinigtes Rohsilizium mit einer Reinheit von etwa 98 % zur Verfügung. Dieses Material ist für eine gezielte Beeinflussung der Leitfähigkeit noch nicht brauchbar und muß vor der Weiterverarbeitung einer »physikalischen Reinigung« in Form des sogenannten Zonenschmelzverfahrens unterworfen werden.
Dieses Verfahren besteht in einem aufeinanderfolgenden Schmelz- und Erstarrungsprozeß, dessen reinigende Wirkung darauf beruht, daß die Fremdatomkonzentration im Kristallgitter des bei langsamer Erstarrung auskristallisierenden Siliziums geringer ist als die Konzentration in der Schmelze. Fremdatome, die keinen Platz im Kristallgitter finden, bleiben in der Schmelze zurück.

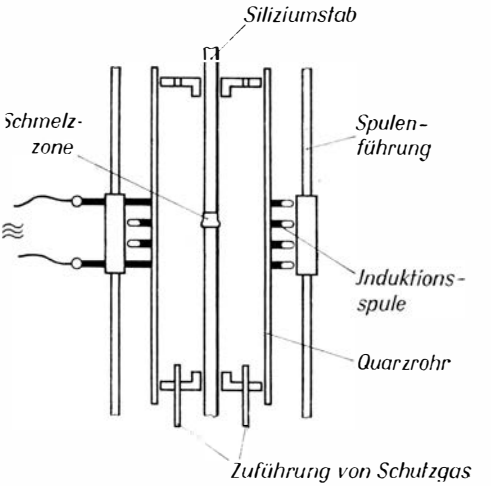


Bild 45
Prinzipieller Aufbau einer Einrichtung für das tiegellose Zonenschmelzen

Die technische Verwirklichung des Vorganges setzt beim tiegellosen Schwebezonen-Schmelzverfahren (Bild 45) ein stabförmiges Rohsilizium voraus, welches in einer speziellen Einrichtung senkrecht eingespannt wird und nach einer von unten nach oben fortschreitenden Erhitzung bis auf die Schmelztemperatur wieder erstarrt. Während des Prozesses ist jeweils nur eine schmale Zone des Stabes im schmelzflüssigen Zustand, wobei die Oberflächenspannung das Material am Auseinanderfließen hindert. Die Erhitzung erfolgt über eine um den Querschnitt liegende Spule durch die Verlustwärme eines induzierten hochfrequenten Wechselstromes. Ein präziser Mechanismus gewährleistet eine kontinuierliche Verlagerung der Induktionsspule und damit der Schmelzzone entlang dem Stab in einer geeigneten Geschwindigkeit in der Größenordnung von wenigen Millimetern je Minute.
Das tiegellose Verfahren vermeidet eine Verunreinigung des erst bei 1420 °C schmelzenden und im flüssigen Zustand chemisch sehr aktiven Siliziums. Selbst Tiegel aus hochreinem Quarz haben sich für diesen Zweck als ungeeignet erwiesen, weil die Reaktion des Quarzes mit dem Silizium zur Aufnahme von Sauerstoff und Bor

führt. Gegen Umgebungseinflüsse wird die Schmelz- und Erstarrungszone durch eine Schutzgasatmosphäre bzw. durch eine Evakuierung abgeschirmt. Im Hochvakuum kommt es zu einer Unterstützung des beschriebenen, als Segregation bekannten Reinigungsprozesses durch ein »Abdampfen« von Störelementen.
Im Verlaufe seiner Wanderung zum oberen Stabende erfolgt eine zunehmende Anreicherung des Schmelzsumpfes mit Fremdatomen. Am Kopf des Stabes erstarrt dieser Sumpf nach Abschluß des Durchlaufes und hinterläßt dort ein Gebiet konzentrierter Verunreinigung. Eine mehrmalige Wiederholung des erwähnten Vorgangs verstärkt diese Verlagerung der Verunreinigungen in das obere Stabende und bringt damit eine weitere Verringerung der Fremdatomkonzentration in den unteren und mittleren Abschnitten. Der stark verunreinigte Kopf wird nach Abschluß des Prozesses abgetrennt.
Durch die Zonenreinigung erlangt der Siliziumstab eine technisch maximal erreichbare Freiheit von Fremdatomen und damit eine sehr geringe Leitfähigkeit. Der für reines Silizium charakteristische spezifische Widerstand der Eigenleitung von etwa 200 000 Ωcm wird dabei wegen der auch bei diesem Verfahren nicht vollkommen auszuschließenden Verunreinigung allerdings bei weitem nicht erreicht.

Ziehen und Dotieren von Einkristallen

Die bereits erwähnte starke chemische Aktivität des flüssigen Siliziums hat auch einen erheblichen Einfluß auf die Verfahren zur Überführung des anfangs polykristallinen Siliziums in die einkristalline Form. Bei dem allgemein bekannten Czochralski-Verfahren wird der Einkristall aus einem Tiegel gezogen. Dabei ist das Silizium jedoch in verhältnismäßig starkem Maße den Verunreinigungen durch das Tiegelmaterial ausgesetzt. Aus diesem Grunde hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die Überführung in die Einkristallinität mit dem tiegellosen Schwebezonenverfahren zu vereinigen. In dieser Form finden Reinigung, Dotierung und Einkristallbildung gleichzeitig statt. Ausgangspunkt ist ein geeignet dotiertes Einkristallstück, das dem polykristallinen Rohsiliziumstab an seinem unteren Ende vorgespannt wird. Mit der den Stab durchlaufenden Schmelzzone werden die Dotierungsatome vom Einkristallstück ausgehend gleichmäßig auf den gesamten Stab verteilt und die Einkristallinität gewissermaßen mitgeschleppt. Gelegentlich findet die Dotierung auch so statt, daß der Rezipient, in dem das Zonenschmelzen erfolgt, mit einem

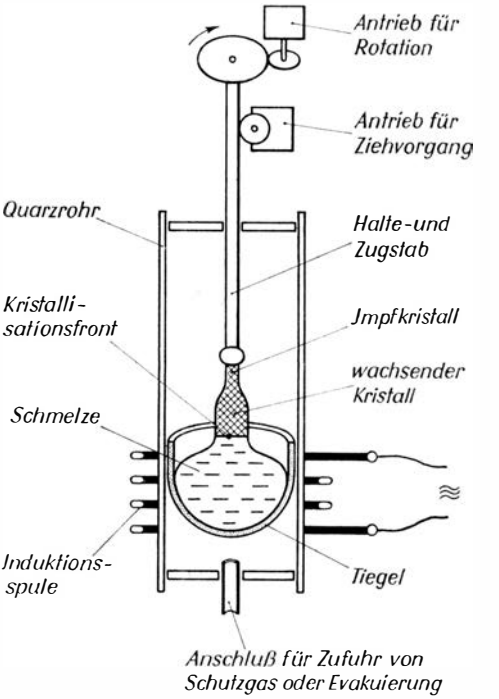


Bild 46
Schematische Darstellung einer Einrichtung zum Ziehen von Einkristallen

Dotierungsgas gefüllt wird, dessen Atome in die flüssige Schmelze eindiffundieren und bei der Erstarrung in das Kristallgitter eingebaut werden.
Leider läßt sich dieses sehr vorteilhafte tiegellose Kombinationsverfahren nur für Kristalle mit einem Durchmesser bis etwa 25 mm anwenden. Bei größeren Durchmessern reicht die Oberflächenspannung nicht aus, die Schwebezone am Auseinanderfließen zu hindern. Für Substrate mit Abmessungen, wie sie u. a. für die Systemintegration notwendig sind, werden die Einkristalle deshalb unter Beachtung aller Maßnahmen, die eine minimale Verunreinigung gewährleisten, nach dem Czochralski-Verfahren

aus dem Tiegel gezogen (Bild 46). Auf diese Weise lassen sich Kristalldurchmesser bis etwa 50 mm, gegebenenfalls auch 100 mm verwirklichen.

Beim Czochralski-Verfahren wird der zonengereinigte, polykristalline Siliziumstab zerstückelt und in einem speziellen Quarztiegel auf induktivem Wege geschmolzen. Im schmelzflüssigen Zustand bietet sich eine Möglichkeit zur Festlegung des Leitungstyps und des spezifischen Widerstandes durch eine geeignete Dotierung. Da der dazu notwendige Zusatz von Fremdatomen in äußerst geringer, kaum noch meßtechnisch erfaßbarer Konzentration erfolgt, ergeben sich in diesem Zusammenhang beträchtliche Probleme, die nur durch bestimmte Kunstgriffe lösbar werden. Bei hochohmigen und demzufolge sehr schwach dotierten Materialien geschieht die Dotierung beispielsweise über Zwischenlegierungen, bei denen die Konzentration durch die Messung des spezifischen Widerstandes ermittelt wird.

Als Grundlage für die gewünschte einkristalline Struktur wird ein sogenannter Impfkristall, der an einem Stab befestigt ist, in die Schmelze eingetaucht und, bevor er schmilzt, unter ständigem Drehen um die Längsachse senkrecht wieder herausgezogen. Das Schmelzgut setzt sich an den Keim an und kristalliert durch die Abkühlung beim Verlassen der Schmelze langsam aus. Dabei führt es den Kristallaufbau des Mutterkristalls fort und wächst in einer einkristallinen Ordnung an. Da der Impf- oder Mutterkristall die Orientierung für das Kristallgitter gibt und den Aufbau dieses Gitters sehr wesentlich beeinflußt, werden an die Qualität erhebliche Anforderungen gestellt. Darüber hinaus sind jedoch auch exakt eingehaltene Ziehbedingungen entscheidende Voraussetzungen für die einwandfreie und in allen Belangen gleichmäßige Ausbildung des Einkristalls. Von wesentlichem Einfluß ist die Konstanz der Zieh- und Rotationsgeschwindigkeit, der Temperatur und der Umgebungseinflüsse. Die Einflüsse der Umgebung werden durch eine Evakuierung der kritischen Zonen oder durch eine Schutzgasatmosphäre stabilisiert. Das Ziehen erfolgt normalerweise mit einer Geschwindigkeit zwischen 0,3 · · · 10 mm/min.

Der Leitungstyp der Einkristalle wird in Anpassung an die herzustellenden Schaltkreise bei der Dotierung so gewählt, daß sich

bei der Herstellung der Strukturen eine minimale Zahl von Diffusionsschritten notwendig macht. Üblicherweise erhält das Material einen spezifischen Widerstand in der Größenordnung von etwa 5 . . . 10 Ω cm.

3.2.2. Herstellung der Substrate

Die Substrate für Festkörperschaltkreise sind kleine Siliziumscheibchen, wie sie in der gleichen Weise auch bei der Herstellung von Planartransistoren entstehen. Während die Transistorsubstrate jedoch üblicherweise minimale Kantenlängen von etwa 0,5 mm × 0,5 mm aufweisen, erfordern einfache Festkörperschaltkreise Substrate mit einer Fläche von 1 mm × 1 mm und komplexe Schaltkreise Substratflächen von mehreren Quadratmillimetern.
Die Abmessungen des Transistorsubstrats werden zumindest beim Kleinleistungstransistor nicht durch das Element selbst bedingt, sondern ergeben sich aus der eben noch möglichen Manipulierbarkeit bei der Fertigung. Beim Festkörperschaltkreis bestimmt demgegenüber der Umfang der integrierten Schaltung die Substratabmessungen. Bei der Verwirklichung der Schaltkreise muß deshalb ein vernünftiger Kompromiß zwischen den Forderungen der Schaltungstechnik einerseits und den technologischen und ökonomischen Gegebenheiten andererseits geschlossen werden. Große Substratabmessungen gestatten die Unterbringung umfangreicher Schaltungen; kleinere Substrate gewährleisten im Zusammenhang mit den Herstellungstechnologien eine höhere Ausbeute bei Fehlstellen im Substrat und Fehlern in der Schaltkreisstruktur. Die Dicke der Substrate ist vor allem durch die für die Bearbeitung nötige mechanische Festigkeit gegeben und liegt bei beiden Anwendungen etwa zwischen 75 und 200 µm.
Festkörperschaltkreise unterscheiden sich hinsichtlich der Herstellungsverfahren nur sehr wenig von den Planartransistoren. Analog zur Transistorfertigung wird eine beträchtliche Anzahl von Schaltkreisen auf einer größeren Siliziumscheibe zunächst gemeinsam den notwendigen Oxydations-, Diffusions- und Bedampfungsprozessen unterworfen, bevor die Schaltkreise als selbständige Elemente in Erscheinung treten. Die gemeinsame Scheibe,

welche als »Grundscheibe« bezeichnet werden soll, hat in der Regel einen Durchmesser von etwa 20 ... 40 mm und kann, bei der erwähnten Substratfläche von etwa 1 mm^2, etwa 400 Festkörperschaltkreise aufnehmen. Das Zerlegen der Scheibe erfolgt durch Ritzen und Brechen. Dafür werden zwischen den einzelnen Schaltkreisen Bahnen von etwa 100 µm Breite benötigt.
Die »Grundscheibe« ist als Ausgangsbasis für die Schaltkreisherstellung und als Endprodukt der Materialaufbereitung anzusehen. Vom gezogenen Einkristall bis zur weiterverarbeitbaren Scheibe sind jedoch noch mehrere Arbeitsgänge notwendig.

Substratbearbeitung

Zunächst müssen vom zylindrischen Einkristall mittels einer Diamantsäge Scheiben abgetrennt werden. Als Sägeblatt kann dabei ein Bronzering von etwa 200 µm Dicke dienen, dessen Rand mit feinstem Diamantstaub besetzt ist. Die Schnittbreite und die Materialstärke der Grundscheibe liegen in der gleichen Größenordnung.
Das Sägen hinterläßt auf der Oberfläche Rillen mit einer durchschnittlichen Tiefe von 10 µm und ein zerstörtes Kristallgefüge. Da die vorgesehenen Strukturen eine maximale Rauhigkeit von 10 nm zulassen und die Störungen im Kristallgitter zu Veränderungen im Leitungsmechanismus führen, sind nach dem Sägen die Prozesse Läppen und mechanisches oder chemisches Polieren (Politurätzen) erforderlich.
Das Läppen erfolgt in speziellen Einrichtungen mit einer sehr feinkörnigen Schleifpaste bis zur Tiefe der rillenförmigen Sägespuren. Der darauffolgende Politurprozeß dient der Beseitigung der in der Oberfläche eingelagerten Siliziumbruchstücke und der Freilegung des ungestörten Kristallgefüges. Eine abschließende Spülung mit fließendem, destilliertem und entionisiertem Wasser beseitigt die Ätz- oder Poliermittelreste.
Beim Ätzen tritt häufig, vor allem bei größeren Ätztiefen in der Größenordnung von etwa 10 µm, eine Welligkeit der Oberfläche in Erscheinung, die sich bei der Herstellung der Schaltkreisstrukturen nachteilig bemerkbar macht. Eine vollkommene Lösung dieses Problems ist bisher auch durch speziellere Verfahren, bei-

spielsweise eine Kombination des Läppvorganges mit einem elektrolytischen Ätzprozeß, noch nicht gelungen.
Wesentliche Vereinfachungen für die Herstellung der Grundscheiben könnten sich aus einer Entwicklung ergeben, die auf bandförmig gezogene Einkristalle hinzielt. In der Literatur wird bereits von einer Streifenbreite von etwa 20 mm und verhältnismäßig großen Längen berichtet. Auch hier macht sich jedoch z. Z. die Welligkeit der Oberfläche und zudem eine sehr geringe Ziehgeschwindigkeit nachteilig bemerkbar.

Epitaxie

Die vom gezogenen Einkristall abgetrennten Siliziumscheiben weisen den bei der Dotierung eingestellten Leitungstyp und spezifischen Widerstand auf und sind unter der Voraussetzung einwandfrei geführter technologischer Prozesse als weitgehend homogen zu betrachten. Bei der Herstellung von Festkörperschaltkreisen werden jedoch neben derartigen Substraten sehr viele Substrate benötigt, bei denen in verschiedenen Schichten oder in verschiedenen Teilen einer Schicht ein abweichender Leitungstyp oder spezifischer Widerstand erforderlich sind.
Es wäre möglich, die in Betracht kommenden Schichten oder Zonen eines geeigneten Substrats durch Diffusion nach- bzw. umzudotieren. Dabei ist jedoch eine homogene Störstellenverteilung kaum zu erreichen, andererseits ein erheblicher Zeitaufwand notwendig. Diese Tatsachen haben zu einem Verfahren geführt, bei dem auf einer vorgegebenen Siliziumscheibe eine einkristalline Siliziumschicht aufwächst, welche die gleiche Kristallorientierung hat wie das Grundmaterial. Dieses unter dem Namen Epitaxie bekannte Verfahren beruht auf der thermischen Reduktion von Siliziumhalogeniden in einer Wasserstoffatmosphäre. Dazu werden die Siliziumscheiben in einem induktiv beheizten Quarzrohrofen auf eine Temperatur zwischen 950 und 1400 °C erhitzt und mit der gasförmigen Siliziumverbindung in Berührung gebracht. Die gewünschte Dotierung erfolgt durch die Beimengung von Donator- bzw. Akzeptorstoffen, wie Bor oder Phosphor, in einer geeigneten chemischen Form zu dem über die Si-Scheiben streichenden Gasstrom aus Si-Halogeniden und Wasserstoff.

3.2.3. Diffusionstechnologien

Neben der Dotierung unmittelbar während der Materialaufbereitung im Zusammenhang mit dem Ziehprozeß und der Epitaxie, wo ganze Schichten mit einer bestimmten Störstellenkonzentration aufwachsen, ist die Diffusion eine weitere Möglichkeit zur gezielten Veränderung der Störstellenkonzentration in einem Siliziumkristall. Während bei der Kristallaufbereitung ein homogenes Substrat eines bestimmten Leitungstyps und spezifischen Widerstandes entsteht und die Epitaxie, ausgehend von einem derartigen Grundsubstrat, die Herstellung gleichmäßig dotierter Schichten gestattet, wird die Diffusion vor allem für örtlich verhältnismäßig scharf begrenzte Dotierungen benutzt. Im Gegensatz zur homogenen Störstellenverteilung bei den beiden anderen Verfahren ist bei der Diffusion ein ungefähr exponentieller Abfall der Störstellendichte in Richtung zum Kristallinneren zu verzeichnen. Die Diffusion beruht auf dem Ausgleich der unterschiedlichen Konzentration benachbarter Stoffe. Sie stellt einen Platzwechselvorgang der unter dem Einfluß zugeführter Wärmeenergie im Kristallgitter schwingenden Atome dar. Die Voraussetzungen für den Platzwechsel sind erfüllt, wenn die Bewegung des für den Vorgang in Betracht kommenden Atoms in Richtung der Grenzebene zwischen den sich berührenden Stoffen erfolgt und das Atom thermisch so stark angeregt ist, daß es die Bindungskräfte, welche die Atome aneinander fesseln, überwinden kann.
In Festkörpern tritt zu diesen beiden Grundbedingungen in den meisten Fällen noch die Forderung, daß in dem Kristallgitter, in welches die Fremdatome diffundieren sollen, Leerstellen vorhanden sind. Diese Leerstellen entstehen entweder durch eine thermische Fehlordnung infolge Wärmezufuhr als sogenannte Eigenfehlstellen des Kristalls oder als Kristallbaufehler bei der Materialaufbereitung und können im Silizium immer vorausgesetzt werden.
Die Diffusion ist in starkem Maße temperaturabhängig, weil die Beweglichkeit der Atome im Kristallgitter in erster Linie von der zugeführten Wärmeenergie beeinflußt wird. Die Temperatur und die für die verschiedenen Stoffe und Bedingungen festliegenden Diffusionskoeffizienten bestimmen im wesentlichen die Tiefe der Diffusion in Abhängigkeit von der Diffusionszeit. Für eine tech-

nisch nutzbare Diffusion der Donatoren oder Akzeptoren in Silizium sind Temperaturen oberhalb von etwa 1000 °C erforderlich. Bei Raumtemperatur ist im hier interessierenden Rahmen keine Diffusion feststellbar.

Zur Verwirklichung einer p-Leitung werden vorwiegend Bor und Aluminium diffundiert, während für eine n-Leitung Phosphor, Arsen und Antimon in Betracht kommen. Der Diffusionskoeffizent von Bor in Silizium beträgt bei 1200 °C $0{,}52 \cdot 10^{-11}$ cm²/s und bei 1300 °C $1{,}6 \cdot 10^{-11}$ cm²/s. Die entsprechenden Werte für Phosphor sind $0{,}27 \cdot 10^{-11}$ cm²/s und $1{,}1 \cdot 10^{-11}$ cm²/s. Bild 47 gestattet eine Abschätzung der Zusammenhänge zwischen der Eindringtiefe, der Diffusionszeit und der Temperatur. Zeiten von etwa 2 . . . 4 Stunden sind danach bei den üblichen Eindringtiefen und Temperaturen zwischen 1000 und 1300 °C als typisch anzusehen. Der sehr langsam ablaufende und damit verhältnismäßig gut zu beeinflussende Diffusionsprozeß gestattet eine relativ genaue Einhaltung vorgegebener Parameter.

Bei der Anwendung der Diffusion zur Herstellung von Transistoren und anderen Elementen in Festkörperschaltkreisen sind zwei Verfahren zu unterscheiden: die Diffusion mit konstanter Oberflächenkonzentration an Fremdatomen während des Diffusions-

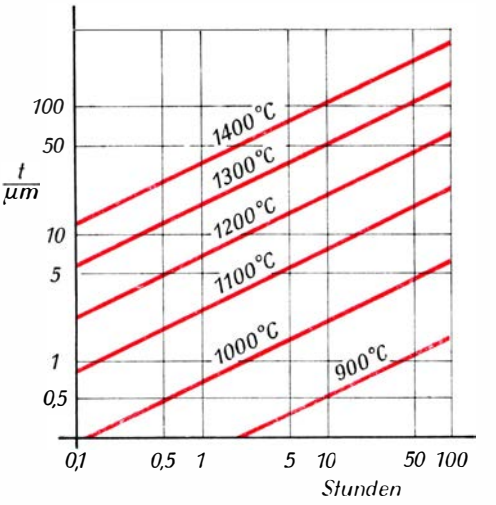


Bild 47
Eindringtiefe von Bor und Phosphor in Silizium als Funktion der Diffusionszeit und der Temperatur

prozesses und die Diffusion mit konstanter Menge der für die Eindiffusion zur Verfügung stehenden Störstellenatome. Die zweite Methode, die als Diffusion mit Vorbelegung bekannt ist, setzt voraus, daß die Fremdatome bei Beginn des Diffusionsprozesses in einer sehr dünnen Schicht an der Substratoberfläche vorhanden sind.

Beiden Verfahren dient üblicherweise ein Quarzrohrofen, wie er in ähnlicher Bauweise für verschiedene Prozesse der Festkörpertechnik eingesetzt wird. Beim erstgenannten Verfahren erfolgt die Diffusion über die Gasphase. Dabei muß der einzudiffundierende Fremdstoff an der Substratoberfläche entweder unmittelbar im gasförmigen Zustand zur Verfügung stehen oder durch ein Trägergas in einer geeigneten Form dahin »gespült« werden. Eine konstante Oberflächenkonzentration ist nur bei einer ständigen Nachlieferung von Fremdatomen gewährleistet. Für die zweite Variante besteht zunächst die Notwendigkeit, den einzudiffundierenden Stoff als flächenhafte Quelle an der Oberfläche des Kristalls zu deponieren. Die darin enthaltene anfangs sehr große Menge an Fremdatomen diffundiert im weiteren Verlauf des Prozesses unter dem Einfluß einer Wärmebehandlung in die tieferen Lagen des Substrates (Bild 48).

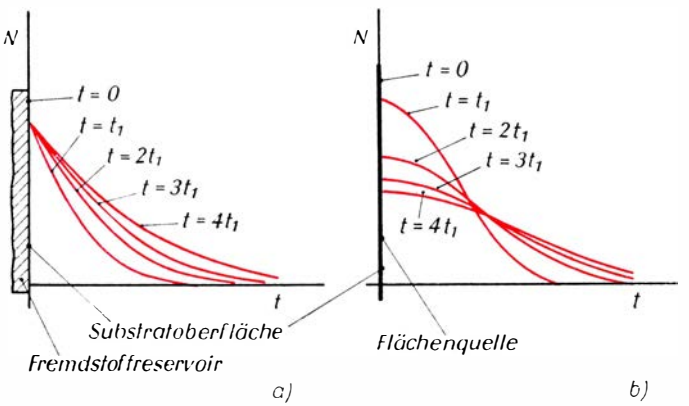


Bild 48. Konzentrationsverlauf bei der Störstellendiffusion für verschiedene Diffusionszeiten
a) bei konstanter Oberflächenkonzentration
b) bei einer vorgegebenen Menge von Fremdatomen an der Substratoberfläche

Bei einer Arbeitsweise mit festen Donatoren- bzw. Akzeptorenquellen finden als Ausgangsverbindungen vorzugsweise Phosphorpentoxid bzw. Bortrioxid Anwendung, während die Phosphorverbindungen PCL_3 oder $POCl_3$ bzw. die Borverbindungen BCL_3 oder BBr_3 üblicherweise als flüssige Fremdatomquellen dienen. Als Trägergas wird meist Stickstoff in einer hochreinen Form durch die flüssigen oder über die sublimierenden festen Quellen geleitet.

An der Front der eindiffundierenden Fremdatome bildet sich in der Ebene, wo durch die eindringenden Atome eine Störstellenkonzentration entsteht, die gleich der Konzentration der Grunddotierung ist, jedoch einen entgegengesetzten Leitungstyp verursacht, eine pn-Grenzfläche. In dieser Ebene neutralisieren sich die elektrischen Wirkungen der Donatoren und Akzeptoren. Neben seiner Bedeutung für die Funktion der Elemente und Schaltkreise kann dieser Effekt, wenn die Konzentration des Ausgangsmaterials bekannt ist, zur Bestimmung der Eindringtiefe genutzt werden. Dazu ist ein Schrägschliff des Substrats notwendig, an dem sich der Abstand des Übergangs von der Oberkante beispielsweise mit Interferenzmethoden ermitteln läßt.

»Selektive« Diffusion über Oxidmasken

Die Diffusion wird bei der Herstellung von Festkörperschaltkreisen vor allem im Zusammenhang mit einer zweckentsprechenden Maskierung zur Dotierung eng begrenzter kleiner Zonen genutzt. In dieser »selektiven« Form ist die Diffusion als Grundtechnologie der Festkörpertechnik anzusehen. Der Maskierung fällt die Aufgabe zu, Substratflächen, deren Grunddotierung unverändert erhalten bleiben soll, gegen eindiffundierende Fremdatome abzudecken. Sie basiert bei der Verwendung von Siliziumsubstraten nahezu ausschließlich auf der bei jeder Wärmebehandlung auf der Substratoberfläche entstehenden Siliziumdioxid-Schicht.

Diese SiO_2-Schicht ist ein wesentlicher Bestandteil der Planartechnologie. Sie zeigt eine gute Haft- und Temperaturfestigkeit, ist chemisch sehr widerstandsfähig und, was in diesem Zusammenhang besonderes Gewicht hat, sie ist für die als Diffusanden in Betracht kommenden Fremdatome verhältnismäßig schwer zu

durchdringen und läßt sich mittels des Fotoätzverfahrens in eine Oxidmaske verwandeln.
Zur Bildung der Oxidschicht werden die Substrate in den bereits mehrfach erwähnten Quarzrohrofen gebracht und auf eine Temperatur von 900 ... 1300 °C erhitzt. Unter der Einwirkung eines über die Scheiben streichenden Sauerstoffstroms oxydieren die Oberflächen zu Siliziumoxid. Nach einer Oxydationszeit von einer Stunde kann bei einer Temperatur von 1050 °C mit einer Dicke der Oxidschicht von etwa 100 nm gerechnet werden. Bild 49 charakterisiert die Zusammenhänge in den interessierenden Bereichen.
Eine wesentliche Steigerung der Wachstumsgeschwindigkeit ist möglich, wenn dem Sauerstoffstrom unter sonst gleichen Bedingungen Wasserdampf zugesetzt wird, ein Effekt, der auf die stärkere chemische Wirksamkeit des bei der Dissoziation des Wasserdampfes an den heißen Scheiben freiwerdenden Sauerstoffs zurückzuführen ist. In einer reinen Wasserdampfatmosphäre erreicht die Oxidschicht nach einer Stunde bei 1050 °C eine Dicke von 600 nm. Bild 50 veranschaulicht die Verhältnisse in der Wasserdampfatmosphäre.
Neben der größeren Wachstumsgeschwindigkeit zeigen die in einer Wasserdampfatmosphäre hergestellten Schichten bei größeren Schichtdicken auch eine bessere Haftfestigkeit als die in einer reinen Sauerstoffatmosphäre erzeugten Schichten.
Die Festlegung der jeweils notwendigen Dicke der Oxidschicht muß im Zusammenhang mit der Dimensionierung des Schaltkreises in Anpassung an die für die Diffusion in Betracht kommenden Fremdstoffe erfolgen. Es ist dabei zu beachten, daß die SiO_2-Schicht den eindiffundierenden Fremdatomen zwar einen erheblichen Widerstand entgegensetzt, jedoch nicht undurchdringlich ist und gegenüber den verschiedenen Fremdstoffen eine unterschiedliche Widerstandsfähigkeit aufweist. Bild 51 gestattet am Beispiel der Diffusion von Phosphor in SiO_2 eine Abschätzung der für verschiedene Diffusionszeiten und -temperaturen notwendigen Schichtdicken. Es läßt sich u. a. daraus ableiten, daß eine SiO_2-Schicht bei einer Dicke von 500 nm und einer Temperatur von 1050 °C den eindiffundierenden Phosphoratomen etwa 90 Minuten widersteht.
Die mit einer Oxidschicht geeigneter Dicke und Struktur ver-

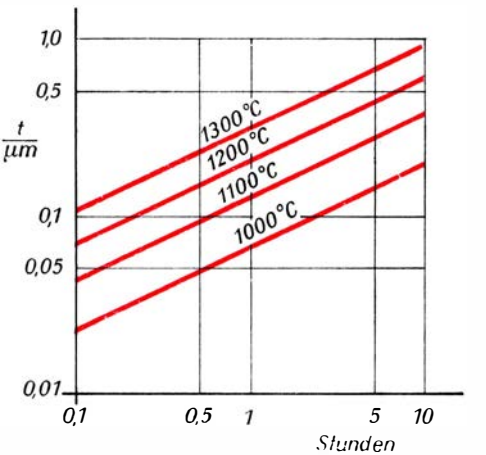


Bild 49. Dickenwachstum der SiO_2-Schicht in reiner Sauerstoffatmosphäre bei Normaldruck

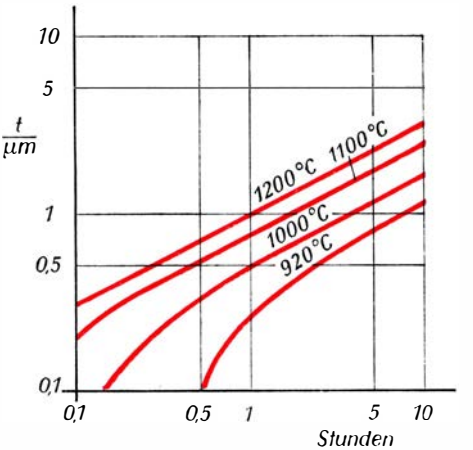


Bild 50. Dickenwachstum der SiO_2-Schicht in reiner Wasserdampfatmosphäre bei Normaldruck

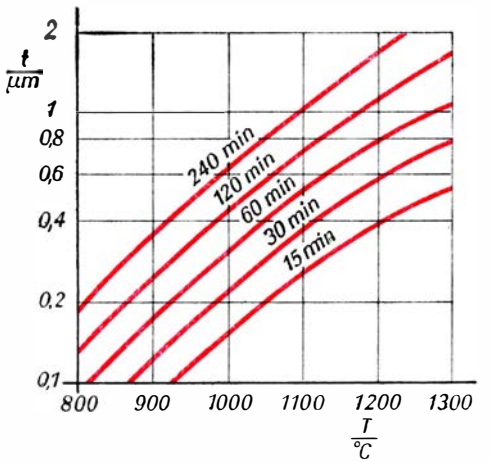


Bild 51. Anwachsen der Diffusionsgeschwindigkeit von konzentriertem Phosphor in SiO_2 in Abhängigkeit von der Temperatur

sehenen Grundscheiben sind nunmehr für die Herstellung der eigentlichen Diffusionsmaske geeignet. Es ist im weiteren Verlauf der Bearbeitung notwendig, die Oxidschicht an den entsprechenden Stellen mit Durchbrüchen zu versehen, um den Fremdatomen Zutritt zum Siliziumsubstrat zu verschaffen. Dazu werden die Scheiben einem Fotoätzverfahren unterworfen, wie es einschließlich der Herstellung der notwendigen optischen Masken (Fotoschablonen) bereits im Zusammenhang mit der Dünnschichttechnik im Abschnitt 2.3.2. beschrieben wurde. Die einzelnen Prozeßschritte für die Realisierung der optischen Maske (Anfertigung einer stark vergrößerten Vorlage — Bild 52 — und schrittweise Verkleinerung auf fotografischem Wege unter gleichzeitiger Vervielfältigung in der letzten Stufe, Ablauf des Fotoätzverfahrens — Beschichtung mit einem lichtempfindlichen Lack, Belichtung über die optische Maske, Entwicklung, Herauslösung der unbelichteten Lackflächen, Ätzung der Maske und Beseitigung der Lackreste) sind im Prinzip unverändert. Abweichungen resultieren durchweg aus den im Mittel wesentlich geringeren geometrischen Abmessungen der einzelnen Schaltkreise. Während bei der Dünnschichttechnik, um dies in Erinnerung zu rufen, Grundschei-

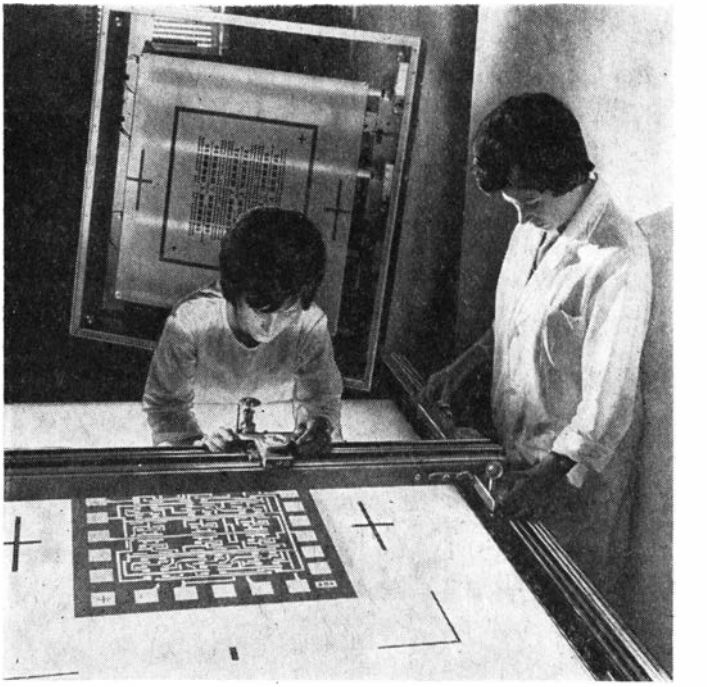


Bild 52. Herstellung der stark vergrößerten Vorlage für die optische Maske auf einem Koordinatografen

ben mit mehreren Zentimetern Kantenlänge üblich sind, die etwa 15 Schaltkreise enthalten, entstehen auf den 25-mm-Siliziumscheiben gleichzeitig einige hundert Festkörperschaltkreise (Bild 53). Diese Verringerung in den Abmessungen, die mit einer wesentlichen Erhöhung der Anzahl der gleichzeitig zu bearbeitenden Schaltkreise verbunden ist, erfordert eine wesentliche Steigerung der Präzision, sowohl hinsichtlich des Auflösungsvermögens der verschiedenen Filme als auch im Hinblick auf die optischen Verfahren.

Die Bedeutung der optischen Einrichtungen wird offensichtlich, wenn man beachtet, daß verschiedene im Schaltkreis enthaltenen Elemente, insbesondere die Transistoren, mehrere zeitlich auf-

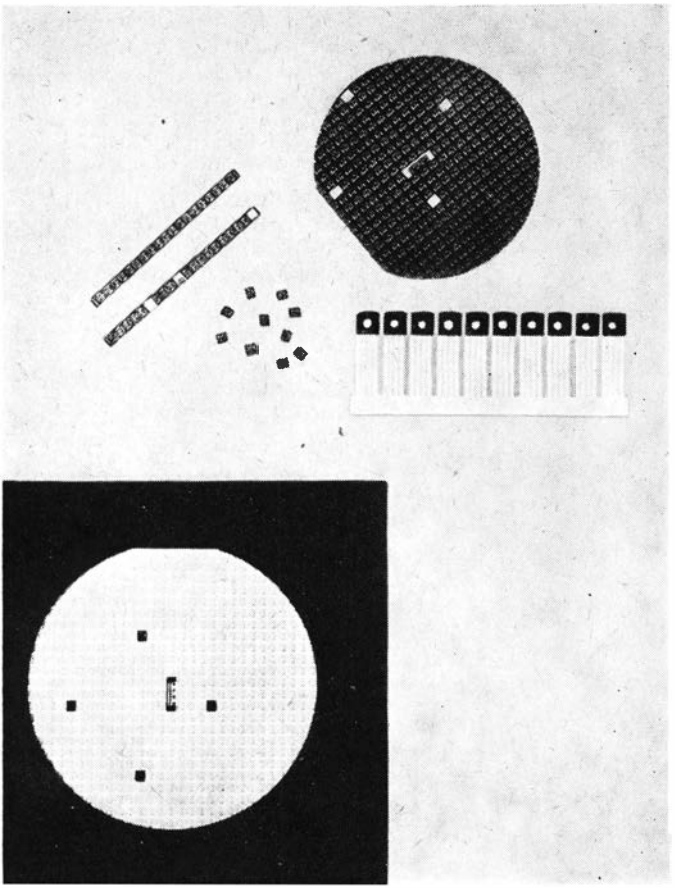


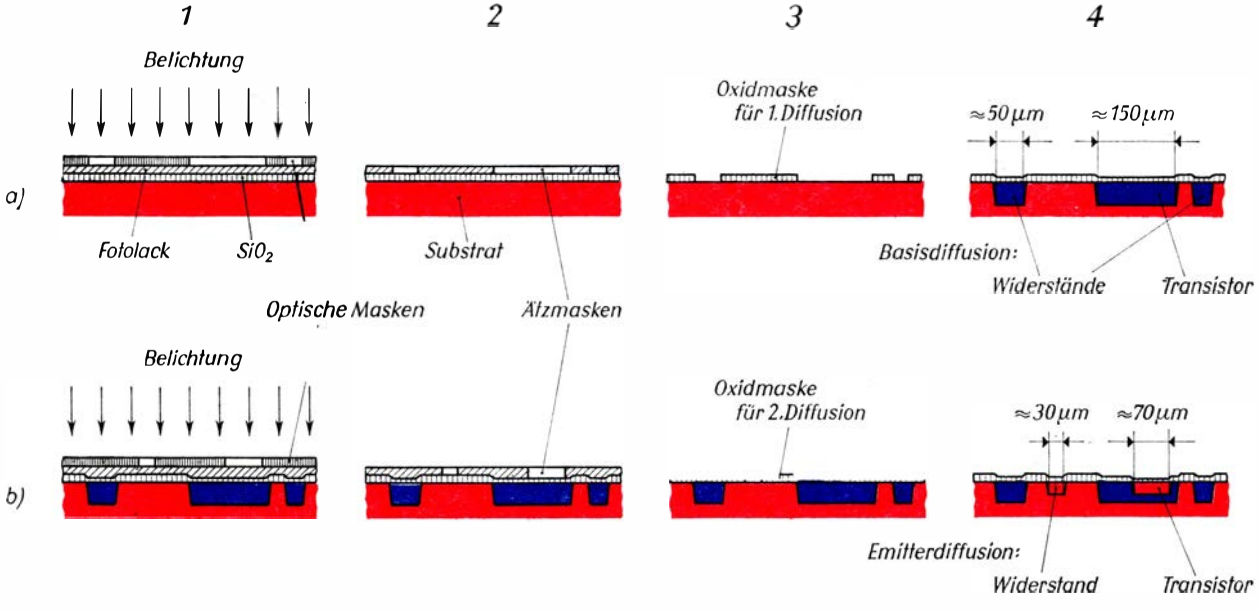
Bild 53. Siliziumscheibe von 25 mm Durchmesser mit etwa 300 Schaltkreisen. Die einzelnen Schaltungen von 1,1 mm × 1,3 mm werden auf ein System von Vaconbändern aufgesetzt, kontaktiert und vergossen. Links im Bild ist die Fotomaske für die Leiterbahnen abgebildet

einanderfolgende Diffusionsschritte erfordern (Bild 54). Für jede dieser Diffusionen wird zur Ätzung der Oxidmaske eine entsprechende optische Maske benötigt. Eine derartige Maske enthält von jedem bestimmten Schaltkreis nur die Elemente, die beim folgenden Diffusionsschritt dotiert werden sollen, muß jedoch diesen »Schaltkreisauszug« insgesamt so viele Male aufweisen, als Schaltkreise auf der Grundscheibe untergebracht werden sollen. Dazu ist es notwendig, eine einmalig angefertigte Vorlage, welche diesen Auszug beinhaltet, mehrere hundert Male nebeneinander auf der optischen Maske abzubilden. Dabei ist zu gewährleisten, und dies ist sicher eine extrem harte Forderung, daß die auf den verschiedenen Masken angeordneten Elemente bzw. Elementeteile mit engsten Toleranzen deckungsgleich sind.

Der Vervielfältigung und Verkleinerung der in starker Vergrößerung gezeichneten Vorlage dient entweder die bereits erwähnte »step and repeat«-Kamera oder eine Kamera mit einer sogenannten Fliegenaugenoptik. Die »step and repeat«- oder Reduzier- und Vervielfältigungskamera ermöglicht die außerordentlich maßhaltige Nebeneinander-Anordnung durch eine mechanische Verschiebung zwischen Film und Linsensystem. Die Fliegenaugenoptik besteht, in gleicher Weise wie das Fliegenauge, aus einer großen Anzahl kleiner Linsen, die eine gegebene Vorlage entsprechend oft abbilden. Damit ist es möglich, alle auf der optischen Maske für eine Grundscheibe erforderlichen Teilbilder mit einer Belichtung zu fixieren.

Da neben den Fehlern der optischen Systeme auch die bei der Positionierung der Siliziumscheiben auftretenden geometrischen Verschiebungen in die an der Oxidmaske in Erscheinung tretenden Fehler eingehen, ist es sicher selbstverständlich, daß auch an die Masken- und Substrathalterungen und die zugehörigen Justiereinrichtungen höchste Anforderungen zu stellen sind.

Im Zusammenhang mit der Herstellung und Anwendung der optischen Masken laufen deshalb intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die beispielsweise in Form der in Gemeinschaftsarbeit der Firmen Carl Zeiss und Telefunken AG. entwickelten Projektionsmaskierung bereits zu einer technologisch interessanten Lösung führten. Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Fotoschablonen nicht mehr direkt als Kontaktkopie auf das Substrat übertragen, sondern im Maßstab 2 : 1 auf die Ober-


1
2
3
4
Belichtung
a)
Fotolack
SiO_2
Substrat
Optische Masken
Ätzmasken
Oxidmaske
für 1. Diffusion
≈50 µm
≈150 µm
Basisdiffusion:
Widerstände
Transistor
Belichtung
b)
Oxidmaske
für 2. Diffusion
≈30 µm
≈70 µm
Emitterdiffusion:
Widerstand
Transistor

fläche des Substrats projiziert. Da derartige Verfahren nicht grundsätzlich von den angegebenen abweichen, kann auf eine nähere Beschreibung verzichtet werden.

Hinsichtlich der Diffusion selbst ist lediglich nachzutragen, daß die durch die Maskenöffnungen in das Substrat diffundierenden Fremdatome keineswegs an den Kanten der Öffnungen angesetzte zylindrische bzw. prismatische diffundierte Zonen erzeugen, wie prinzipielle Darstellungen oft den Anschein erwecken. Die nicht nur senkrecht zur Oberfläche eindiffundierenden Fremdatome verbreitern die Basis und verrunden die Kanten, so daß die Diffusionszonen im wesentlichen einem Pyramiden- bzw. Kegelstumpf mit abgerundeten Kanten ähnlich sind. Die daraus resultierende Verlagerung des empfindlichen pn-Überganges unter die schützende Oxidschicht ist dabei aus der Sicht des elektrischen Verhal-

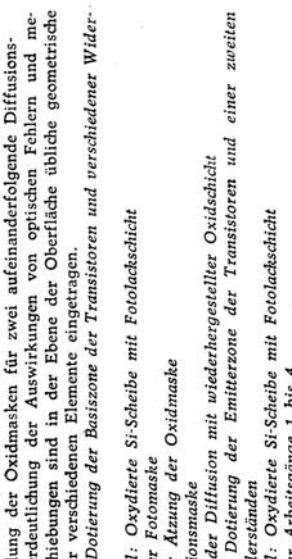


Bild 54. Herstellung der Oxidmasken für zwei aufeinanderfolgende Diffusionsschritte. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen von optischen Fehlern und mechanischen Verschiebungen sind in der Ebene der Oberfläche übliche geometrische Abmessungen der verschiedenen Elemente eingetragen.
a) 1. Diffusion: Dotierung der Basiszone der Transistoren und verschiedener Widerstände
Ausgangsmaterial: Oxydierte Si-Scheibe mit Fotolackschicht
1 Belichtung über Fotomaske
2 Lackmaske zur Ätzung der Oxidmaske
3 geätzte Diffusionsmaske
4 Substrat nach der Diffusion mit wiederhergestellter Oxidschicht
b) 2. Diffusion: Dotierung der Emitterzone der Transistoren und einer zweiten Gruppe von Widerständen
Ausgangsmaterial: Oxydierte Si-Scheibe mit Fotolackschicht
Wiederholung der Arbeitsgänge 1 bis 4

tens der diffundierten Elemente als bedeutender Vorteil anzusehen.
Die Darlegungen im Zusammenhang mit der Herstellung der Oxidmaske und den dazu erforderlichen optischen Einrichtungen haben sicher einen Eindruck von der notwendigen Präzision und Sauberkeit vermittelt. Die gleiche extreme Sauberkeit ist auch bei den unmittelbar der Diffusion dienenden Prozessen eine unabdingbare Voraussetzung. Kleinste Veränderungen in der Grunddotierung und der Fremdstoffkonzentration, winzigste Staubpartikeln und Verunreinigungen der Ausgangsmaterialien, Kristallfehler und Korngrenzen sowie geringfügige Abweichungen in den Prozeßparametern können die Kennwerte der diffundierten Elemente wesentlich beeinflussen und im nicht seltenen Extremfall zum Totalausfall führen. Oxidreste in den Maskenöffnungen bewirken Änderungen im Diffusionsprofil.
Wenn in diesem Abschnitt die SiO_2-Schicht ausschließlich aus dem Gesichtswinkel der Diffusion hinsichtlich ihrer Eignung als Diffusionsmaske betrachtet wurde, so erscheint es abschließend notwendig, auf eine nicht minder bedeutungsvolle Funktion hinzuweisen. Die sich bei jeder Wärmebehandlung reproduzierende Oxidschicht dient auch der Passivierung der Oberflächen. Sie ist gewissermaßen die Grundlage für die gute Stabilität und hohe Zuverlässigkeit der nach der Planartechnologie hergestellten Halbleiterbauelemente und Schaltkreise. Die Zusammenhänge sind im Abschnitt 3.1. erläutert.

3.2.4. Isolationstechnologien

Während bei der Herstellung von Planartransistoren die einzelnen Elemente zwar gemeinsam hergestellt, anschließend jedoch auf mechanischem Wege in Einzelelemente zerlegt und dann getrennt weiterbearbeitet werden, bleiben die zu einem Schaltkreis gehörenden Elemente auch nach der Fertigstellung verbunden. Sie sollen gemeinsam eine bestimmte elektrische Funktion erfüllen. Dazu ist es notwendig, daß sie in bestimmter Weise elektrisch miteinander verbunden werden. Die Voraussetzung dafür ist jedoch zunächst eine gegenseitige Isolation der einzelnen Elemente, denn ohne besondere Maßnahmen in dieser Hinsicht sind alle im Sub-

strat vereinten Elemente über eben dieses gemeinsame Substrat in irgendeiner Form, je nachdem, wie die Zonen verschiedener Leitfähigkeit zufällig aneinander liegen, elektrisch leitend miteinander verbunden.

Im Festkörperschaltkreis sind grundsätzlich zwei Arten der Isolation zu unterscheiden: die Isolation durch eine Sperrschicht und die dielektrische Isolation. Die Sperrschichtisolation grenzt die verschiedenen Elemente eines Schaltkreises durch vorgespannte pn-Übergänge gegeneinander ab, wobei sich die Übergänge durch zweckmäßig angeordnete Dotierungen in gleicher Weise herstellen lassen wie die verschiedenen Zonen der im Schaltkreis enthaltenen Elemente. Die Gemeinsamkeit der Herstellungsprozesse sichert einen homogenen und dadurch ökonomischen Arbeitsablauf.

Im Gegensatz dazu erfordert die dielektrische Isolation in größerem Umfang für den Festkörperschaltkreis zunächst artfremde Prozesse, die teilweise einen beträchtlichen technologischen Mehraufwand erfordern. Sie gewährleistet dabei allerdings Isolationsverhältnisse, die denen in Dünnschichtschaltkreisen oder bei Schaltungsanordnungen in konventionellem Aufbau nicht nachstehen. In dieser Hinsicht haften der Sperrschichtisolation einige Nachteile an.

Alle angewandten Isolationsverfahren zielen auf eine Aufteilung des Substrats in gegeneinander isolierte Gebiete, in welchen die verschiedenen Elemente einzeln oder in geeigneten Gruppen angeordnet werden können. Herauszuheben sind die Bestrebungen, den Schaltkreis als mechanisch kompakte, gemeinsam zu behandelnde Einheit zu erhalten. Eine Abtrennung einzelner Elemente, wie sie beispielsweise bei der Multichip-Technik praktiziert wird, bringt durch die äußeren Verbindungen und die damit verbundenen Arbeitsgänge einen bedeutenden ökonomischen Mehraufwand.

Sperrschichtisolation

Bei der Herstellung von Festkörperschaltkreisen werden drei Arten der Isolation durch pn-Übergänge angewandt, die sich im wesentlichen nur durch die eingesetzten technologischen Verfahren unterscheiden. Alle drei nutzen den hohen Widerstand eines

in Sperrichtung gepolten pn-Überganges, also einer sperrgepolten Diode (Bild 55). Für die Einstellung der Sperrpolung ist eine Vorspannung erforderlich, die so bemessen sein muß, daß der gewünschte elektrische Zustand auch bei den ungünstigsten Betriebsverhältnissen aufrechterhalten bleibt. Der bei der Diode zu beobachtende Sperrstrom ist bei einer zweckentsprechenden Anordnung der verschiedenen Elemente und einer geeigneten Dimensionierung vernachlässigbar, während die Sperrschichtkapazität die Verwendbarkeit derartiger Schaltkreise auch bei günstiger Auslegung auf verhältnismäßig niedere Frequenzgebiete beschränkt.

Eine der angewandten Methoden ist die Herstellung etwa 15 ... 20 µm tiefer n-leitender Wannen in p-leitendem Grundmaterial durch Diffusion (Bild 56). Als Diffusionsmaske dient in der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Weise die Oxidschicht mit fensterartigen Ausätzungen. Ein bedeutender Nachteil dieses Verfahrens liegt in der sich mit zunehmender Tiefe exponentiell verringernden Störstellenkonzentration. Transistoren, die in diesen Wannen angeordnet werden, erhalten dadurch ein hochohmiges Kollektorgebiet und verlieren erheblich an Leistungsvermögen.

Bei einem anderen Verfahren entstehen isolierte n-leitende Ge-

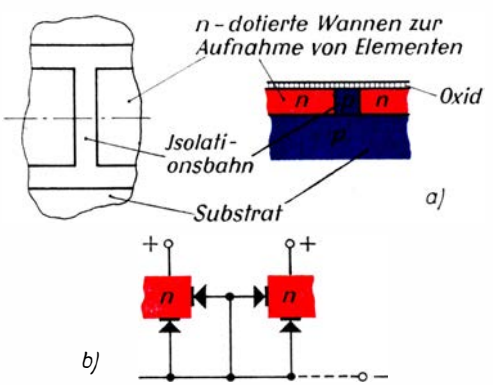


Bild 55. Isolation durch pn-Übergänge
a) prinzipielle Anordnung
b) Ersatzschaltung

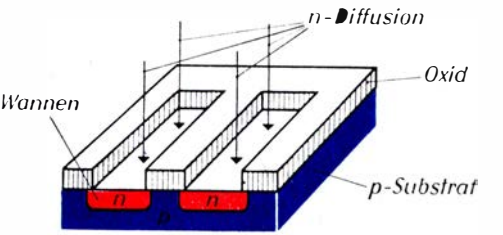


Bild 56. Sperrschichtisolation durch diffundierte n-leitende »Wannen« in einem p-leitenden Substrat

biete dadurch, daß nur diese Gebiete durch eine schützende Oxidschicht abgedeckt sind und die Störatome von allen anderen Punkten der Außenfläche ungehindert in das Substrat diffundieren können. Wenn die Diffusion etwas tiefer als bis zur halben Dicke des Substrats geführt wird, überlappen sich die von der Ober- und der Unterseite eindringenden Fronten, so daß nur unter dem Oxidfilm eine bis zur halben Dicke reichende Zone in der ursprünglichen Dotierung erhalten bleibt (Bild 57). Die Vor- und Nachteile dieser Isolationsmethode sind offensichtlich. Einerseits steht in den Wannen das homogen dotierte Grundmaterial zur Verfügung, andererseits zwingt die Notwendigkeit, bis zur Überlappung der Diffusionsfronten zu diffundieren, entweder zu extrem langen Diffusionszeiten oder zur Verwendung sehr dünner und damit bruchempfindlicher Substrate.

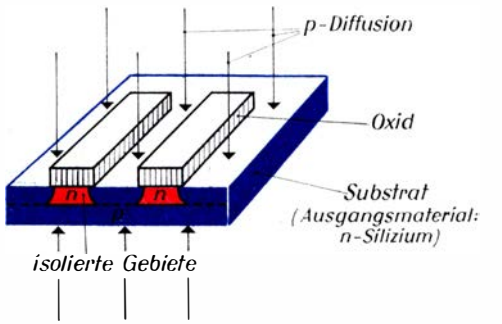


Bild 57. Sperrschichtisolation durch eine allseitige p-Diffusion bei abgedeckten »isolierten Gebieten«

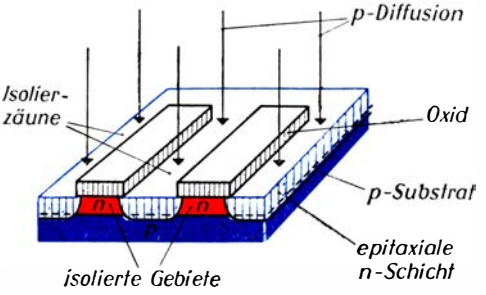


Bild 58. Sperrschichtisolation epitaxial aufgebrachter n-leitender Gebiete mittels durchdiffundierter p-dotierter »Zwischenwände«

Nachdem in der Anfangszeit der Festkörpertechnik nur diese beiden ausschließlich auf der Diffusion fußenden Verfahren zur Verfügung standen, bietet sich seit der Einführung der Epitaxie ein weiteres, in vielen Teilen weit vorteilhafteres Verfahren an. Es beruht auf der Durchdiffusion einer epitaxial auf einer p-leitenden Siliziumscheibe aufgewachsenen n-leitenden Schicht (Bild 58). Dabei wird diese etwa 20 μm dicke Schicht durch eindiffundierte p-leitende Zwischenwände, die bis zum ebenfalls p-leitenden Grundmaterial reichen, in einzelne Gebiete aufgeteilt. Die homogene Dotierung der entstehenden Wannen, die bei der nur geringen Diffusionstiefe verhältnismäßig kurzen Diffusionszeiten und die in diesem Zusammenhang unkritische Dicke der als Ausgangsmaterial dienenden Siliziumscheibe, die eine gute mechanische Stabilität ermöglicht, sind augenfällige Vorteile dieses Verfahrens. Ein hochohmig gewähltes Grundmaterial gewährleistet daüber hinaus minimale Parallelkapazitäten.

Dielektrische Isolation

Die Anwendung von pn-Übergängen zum Zwecke der Isolation ist innerhalb von Festkörperschaltkreisen naheliegend und technologisch sehr vorteilhaft. Das eben beschriebene Verfahren hat deshalb gegenwärtig und auch in Zukunft eine große Bedeutung, solange die Schaltkreise im Bereich niederer Frequenzen eingesetzt werden. Mit wachsender Frequenz bzw. Schaltgeschwindig-

keit beeinflussen die unvermeidlichen und dazu spannungsabhängigen Sperrschichtkapazitäten der pn-Übergänge in zunehmendem Maße das Verhalten der Schaltung, so daß im Interesse einer definiert arbeitenden, sicher beherrschbaren Schaltung ein Übergang zu einer dielektrischen Isolation notwendig erscheint. Derartige Isolationen ermöglichen eine Anwendung von Festkörperschaltkreisen bis in den GHz-Bereich.

Die Anordnungen mit dielektrischer Isolation lassen sich, obwohl bereits bisher zahlreiche Varianten bekannt wurden, grundsätzlich zwei Richtungen zuordnen: der Isolation durch Oxidschichten und der Isolation durch Trennfugen.

Isolation durch Oxidschichten

Die Isolationstechnik mit SiO_2-Schichten (Bild 59), die auch unter dem Namen Quarzwabenisolation bekannt ist, fand bisher die

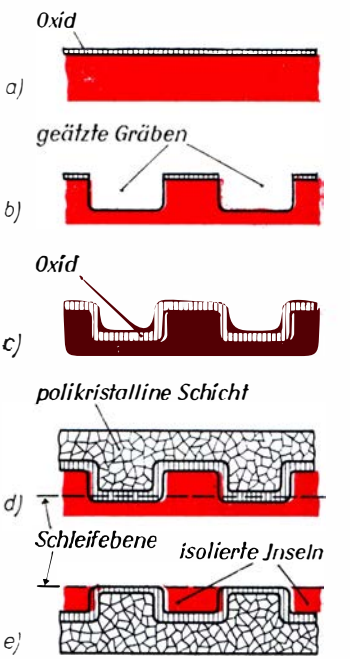


Bild 59. Herstellung der Isolation durch Oxidschichten
a) Siliziumscheibe (mit SiO_2-Schicht)
b) nach Ätzung der „Gräben"
c) nach Herstellung der Isolationsschicht
d) nach Aufbringen einer Schicht aus polykristallinem Silizium
e) Substrat mit isolierten, einkristallinen Inseln nach dem Abschleifen der Reste der Siliziumscheibe

weiteste Verbreitung. Die Ausgangsbasis bilden auch hier Siliziumscheiben, die, falls dies erforderlich ist, eine epitaxial aufgewachsene Schicht aufweisen können. In diese Scheiben werden mittels eines Fotoätzverfahrens an den Stellen, wo sich später Trennwände befinden sollen, »Gräben« geätzt. Danach erhalten sie im Verlauf einer Wärmebehandlung in einer oxydierenden Atmosphäre eine dicke SiO_2-Schicht. Diese Oxidschicht bildet die Grundlage für eine etwa 200 ... 300 µm dicke polykristalline Siliziumschicht, welche später die Funktion des Substrats übernimmt und dem Schaltkreis als mechanischer Träger dient. Ein abschließender Schleifprozeß trägt das Ausgangsmaterial bis auf die Oxidschicht in den anfangs geätzten Gräben ab und hinterläßt oxidisolierte einkristalline Inseln in einem polykristallinen Substrat.

Die Herstellungskosten liegen bei dieser Art der Isolation gegenüber den Diffusionsverfahren z. Z. verhältnismäßig hoch. Da sie jedoch neben den sehr geringen parasitären Kapazitäten auch die Möglichkeit bietet, bei geringem zusätzlichem Aufwand leistungsfähige Transistoren unterschiedlicher Schichtfolgen innerhalb eines gemeinsamen Substrats anzuordnen, ist mit einer wachsenden Bedeutung zu rechnen.

Isolation durch Trennfugen

In dieser Gruppe kommt nach dem augenblicklichen Stand den einkristallinen Siliziuminseln auf Saphirsubstraten und der beam-lead-Technologie die größte Bedeutung zu. Daneben wird in der Literatur über eine Reihe von Verfahren berichtet, bei denen die einzelnen Elemente eines Schaltkreises in einer gemeinsamen Siliziumscheibe realisiert, danach in dieser Scheibe auf einen Glas- oder Keramikträger aufgekittet und anschließend bis auf die zwischen Träger und Siliziumscheibe liegende Oxidschicht freigeätzt werden. Beim sogenannten »air-oxid«-Verfahren sind die Verbindungsleitungen freitragend angeordnet, während sie bei anderen Methoden vor dem Aufkitten aufgedampft und dem Träger zugewandt in den »Kitt« eingeschlossen werden. Während die Dicke der SiO_2-Schichten wenige Mikrometer nicht übersteigen darf, sind theoretisch beliebig breite Trennfugen herstellbar, so daß diese

Art der Isolation eine weitere Verringerung der Streukapazitäten ermöglicht.
Anordnungen mit epitaxial auf Saphirsubstraten aufgewachsenen einkristallinen Siliziumschichten, welche durch Ätzen oder durch Elektronenstrahlfräsen in kleine Inseln zerlegt werden können, eignen sich vor allem zur Herstellung von Mikrowellenschaltkreisen, da Saphir bis zu höchsten Frequenzen ein sehr gutes Dielektrikum darstellt. Etwas nachteilig wirkt sich bei der Herstellung der elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen die nicht ebene Oberfläche aus.
Bei der beam-lead-Technologie entstehen die verschiedenen Elemente zunächst wiederum innerhalb einer gemeinsamen, auf der Oberfläche oxydierten Siliziumscheibe. Durch Fenster in der Oxidschicht erfolgt über geeignete Zwischenschichten die Kontaktierung mit einem über der Oxidschicht und den Zwischenschichten liegenden Goldfilm. Nach einer galvanischen Verstärkung dieses Goldfilms werden die nicht genutzten Teile des Siliziumsubstrats sowie die in Zwischenprozessen entstandenen Schichten außer den unter den Goldfilmen liegenden durch Ätzungen abgetragen, so daß der beam-lead-Schaltkreis im Endeffekt nur noch aus den gleichzeitig für den mechanischen Zusammenhalt verantwortlichen elektrischen Verbindungen und den frei dazwischen angeordneten Elementen besteht. Auch diese Form der Festkörperschaltkreise eignet sich sehr gut für den Einsatz bei hohen Frequenzen. Einzelne in dieser Form hergestellte Transistoren lassen sich ebenso wie komplette Schaltkreise vorteilhaft in Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreisen einsetzen.

3.3. Elemente im Festkörperschaltkreis

3.3.1. Aktive Elemente

Transistoren

Im Festkörperschaltkreis finden vorzugsweise Transistorelemente Verwendung, wie sie sich mit dem gleichen Aufbau und nahezu den gleichen Eigenschaften unter der Bezeichnung Planar- bzw.

Planar-Epitaxial-Transistoren als diskrete Bauelemente seit längerer Zeit allgemein durchsetzten. Es wurde bereits mehrfach betont, daß der Festkörperschaltkreis insgesamt als Nutzer der bei der Herstellung dieser Transistoren erstmalig angewandten und erprobten Technologie anzusehen ist.

Die Herstellung planarer Transistorstrukturen erfolgt im Zusammenwirken von Fotoätzverfahren und Diffusionstechnik in der im Abschnitt 3.2.3. dargestellten Weise. Es ist dabei notwendig, die beschriebenen Prozesse (s. Bild 42) mehrfach zu wiederholen, d. h. eine sogenannte Mehrfachdiffusion anzuwenden. Der erste Diffusionsschritt dient der Realisierung der Basiszone. Nach den erforderlichen Ätzungen ist dazu eine Diffusion von Fremdstoffen, die zu einer p-Leitung führen, wie beispielsweise Bor, erforderlich. Im zweiten Schritt erfolgt, wiederum im Anschluß an die Freiätzung der entsprechenden Oberflächen, die Diffusion der Emitterzone. Dabei bewirken die zugeführten Fremdstoffe, vorzugsweise Phosphor, eine n-Leitung dieser Zone.

Voraussetzung für die erwähnten Schritte ist ein Substrat geeigneter Dotierung, welches in den meisten Fällen eine epitaxial aufgewachsene Schicht aufweist. Hinsichtlich des Leitungstyps muß die Dotierung der Schichtfolge des vorgesehenen Transistors angepaßt sein und bei Anwendung einer Sperrschichtisolation gegebenenfalls auch der Isolation dieses Transistors gegen die anderen im Schaltkreis enthaltenen Elemente Rechnung tragen. Im Hinblick auf den spezifischen Widerstand ist die Fremdstoffkonzentration normalerweise so bemessen, daß dieser Widerstand im Grundmaterial bei $5 \ldots 10\ \Omega$ cm und bei epitaxialen Schichten zwischen 0,1 und 0,5 Ω cm liegt. Die Dicke aufgewachsener Schichten beträgt etwa $10 \ldots 30\ \mu$m.

Die Bilder 60 und 61 sowie Bild A 1 (s. Farbtafeln) sollen einen Eindruck vom Aufbau und den Abmessungen eines integrierten Transistors vermitteln, wobei auf die Charakterisierung der verschiedenen Zonen besonderer Wert gelegt wurde. Die in Bild 61 gezeigte Geometrie ist als einfachste Form anzusehen, wird jedoch in breitem Rahmen genutzt. Daneben finden für die verschiedensten Zwecke Anordnungen Verwendung, die durch speziellere Emitterformen, doppelte Basiskontaktierungen und das Element umschließende Kollektorkontakte u. a. den verschiedensten Anforderungen angepaßt sind.

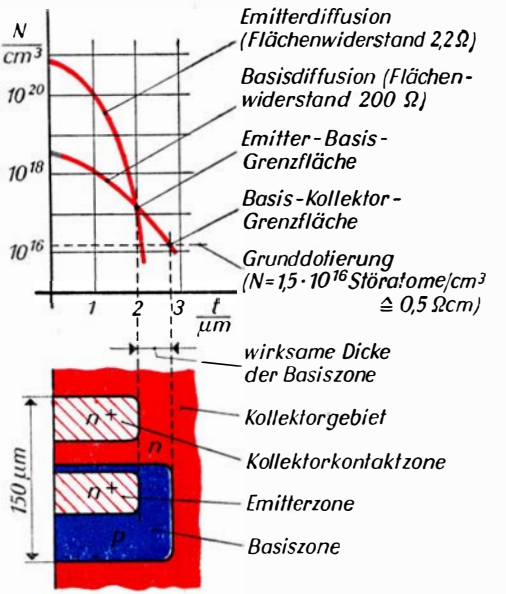


Bild 60. Querschnitt durch einen npn-Planartransistor mit dem Konzentrationsprofil der Störstellen

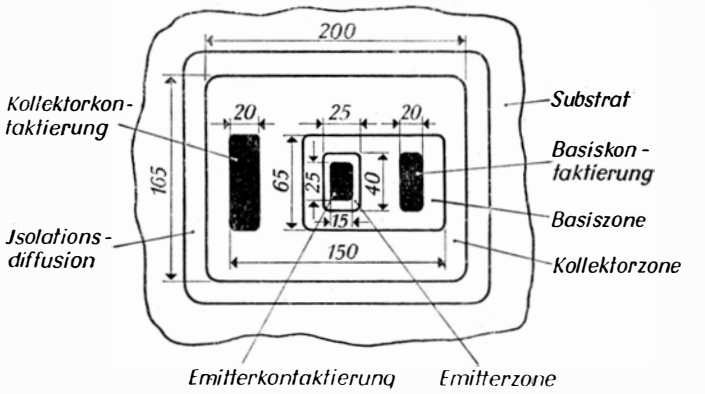


Bild 61. Geometrie eines einfachen integrierten Transistors (Abmessungen in µm)

Einschränkungen in den Kennwerten der in Festkörperschaltkreisen angeordneten Transistoren resultieren aus dem zur Oberfläche geführten Kollektoranschluß. Während der Kollektor bei diskreten Transistoren unmittelbar am Gehäuseboden bzw. an der Kollektorfahne kontaktiert werden kann, wobei nur die Dicke der Kollektorzone als Bahnwiderstand in Erscheinung tritt, entsteht beim Transistorelement im Schaltkreis eine bedeutend längere Bahn zwischen dem Kollektorbasisübergang und der Kontaktierung. Unter der Voraussetzung gleicher Abmessungen und gleichen spezifischen Widerstandes ergibt sich daraus ein wesentlich höherer Kollektorserienwiderstand, als er bei diskreten Elementen üblich ist. Eine Verringerung dieses Widerstandes durch eine dickere oder stärker dotierte Kollektorzone ist möglich, erhöht jedoch die meist ohnehin schon recht großen Streukapazitäten zum Substrat und zieht im Falle des stärker dotierten, also niederohmigen Materials eine Verringerung der Durchbruchspannung nach sich.

Da eine Erhöhung der Streukapazität wegen der damit verbundenen Verschlechterung der dynamischen Kennwerte des Transistors im allgemeinen ebenso wenig tragbar ist wie ein großer Kollektorbahnwiderstand, werden leistungsfähige Transistoren dieser Bauart durch sogenannte vergrabene Schichten verwirklicht. Bild 62 veranschaulicht die Anordnung der Schichten und

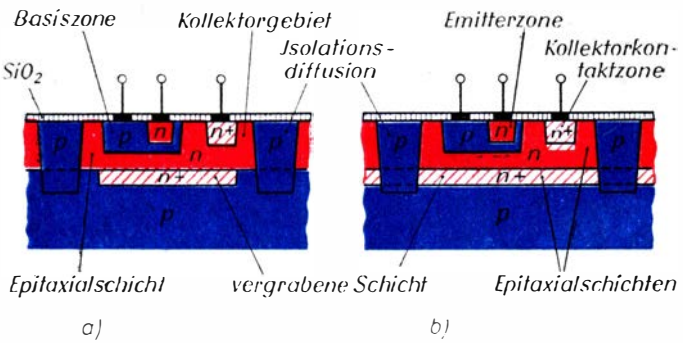


Bild 62. Integrierter Transistor mit »vergrabener« Schicht und stark dotierter Kollektorkontaktzone
a) Anordnung mit diffundierter n^+-Schicht
b) Anordnung mit epitaxial aufgewachsener n^+-Schicht

Tabelle 10. Kennwerte integrierter Transistoren

Kennwert	Emittergröße				Einheit
	25 × 38		76 × 76		µm²
Durchbruchspannung U_{CBO}	35				V
Durchbruchspannung U_{EBO}	7				V
Gleichstromverstärkung h_{FE}	bei I_c		bei I_c		
	40	100 µA	40	1 mA	
	80	1 mA	60	10 mA	
Transitfrequenz	550		220		MHz
Kollektor-Basis-Kapazität*	2		7		pF
Emitter-Basis-Kapazität*	2		5		pF
Kollektor-Substrat-Kapazität*	4		10,5		pF
Kollektor-Serien-Widerstand	70		120		Ω

* bei $U_M = 6$ V

die Wirkungsweise. Es ist offensichtlich, daß dergestalt angeordnete niederohmige Gebiete die Verwirklichung von Transistordaten (Tab. 10) ermöglichen, die denen diskreter Elemente nicht wesentlich nachstehen. Die vergrabene Schicht wird entweder vor dem Aufbringen der epitaxialen Schicht für die Kollektorgebiete in das Grundsubstrat diffundiert (Bild 62a) oder als zweite epitaxiale Schicht vor der Kollektorschicht aufgebracht (Bild 62b). Die Kollektorkontaktzone entsteht üblicherweise in einem Arbeitsgang mit der Emitterzone. Sie gewährleistet einen guten ohmschen Kontakt zu den die Elemente des Schaltkreises verbindenden Aluminiumleiterbahnen.

Feldeffekttransistoren

Neben den bisherigen Transistoren, deren Besonderheiten im Zusammenhang mit der Integration im Festkörperschaltkreis im vorstehenden Abschnitt betrachtet wurden, setzen sich in zunehmendem Umfange auch Feldeffekttransistoren durch. Da sie sich mit den gleichen Technologien herstellen lassen, wie sie für die

Verwirklichung der verschiedensten Elemente allgemein üblich sind, fügen sie sich in einer planaren Bauform homogen in den Festkörperschaltkreis ein. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, daß die Bewegung der Ladungsträger bei diesen Elementen im wesentlichen parallel zur Oberfläche erfolgt, so daß sie als ausgesprochen ebene Anordnungen anzusehen sind. Probleme, wie sie beim bipolaren Transistor durch die Herausführung des Kollektoranschlusses entstehen, treten bei derartigen Anordnungen nicht in Erscheinung.

Grundsätzlich ist der Feldeffekttransistor als steuerbarer Widerstand aus Halbleitermaterial aufzufassen. Der Widerstand liegt entsprechend Bild 63 als leitender Kanal zwischen zwei Elektroden, die mit Quelle (Source) und Senke (Drain) bezeichnet werden; die Steuerung erfolgt über eine auf diesen Kanal einwir-

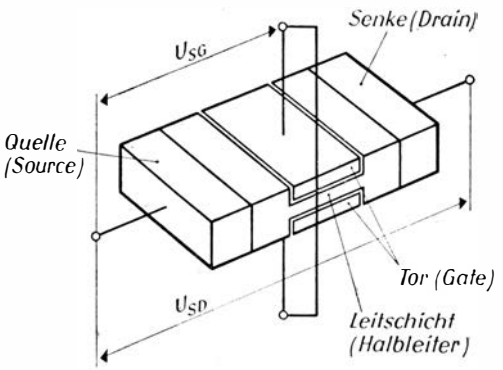


Bild 63. Prinzipielle Anordnung eines Feldeffekttransistors

kende Steuerelektrode, für welche die Bezeichnung Tor (Gate) üblich ist. Im Gegensatz zum bipolaren Transistor, wo Ladungsträger beiderlei Vorzeichens zur Leitung beitragen, beruht der Feldeffekttransistor nur auf der Leitung mit einer Art von Ladungsträgern. Er wird deshalb auch als Unipolartransistor bezeichnet.

Die Eigenschaften des Feldeffekttransistors sind mit denen einer Elektronenröhre vergleichbar. Seine Steuerung erfolgt leistungslos; die Kennlinien zeigen Pentodencharakter (Bild 64).

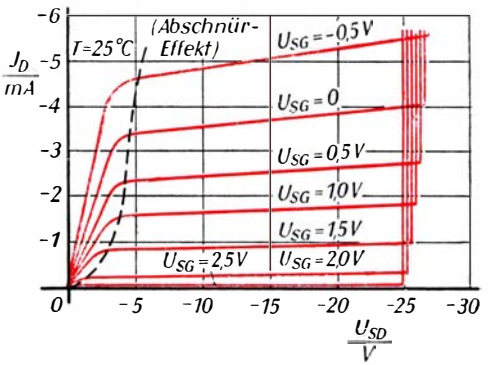


Bild 64. I_D/U_{SD}-Kennlinien des Feldeffekttransistors 2 N 2498

Seine Bedeutung für die Schaltungstechnik beruht auf einer Reihe bemerkenswerter Vorteile. Allgemein bekannt ist der außerordentlich hohe Eingangswiderstand, der beim Sperrschicht-Feldeffekttransistor (FET) bei etwa 10^9 Ω und beim Metall-Oxid-Feldeffekttransistor (MOSFET) zwischen 10^9 und 10^{15} Ω liegt. Nachteilig wirkt sich dabei für HF-Anwendungen die beim FET mit einigen 10 pF recht große Eingangskapazität aus. Günstigere Verhältnisse bietet in diesem Zusammenhang der MOSFET mit einigen Picofarad unter gleichen Bedingungen. Bei diesem Element zwingen der überaus hohe Eingangswiderstand und die geringe Masse des Bauelements zu Maßnahmen, die eine Aufladung der Steuerelektrode und im Extremfall eine Zerstörung vermeiden. Üblicherweise erfolgt eine unmittelbare Kombination mit einer Zenerdiode.
Aus den Kennlinien ist eine gute Übersteuerungsfestigkeit ersichtlich, was diese Transistoren vor allem für HF-Eingangsstufen u. a. interessant macht. Weitere günstige Voraussetzungen für Anwendungen in dieser Richtung sind die geringen Rückwirkungen — der MOSFET ist galvanisch vollkommen entkoppelt — und die gegenüber bipolaren Transistoren recht gute Regelbarkeit. Hinsichtlich der Frequenzabhängigkeit, für die im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit der Ladungsträger beim bipolaren Transistor die Dicke der Basiszone und beim Feldeffekttransistor die Länge der Steuerelektrode in der Richtung des Stromflusses maßgeblich sind, bestehen für den Feldeffekttransistor theoretisch

keine schlechteren Voraussetzungen. Praktisch ausgeführte Transistoren liegen jedoch auf Grund schwer vermeidbarer Streukapazitäten noch weit unter den Möglichkeiten. Wegen der technologisch besser beherrschbaren Länge der Steuerelektrode müssen dem MOSFET z. Z. Vorteile zugebilligt werden.
Neben den bereits erwähnten schaltungstechnischen Möglichkeiten erscheinen das Schaltverhalten und das Rauschen des Heraushebens wert. Bei Schaltvorgängen tritt im Feldeffekttransistor keine Ladungsträgerspeicherung auf; die Schaltgeschwindigkeit wird deshalb ausschließlich durch die Aufladung der Kapazität der Steuerelektrode über den Widerstand des Strompfades bestimmt. Das Rauschverhalten ist im wesentlichen durch das thermische Rauschen des Strompfades festgelegt. Das Rekombinationsrauschen des bipolaren Transistors ist verständlicherweise vollkommen bedeutungslos. Die FET-Typen zeigen ein weit geringeres Rauschen als alle bisher bekannten Transistoren und können auch erfolgreich mit Elektronenröhren konkurrieren; MOSFETs erreichen vor allem bei niederen Frequenzen nicht die am FET beobachteten günstigen Werte.
Nach Aufbau und Wirkungsweise werden grundsätzlich die beiden bereits erwähnten Typen — der Feldeffekttransistor mit sperrschichtisolierter Steuerelektrode (FET) und der Feldeffekttransistor mit oxidisolierter Steuerelektrode (MOSFET) — unterschieden. Eine weitere Unterteilung nach der Schichtfolge und dem Ladungszustand des Strompfades (»Verarmung« oder »Anreicherung«) ist üblich, soll jedoch in diesem Rahmen nicht betrachtet werden.

Sperrschicht-Feldeffekttransistor

Beim FET werden alle Elektroden durch Diffusion im Halbleitersubstrat verwirklicht. Die Technologien weichen dabei nicht von den bei der Herstellung von bipolaren Transistoren angewandten ab. Ebensowenig unterscheiden sich die für die Isolation der verschiedenen Elemente notwendigen Maßnahmen.
Bild 65 veranschaulicht den Aufbau eines Sperrschicht-Feldeffekttransistors am Beispiel eines n-Kanal-Typs. In der n-leitenden Epitaxialschicht, die zum Zwecke der Isolation durch p-Wände

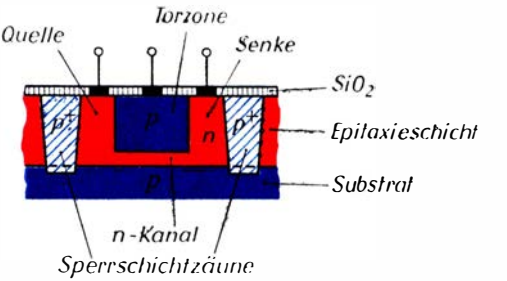


Bild 65
Aufbau eines integrierten n-Kanal-Sperrschicht-Feldeffekt-transistors

abgegrenzt ist, befindet sich die Torelektrode. Der Kanal entsteht mit einer Dicke von etwa 10 µm zwischen dem p-leitenden Grundsubstrat und der Gate-Zone. Da die elektrischen Eigenschaften in starkem Maße von den geometrischen Abmessungen des Kanals abhängen, sind bei der Herstellung engste Toleranzen einzuhalten. Darin liegt eine wesentliche Problematik dieses Transistors überhaupt.
Die Beeinflussung des Elektronenstroms im n-Kanal zwischen Quelle und Senke erfolgt über die Gate-Spannung, die zwischen Quelle und Gate angelegt wird. In Abhängigkeit von dieser Spannung ändert sich die Breite einer ladungsträgerfreien Sperrschicht unterhalb der Gate-Elektrode, so daß der wirksame Kanalquerschnitt und damit der Widerstand des Strompfades gesteuert wird.

Metall-Oxid-Feldeffekttransistor

Beim MOSFET ist die Torelektrode, durch eine dünne Oxidschicht getrennt, auf der Oberfläche des Substrats angeordnet. Sie besteht aus einem dünnen Metallfilm. Unmittelbar unter der Oxidschicht befindet sich zwischen den eindiffundierten Elektroden Quelle und Senke der Kanal. Bild 66 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines derartigen Transistors. Praktisch ausgeführte Typen (Bild 67) haben üblicherweise Kanäle mit einer Länge in der Größenordnung von 10 µm und einer Breite von etwa 100 µm. Die Oxidschicht weist eine Dicke von etwa 100 ... 150 nm auf. Da die Dicke der Oxidschicht und ihr Gehalt an beweglichen Ionen, insbesondere Na-Ionen, die Kennwerte des Elements wesentlich beeinflussen, ist

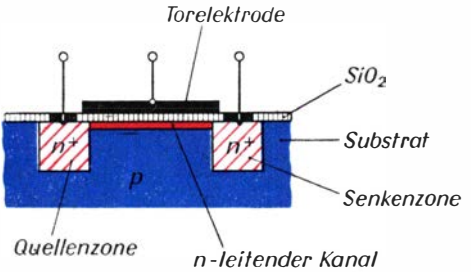


Bild 66
Aufbau eines integrierten MOS-Feldeffekttransistors (mit Leitfähigkeitssteuerung)

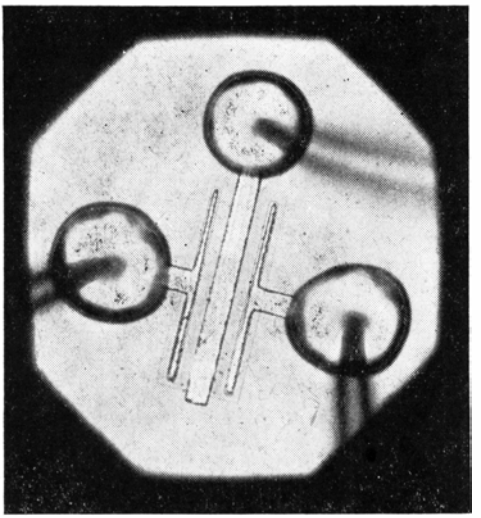


Bild 67
Struktur eines Metall-Oxid-Feldeffekttransistors

sie als kritische Stelle dieses Transistors anzusehen. Der in Bild 66 gezeigte Aufbau ist gekennzeichnet durch ein p-leitendes Substrat, einen n-Kanal und stark n-dotierte Elektroden. In dieser Form kann eine zusätzliche Isolation gegen die anderen Elemente des Schaltkreises wegen der ohnehin entstehenden pn-Übergänge ebenso entfallen wie bei anderen Varianten des MOSFETs, die gegebenenfalls abweichende, jedoch ebenso einfach zu verwirklichende Maßnahmen verlangen. Durch Vermeidung der bei anderen Transistoren notwendigen Isolationswände läßt sich eine

bedeutende Einsparung an Fläche erzielen. In günstigen Fällen — der Kanal entsteht als Oberflächeninversionsschicht ggf. von selbst (s. S. 135) — ist für die Herstellung von MOSFETs nur eine einzige Diffusion erforderlich, woraus neben der Flächeneinsparung auch unmittelbar wirksam werdende günstige ökonomische Parameter resultieren.

Die gegen das Substrat isolierte Torelektrode bietet die Möglichkeit, den Ladungszustand der unmittelbar unter der Oxidschicht liegenden oberen Substratschicht durch Influenz zu beeinflussen. Im gezeigten Beispiel bewirkt eine gegen die Quellenelektrode und damit gegen das Substrat positive Spannung eine Anreicherung mit Elektronen. Infolge dieses Effektes besteht eine Abhängigkeit zwischen der Spannung an der Torelektrode und der Leitfähigkeit eines sich zwischen den Elektroden Quelle und Senke ausbildenden leitenden Kanals. Verständlicherweise erfordert eine Nutzung dieses Effekts eine sichere Beherrschung der Oberflächeneigenschaften von Halbleiterkristallen.

Beim gegenwärtigen Stand der Entwicklung ergänzen die Feldeffekttransistoren die vorwiegend angewendeten bipolaren Transistoren. Da erstere jedoch, vor allem in Form des MOSFETs, neben den schaltungstechnischen Möglichkeiten auch herstellungstechnische Vorteile bieten, ist damit zu rechnen, daß diese Elemente in zunehmendem Maße das Gesicht der Festkörperschaltkreise bestimmen bzw. mitbestimmen werden. Bemerkenswert erscheint in diesem Zusammenhang die Tatsache, daß sich Feldeffekttransistoren auch als Widerstand mit sehr kleinem Flächenbedarf nutzen lassen.

Dioden

Die Dioden gehören nicht zur Gruppe der aktiven Elemente, als pn-Übergänge nutzen sie jedoch einige Effekte und verlangen einige Voraussetzungen in der gleichen Weise wie die Transistoren, so daß es zweckmäßig erscheint, der Anwendung von Dioden in Festkörperschaltkreisen an dieser Stelle einige Beachtung zu schenken. Eine gewisse Zugehörigkeit zu diesem Komplex ist auch dadurch gegeben, daß sowohl die bipolaren (Bild 68) als auch die Sperrschicht-Feldeffekttransistoren aus mehreren pn-

Übergängen bestehen und deshalb in verschiedenen Varianten als Diode genutzt werden können. Darüber hinaus werden die verschiedenen Dioden innerhalb von Festkörperschaltkreisen fast ausschließlich gemeinsam mit den entsprechenden pn-Übergängen der Transistoren hergestellt.

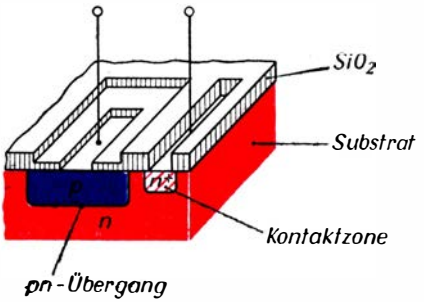


Bild 68
Planardiode in einer für die Anordnung in Festkörperschaltkreisen geeigneten Bauweise

Hinsichtlich der verschiedenen Parameter zeigen Dioden in Festkörperschaltkreisen kein wesentlich anderes Verhalten als entsprechende Elemente im diskreten Aufbau, wobei für die Realisierbarkeit verschiedener Parameter die gleichen Einschränkungen bestehen wie für Transistoren. Wegen der mit der Verwirklichung spezieller Übergänge verbundenen Schwierigkeiten werden spezielle Dioden, wie beispielsweise Tunneldioden, im allgemeinen nicht in Festkörperschaltkreise einbezogen.

3.3.2. Passive Elemente

Widerstände

Widerstände werden in Festkörperschaltkreisen durch eine gezielte Veränderung der Leitfähigkeit eines bestimmten Gebietes des Halbleitersubstrats verwirklicht. Die erforderliche Umdotierung erfolgt üblicherweise mittels einer Diffusion, die Abgrenzung des Gebietes im Verlauf eines vorher notwendigen Fotoätzprozesses. In Bild 69 ist der prinzipielle Aufbau eines diffundierten Widerstandes dargestellt.
Durch eine geeignete Wahl der Diffusionsparameter und der Abmessungen sind die Widerstandskennwerte in einem weiten Bereich variabel und zunächst nur durch die zur Verfügung ste-

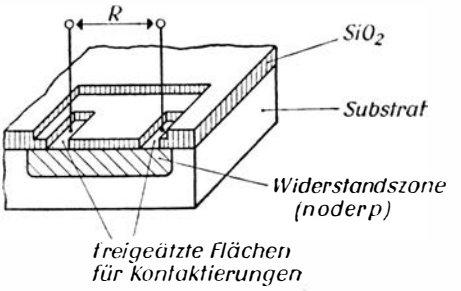


Bild 69
Prinzipieller Aufbau eines diffundierten Widerstandes

hende Substratfläche begrenzt. Da es jedoch notwendig ist, die Widerstände im Interesse einer ökonomischen Fertigung zusammen mit den verschiedenen Zonen der Transistoren zu diffundieren, ergeben sich zusätzliche Einschränkungen hinsichtlich der Störstellenkonzentration und über die Diffusionszeit auch hinsichtlich der Diffusionstiefe. Die bei der Basisdiffusion entstehenden Leitschichten mit einem Flächenwiderstand etwa zwischen 100 und 300 Ω und die bei der Emitterdiffusion anfallenden Flächenwiderstände von einigen Ohm sind normalerweise als Ausgangsbasis für alle Widerstände in Festkörperschaltkreisen anzusehen.
Der auf bestimmte Werte der Störstellenkonzentration und der Diffusionstiefe bezogene Flächenwiderstand

$$R_F = \frac{1}{\bar{\sigma}\, t} = \frac{\bar{\varrho}}{t}$$

$\bar{\varrho}$ mittlerer spezifischer Widerstand

t Diffusionstiefe

$\bar{\sigma}$ mittlere spezifische Schichtleitfähigkeit[1]

wird für diffundierte Widerstände in gleicher Weise als Kennwert genutzt wie für Schichtwiderstände.
Bei Verwendung des Flächenwiderstandes als charakteristischer

[1] Bei homogen dotierten Schichten gilt für alle praktisch vorkommenden Störstellendichten

$$\sigma = e \cdot \mu \cdot N$$

e Elementarladung ($1{,}602 \cdot 10^{-19}$ As)
μ Beweglichkeit der Majoritätsträger
N resultierende Störstellendichte

Widerstandskennwert besteht zwischen dem Wert eines Widerstandes und seinen geometrischen Abmessungen die Beziehung

$$R = R_{\mathrm{F}} \frac{l}{b}$$

l Länge der Widerstandsbahn
b Breite der Widerstandsbahn

Die in den genannten Grenzen festliegenden Flächenwiderstände lassen dabei als freie Größen für die Festlegung eines bestimmten Widerstandswertes nur die geometrischen Abmessungen Breite und Länge.

Von erheblichem Einfluß auf die geometrischen Abmessungen eines Widerstandes sind die zu erwartende Belastung und die bei der Herstellung und Übertragung der Maske auftretenden Maßfehler. Die in Abhängigkeit der Belastung festzulegenden geometrischen Abmessungen hängen im starken Maße von der Wärmeabfuhr und damit von der Anordnung der Schaltkreise in einer geeigneten Verkappung ab. Im Schnitt kann mit einer Belastbarkeit von 200 ... 300 mW/mm² gerechnet werden; bei einer günstigen Gestaltung der Wärmeabführung sind jedoch auch Werte von einigen Watt je Quadratmillimeter erreichbar. Die im Verlauf des Fertigungsprozesses auftretenden Maßfehler, die bei etwa 2 µm liegen, führen bei engen Widerstandstoleranzen zwangsläufig zu breiten, gegen Maßabweichungen unempfindlicheren Widerstandsbahnen und damit zu einer großen Widerstandsfläche.

Neben den Fehlern in der Geometrie tragen auch die Schwankungen in den Diffusionsparametern erheblich zu den Fertigungstoleranzen bei. Eine bei der Diffusion auftretende Temperaturabweichung von 0,4 grd (bei etwa 1200 °C!) bewirkt beispielsweise eine Änderung des Flächenwiderstandes um etwa 10 %. Die Summierung aller im Fertigungsprozeß auftretenden Fehler bedingt bei Widerständen mit einer Bahnbreite von 25 µm Fertigungstoleranzen von etwa ± 20 %, während bei den breiteren 50-µm-Bahnen mit einer Toleranz von ± 10 % gerechnet werden kann. Die relative Toleranz, d. h., die Abweichung, welche im gleichen Arbeitsgang hergestellte Widerstände gegeneinander aufweisen, liegt dabei allerdings im allgemeinen bedeutend niedriger,

in der Größe von wenigen Prozent. Diese Tatsache kann sehr bedeutungsvoll sein.

Bild 70 veranschaulicht typische Formen diffundierter Widerstände. Daneben sind für hochohmige Widerstände auch Mäanderformen üblich. Die mehr oder weniger ausgeprägten Kontaktzonen erfordern bei der Bemessung einen entsprechenden Korrekturwert.

Der Temperaturkoeffizient liegt in Abhängigkeit der Störstellenkonzentration zwischen $+ 100$ und $+ 3000 \cdot 10^{-6}/°C$. Niedriger dotierte Widerstände haben dabei einen höheren und stärker dotierte, niederohmige Widerstände einen geringeren Temperaturkoeffizienten. Im Vergleich zu aufgedampften NiCr-Widerständen muß bei diffundierten Widerständen (Bild 71) mit einem um eine Größenordnung höheren Temperaturkoeffizienten gerechnet werden.

Für die Isolation der Widerstände gegeneinander und gegen andere Elemente im Schaltkreis lassen sich alle im Abschnitt 3.2.4. genannten Verfahren nutzen. Bei Anwendung der Sperrschichtisolation sind der Leitungstyp des Substrats und der Leitungstyp der in Betracht kommenden Transistorzone zu berücksichtigen. Auf Grund der hohen Streukapazität einer derartigen Isolation, die im Zusammenhang mit den Kondensatoren eine nähere Beachtung findet, ergibt sich die in Bild 72 für zwei dem Bild 70a entsprechende Widerstände von 1 und 10 kΩ gezeigte Frequenzabhängigkeit. Die dielektrische Isolation gestattet demgegenüber die Herstellung von Widerständen, die sich bei einer geeigneten Anordnung kaum von diskreten oder in Filmschaltkreisen realisierten Widerständen unterscheiden.

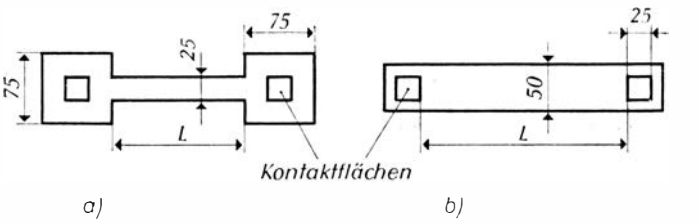


Bild 70. Typische Geometrien diffundierter Widerstände (alle Maße in µm)

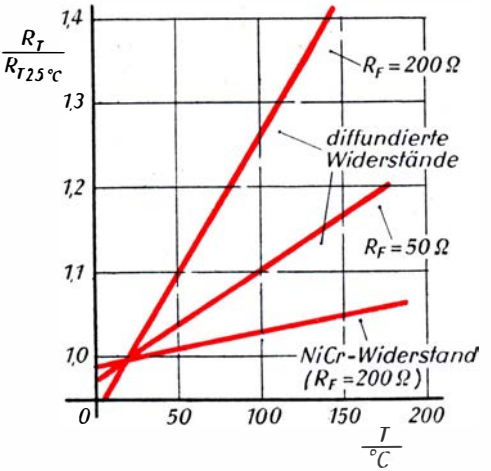


Bild 71. Temperaturverhalten diffundierter Widerstände im Vergleich zu einem typischen Dünnschichtwiderstand
(Herstellung der diffundierten Widerstände durch Bordiffusion in n-leitendes Material von etwa 0,5 Ω cm; Diffusionstjefe etwa 4 µm)

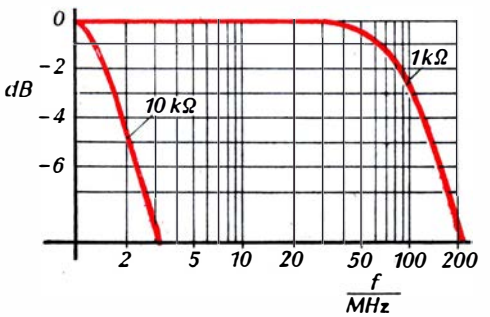


Bild 72. Frequenzcharakteristik typischer diffundierter, sperrschichtisolierter Widerstände

Tabelle 11. Kennwerte diffundierter Widerstände

	Basis-diffusion (p)	Emitter-diffusion (n+)	
Flächenwiderstand	100 ... 300	≈2,5	Ω
Diffusionstiefe	≈3	≈2	µm
max. Widerstand je mm² Substratfläche[1]	80 ... 240	≈2	kΩ
Wertebereich	15 ... 50 000		Ω
Temperaturkoeffizient	+1000 ... +3000	+100	10^{-6}/°C
Verlustleistung je mm² Substratfläche[2]	0,2 ... 4,5		W
max. Betriebsspannung	... 50	... 6	V
Fertigungstoleranz	±20 ... ±10		%
Streukapazität	≈300	≈900	pF/mm²

[1] 25 µm Bahnbreite und 25 µm Zwischenfläche
[2] je nach Wärmeabführung

Tabelle 11 informiert in kurzer Form über die Kennwerte diffundierter Widerstände.

Kondensatoren

In Festkörperschaltkreisen finden zwei Arten von Kondensatoren Verwendung: Sperrschichtkondensatoren und Kondensatoren mit einem SiO_2-Dielektrikum, welche als Metall-Oxid-Kondensatoren bekannt sind. Die Herstellung der Kondensatoren erfolgt aus den gleichen Gründen und in der gleichen Weise wie bei den Widerständen und Dioden nach Möglichkeit unter Nutzung der für die Herstellung der Transistoren notwendigen Arbeitsgänge.

Sperrschichtkondensatoren

Die Sperrschichtkondensatoren verwenden als Dielektrikum die sich auf beiden Seiten eines pn-Überganges bildende Raumladungszone. Die Breite dieser Zone und damit die Dicke des Dielektrikums ist abhängig von der Höhe der am Übergang lie-

genden Spannung. Da durchlaßgepolte pn-Übergänge neben der großen Sperrschichtkapazität und einer noch größeren Diffusionskapazität einen hohen Durchlaßleitwert aufweisen und damit dem Kondensator einen unerträglich hohen Verlustwinkel tan δ verleihen, kommen nur die Sperrschichtkapazitäten sperrgepolter pn-Übergänge als Kondensatoren mit geringem Verlustwinkel in Frage. Die Diffusionskapazität ist in Sperrichtung praktisch gleich Null. Hohe Sperrspannungen bedingen eine breite Raumladungszone mit geringen Kapazitätswerten, niedrige Sperrspannungen ein schmales Dielektrikum und eine hohe Kapazität.
Bild 73 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Sperrschichtkondensators.

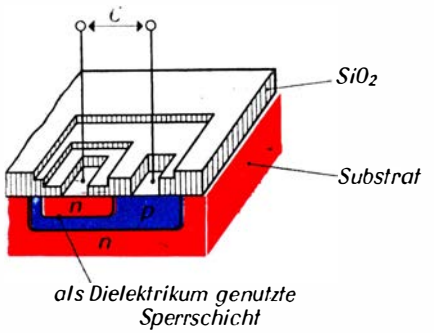


Bild 73
Prinzipieller Aufbau eines Sperrschichtkondensators

Eine Abschätzung der mit derartigen Anordnungen realisierbaren Kapazitätswerte gestattet Tabelle 12. Sie enthält, ausgehend von der Tatsache, daß die Sperrschichten der Kondensatoren zum überwiegenden Teil ohnehin gemeinsam mit den Transistorsperrschichten verwirklicht werden, eine Zusammenstellung der zwischen den verschiedenen Zonen typischer Transistoren je Flächeneinheit auftretenden Kapazitätswerte.
Die Durchbruchspannungen liegen in Übereinstimmung mit den bekannten Spannungen der Transistorübergänge etwa zwischen 6 V für die Emitter-Basis-Sperrschicht und etwa 50 V für die Kollektor-Basis-Sperrschicht.
Wegen der nur schwer niedrig zu haltenden Zuleitungswiderstände weisen Sperrschichtkondensatoren verhältnismäßig hohe Verlustfaktoren auf, die bei mittleren Frequenzen in der Größen-

Tabelle 12. Sperrschichtkapazität je Flächeneinheit für typische Transistoren

	Sperrspannung 0	−2	−5	−10	V	
Kollektor-Basis-Übergang (Kollektorzone mit spezif. Widerstand $\varrho = 0{,}5\ \Omega$ cm)	300		150	100		pF/mm²
Basis-Emitter-Übergang (Basiszone mit Flächenwiderstand $R_F = 200\ \Omega$)	1500	1000	600			pF/mm²
Kollektor-Substrat-Übergang (Substrat mit spezif. Widerstand $\varrho = 5\ \Omega$ cm)	200			50		pF/mm²

ordnung von etwa 0,1 . . . 0,01 liegen. Sie sind deshalb nur in speziellen Anordnungen für HF- und kaum für hochwertige Filteranwendungen geeignet. Darüber hinaus wirkt sich die starke Temperaturabhängigkeit der Parameter für eine Reihe von Anwendungen nachteilig aus. Die Herstellungstoleranzen liegen zwischen $\pm$ 10 und 20 %.

Metall-Oxid-Kondensatoren

Bei den Metall-Oxid-Kondensatoren, die in abgekürzter Form allgemein als MOS-Kondensatoren bezeichnet werden, dient die SiO_2-Schicht auf der Substratoberfläche als Dielektrikum. Diese Schicht ermöglicht — falls sie ideale Eigenschaften aufweist (Ionenfreiheit, Porenfreiheit usw.) — die Realisierung von Kondensatoren mit besseren elektrischen Eigenschaften, als sie mit Sperrschichtkondensatoren erreichbar sind.
Entsprechend der Darstellung in Bild 74 besteht der MOS-Kondensator aus dem bereits erwähnten Oxid-Dielektrikum, einer aufgedampften Metallelektrode und einer stark dotierten, diffundierten Zone als Gegenelektrode. Die Dicke der Oxidschicht hat einen wesentlichen Einfluß auf den Kapazitätswert, während die hohe Störstellendichte in der Gegenelektrode im Interesse eines geringen Serienverlustwiderstandes notwendig ist.

Die elektrischen Eigenschaften geeignet hergestellter MOS-Kondensatoren sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Auch beim MOS-Kondensator sind wie bei den Sperrschichtkondensatoren die Parameter abhängig von der Höhe und der Polarität einer anliegenden Spannung.

Zur Isolation der einzelnen Kondensatoren untereinander und gegen andere im Schaltkreis enthaltene Elemente sind Maßnahmen erforderlich, die im Abschnitt 3.2.4. grundsätzlich behandelt wurden. Alle möglichen Verfahren sind mit parasitären Effekten behaftet, die auch bei anderen Elementen in ähnlicher Weise in Erscheinung treten. Bei Anwendung der Sperrschichtisolation müssen die Isolationsmaßnahmen an den Leitungstyp des Substrats

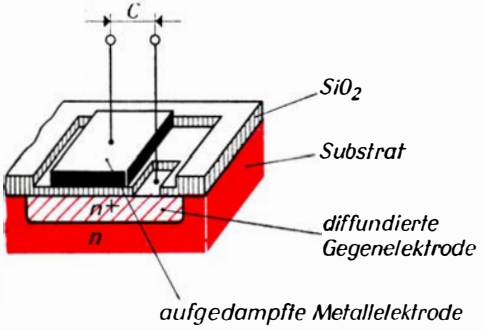
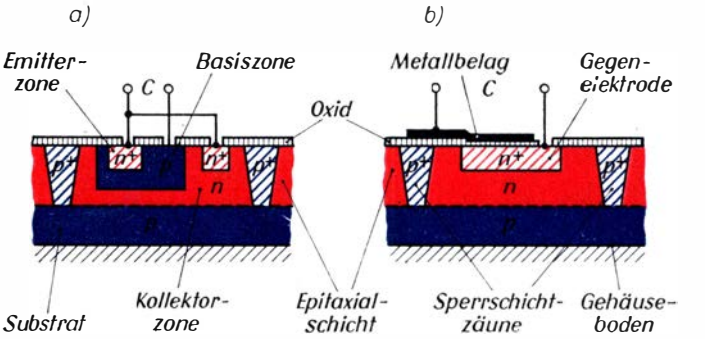


Bild 74
Prinzipieller Aufbau eines MOS-Kondensators

Tabelle 13. Kennwerte von MOS-Kondensatoren

	Dicke der SiO_2-Schicht 0,1 µm	1 µm	
Spezifische Kapazität	400	30	pF/mm²
Temperaturkoeffizient der Kapazität	+ 20 ... + 40		10^{-6}/°C
Verlustfaktor tan δ			
bei 1 MHz	0,7		10^{-2}
bei 10 MHz	2		10^{-2}
Durchbruchspannung	50	200	V
Fertigungstoleranz	± 10 %[1]		

[1] Ein Abgleich auf ± 5 % ist grundsätzlich möglich, jedoch mit hohem Kostenaufwand verbunden



Ersatzschaltungen:

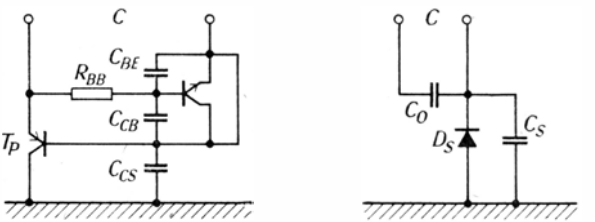


Bild 75. Parasitäre Effekte an sperrschichtisolierten Kondensatoren, die in üblicher Weise in einer n-leitenden Epitaxialschicht hergestellt wurden

a) Sperrschichtkondensator aus den parallelliegenden pn-Übergängen einer Transistorstruktur

b) MOS-Kondensator

Alle Kapazitätswerte liegen in den Größenordnungen, wie in den Tabellen 12 und 13 angegeben

R_{BB} Basisbahnwiderstand
C_{BE} Basis-Emitter-Kapazität
C_{CB} Kollektor-Basis-Kapazität
C_{CS} Kollektor-Substrat-Kapazität
C_O Kapazität über Oxiddielektrikum
C_S parasitäre Kapazität über der isolierenden Sperrschicht
D_S Isolationssperrschicht

und den in Betracht kommenden pn-Übergang angepaßt werden; die dielektrische Isolation gestattet in diesem Zusammenhang wesentlich größere Freiheiten. Während bei der dielektrischen Isolation nur die Streukapazitäten in Erscheinung treten, verlangt die Sperrschichtisolation neben der Berücksichtigung der parasitären Kapazitäten auch eine Beachtung der zwangsläufig entstehenden pn-Übergänge. Bild 75 verdeutlicht die Verhältnisse an zwei typischen Beispielen.

Beide Kondensatoren benötigen im Vergleich zu Transistoren und Widerständen unverhältnismäßig viel Substratfläche. Auf einer Fläche von 1 mm^2, wo sich ohne Berücksichtigung der Zuführungen etwa 25 typische Transistoren oder 40 1-kΩ-Widerstände üblicher Belastbarkeit unterbringen lassen, sind günstigstenfalls etwa 1500 pF in Form eines Sperrschichtkondensators oder 400 pF in Form eines MOS-Kondensators zu verwirklichen. Diese Tatsache führt dazu, daß in Festkörperschaltkreisen lieber kompliziertere Schaltungen in Kauf genommen werden als Kondensatoren.

Induktive Elemente

Durch aufgedampfte Leiteranordnungen lassen sich Induktivitäten in Festkörperschaltkreisen, vor allem wegen der geringen Abmessungen dieser Gebilde und wegen der hohen Verluste, offensichtlich nicht herstellen. Eine Vergrößerung der geometrischen Schaltkreisabmessungen ist aus ökonomischen Gründen ausgeschlossen.

Induktivitäten sind in Festkörperschaltkreisen nur herstellbar, wenn es gelingt, Effekte und Anordnungen zu nutzen bzw. zu finden, welche das zeitliche Nacheilen des Stroms hinter der Spannung auf andere Weise bewirken. Untersuchungen an verschiedenen Halbleiteranordnungen führten auf den pn-Übergang. Bei einer in Durchlaßrichtung betriebenen Diode ist die Voraussetzung für die induktive Komponente der Impedanz das Vorhandensein eines elektrischen Feldes im Bahngebiet und eine für die Leitfähigkeitsmodulation des Bahngebietes ausreichend hohe Minoritätsträgerinjektion. Als Beispiele der Halbleiteranordnungen mit induktivem Effekt sind die pin-Diode, die Vierschicht-

diode, die Doppelbasisdiode, der induktive Transistor und die Feldeffekttetrode u. a. zu nennen.
Die auf diese Weise realisierbaren »Induktivitäten« halten vor allem hinsichtlich der Stabilität keinen Vergleich mit konventionellen Induktivitäten aus. Darüber hinaus sind die geringen Induktivitätswerte von wenigen Millihenry, die geringen Gütewerte und die minimalen Variationsmöglichkeiten als weitere Mängel anzusehen. Mit einer technischen Nutzung ist deshalb zumindest in absehbarer Zeit nicht zu rechnen.
Sind in Geräten bzw. Geräteteilen, die zum überwiegenden Teil mit Festkörperschaltkreisen aufgebaut sind, stabile bzw. größere Induktivitäten oder hochwertige Selektionsmittel erforderlich, so ist es unvermeidlich, an dieser Stelle konzentrierte Selektionsmittel mit mechanischen Schwingern, diskrete Induktivitäten, Dünn- bzw. Dickschichtinduktivitäten oder aktive RC-Netzwerke u. a. in die Schaltung einzubeziehen.

3.4. Verbindungs- und Anschlußtechnik

3.4.1. Verbindungen innerhalb des Schaltkreises

Die verschiedenen im Halbleitersubstrat enthaltenen Elemente wurden bei ihrer Herstellung in der beschriebenen Form gegeneinander elektrisch isoliert; nur in verhältnismäßig wenigen Fällen kommt eine unmittelbare Verbindung unter Nutzung der Leitfähigkeit des Substrats in Betracht. Nach Abschluß der Herstellungsprozesse müssen die einzelnen Elemente deshalb niederohmig und ohne zusätzliche Sperrschichteffekte miteinander verbunden werden (Bild 76). Es ist eine der bedeutsamsten Eigenarten der unter Anwendung der Planartechnologie mit allen Anschlußpunkten in einer Ebene hergestellten Festkörperschaltkreise, daß diese Verbindungen zwischen den Elementen der auf einer Grundscheibe liegenden Schaltkreise gleichzeitig und verhältnismäßig einfach hergestellt werden können.
Der Verbindung dienen fast ausschließlich Leiterzüge aus Aluminium, welche entweder über eine Maske aufgedampft oder mittels des bekannten Fotoätzverfahrens aus einer über die Gesamtfläche aufgedampften Aluminiumschicht herausgelöst werden. Aluminium eignet sich als Leitermaterial vor allem deshalb sehr gut,

weil es mit p- und n^+-leitendem Silizium brauchbare ohmsche Kontaktierungen ergibt und auf SiO_2-Schichten fest haftet. Vor dem Aufdampfen werden an den Stellen, wo eine Kontaktierung mit den einzelnen Elementen erfolgen soll, Fenster in die isolierende Oxidschicht geätzt und damit Zugänge zu den diffundierten Zonen geschaffen. Für die Verbindung des Schaltkreises nach außen enthält das Leitungsmuster an geeigneten Stellen Kontaktfelder.

Die Leiterbahnen werden in einer Dicke zwischen 0,1 und 1 µm aufgebracht und haben eine durchschnittliche Breite von etwa 20 ... 50 µm. Der Flächenwiderstand liegt je nach der Schichtdicke zwischen 0,01 und 0,001 Ω. Bei einer 500 µm langen Leiterbahn mit einer Breite von 50 µm und einer Dicke von 0,5 µm

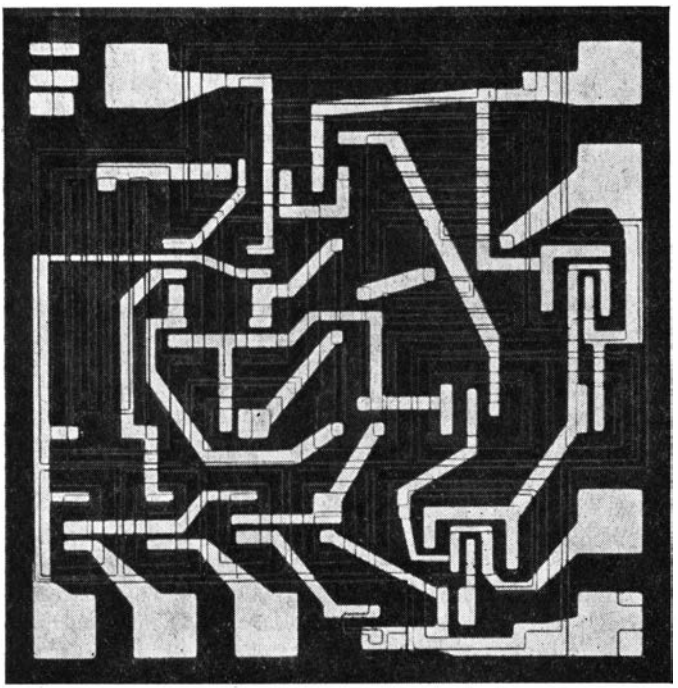


Bild 76. Schaltkreis mit aufgebrachten Leiterbahnen

ist demzufolge mit einem Widerstand von 0,02 Ω zu rechnen. Die SiO_2-Schichten weisen einen hohen Isolationswiderstand auf und führen bei einer Dicke von 1 µm zu einer Kapazität von 25 pF/mm² zwischen Leiterbahn und Substrat. Die erwähnte 50-µm-Leiterbahn hat demzufolge eine Streukapazität von 0,6 pF.
Wie auch in Filmschaltkreisen ist es bisweilen unumgänglich, Leiterzüge zu kreuzen. Wo dies nicht dadurch möglich ist, daß der kreuzende Leiterzug zwischen zwei Kontaktstellen über die oxidgeschützte Oberfläche eines Elements, beispielsweise eines Widerstandes, geführt wird, ist es notwendig, eine spezielle Leitungskreuzung anzuordnen. Als Leitungskreuzung eignet sich eine Struktur, die in allen Teilen einem diffundierten Widerstand gleicht und auch entsprechende Isolationsmaßnahmen erfordert. Die Leitschicht muß dabei sehr niederohmig dotiert sein und sowohl gegen das Substrat als auch gegen die kreuzende Leitung eine geringe Streukapazität aufweisen.

3.4.2. Kontaktierung der Schaltkreise

Die durch aufgedampfte Leiterbahnen in sich geschlossenen Schaltkreise sind bis zu diesem Zeitpunkt noch keine selbständigen Gebilde; sie wurden bisher im Verband der Grundscheibe gemeinsam bearbeitet, weisen jedoch nach der Aufbringung des Leitungsmusters bereits Kontaktflächen als Ausgangspunkte für eine elektrische Verbindung nach außen auf. Wegen der geringen Größe, welche die einzelnen Schaltkreise nach der nunmehr notwendigen Zerlegung der Grundscheibe aufweisen — sie haben, um dies in Erinnerung zu rufen, Kantenlängen von etwa 1 mm —, sind die Kontaktflächen jedoch nur mit Spezialeinrichtungen »beschaltbar«. Aus diesem Grunde und wegen des notwendigen Schutzes gegen mechanische und klimatische Einflüsse ist zunächst der Einbau der einzelnen Schaltkreise in relativ handliche Gehäuse erforderlich. In diesen Gehäusen werden die sehr engen Kontaktabstände auf einen in der Gerätetechnik weiter verarbeitbaren Anschlußraster von 1,25 mm bzw. 2,5 mm oder entsprechende Abstände »transformiert«.
Beim gegenwärtigen Stand finden vorwiegend Flachgehäuse und TO 5-Rundgehäuse Verwendung. Die Verbindung zwischen den Kontaktflächen der Schaltkreise und den Anschlußstiften bzw.

-fahnen dieser Gehäuse erfolgt in den weitaus meisten Fällen durch Drahtbrücken, die mittels der Thermokompression kontaktiert werden (Bilder 77 und 78).
Die Thermokompression beruht auf der Tatsache, daß verschiedene Metalle eine mechanisch relativ feste und elektrisch gut leitende Verbindung eingehen, wenn sie unter bestimmten Bedingungen im erwärmten Zustand zusammengepreßt werden. Bei Verwendung von dünnen Golddrähten mit einem Durchmesser von etwa 7 ... 50 µm entsteht diese Verbindung mit den Aluminiumleiterbahnen bereits bei Temperaturen zwischen 150 und 250 °C und Drücken zwischen 10 und 50 p, wobei die Temperaturen weit unter dem eutektischen Schmelzpunkt und die Drücke erheblich unter denen liegen, die für Kaltschweißverbindungen notwendig sind. Der Andruck erfolgt über schneidenförmige Keile aus rostfreiem Stahl oder Saphir, die Erwärmung über der Auflageplatte und nur selten noch zusätzlich über den Andruckteil. Um die Bildung störender Oxidschichten zu vermeiden, liegen die Substrate in einem Schutzgasstrom.
Eine bevorzugt angewandte Variante der Thermokompression ist die sogenannte Nagelkopf-Kontaktierung („nail head bonding"). Bei diesem Verfahren wird der durch eine Glaskapillare geführte Golddraht unterhalb deren Öffnung mit einer Flamme abgeschmolzen, so daß sich am Ende des Drahtes eine kleine Goldkugel von etwa 50 µm Durchmesser bildet, welche anschließend mit der Kapillare auf die etwa 300 °C warme Kontaktfläche gedrückt wird. Durch die eintretende plastische Verformung entsteht entsprechend Bild 79a der »Nagelkopf« und dabei der erwünschte innige Kontakt zwischen Golddraht und Aluminiumbahn. Nach Abschluß dieses Vorganges wird die Glaskapillare, wie dies in Bild 79 b gezeigt ist, über dem Draht so weit zurückgezogen, daß die frei werdende Drahtlänge bis zu der in Betracht kommenden vergoldeten Gehäuseanschlußfahne oder gegebenenfalls auch einer anderen Kontaktstelle reicht. An dieser zweiten Stelle erfolgt die Kontaktierung ohne Kugel durch ein Andrücken mit der Kante der Kapillare. Ein zweiter Abschmelzvorgang trennt den fortlaufenden Golddraht von der Verbindung und liefert gleichzeitig die Goldkugel für den nächsten Anschluß.
Mitunter, vor allem wenn im Betrieb mit einer hohen Temperaturbelastung gerechnet werden muß und dadurch aus bestimm-

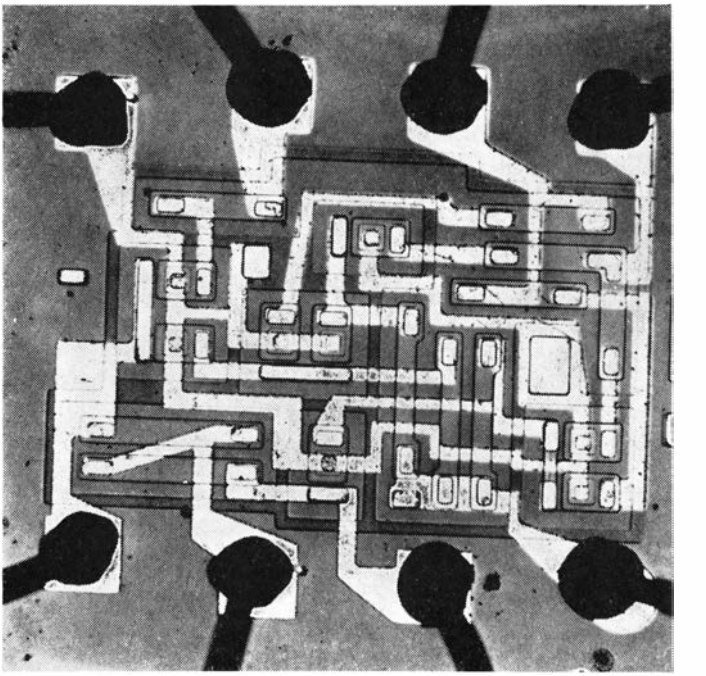


Bild 77. Schaltkreis mit kontaktierten Anschlußdrähten

ten Gründen (»Purpurpest«) eine Zerstörung der Gold-Aluminium-Verbindung zu erwarten ist, finden anstelle der Golddrähte auch Aluminiumdrähte Verwendung. In vielen Fällen wird heute schon statt der Thermokompression auch die bereits im Zusammenhang mit den Dünnschichtschaltkreisen erwähnte Ultraschallschweißung als Kontaktierverfahren genutzt.

Schaltkreisseitig machen sich für die Justierung der Anschlußdrähte gegen die Kontaktflächen wegen der außerordentlich geringen Abmessungen erhebliche Aufwendungen notwendig. Die nur mit dem Mikromanipulator unter dem Mikroskop durchführbaren Arbeiten sind dabei einer Mechanisierung sehr schwer zugänglich und bedingen Kosten, die höher liegen als die bisher bei den automatisierten Arbeitsgängen entstandenen Gesamtkosten.

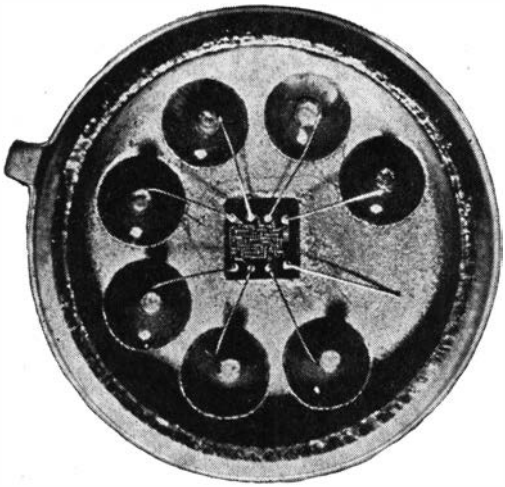


Bild 78
Auflegierter
und kontaktierter
Schaltkreis

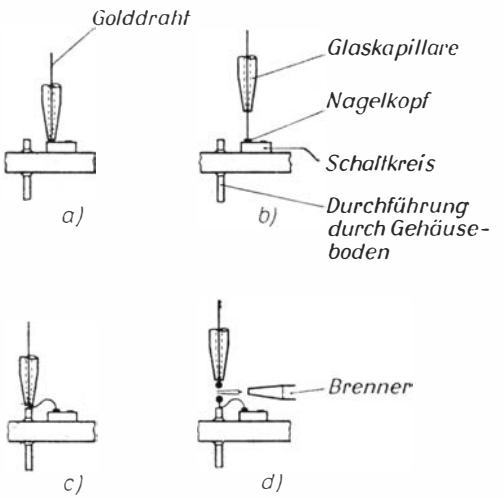


Bild 79
Kontaktierung
durch »nail head
bonding«

Es hat deshalb nicht an Bemühungen gefehlt, anstelle der nur manuell einfügbaren Drähte Verbindungen zu finden, die eine weitgehend automatisch durchführbare, gleichzeitige Kontaktierung mehrerer Anschlüsse ermöglichen. Drei der bisher in kleinerem Umfang erprobten Verfahren lassen Rückschlüsse auf eine mögliche Lösung der Problematik zu: die bereits beschriebene beam-lead-Technologie; eine Kontaktierung über erhabene Kontaktstellen, wie sie für die Einfügung von Chip-Transistoren in Filmschaltkreise genutzt wird, und eine Variante, die auf einer Anordnung der Chips in einem ausgestanzten oder ausgeätzten »Leiterrahmen« beruht.

Die beam-lead-Technologie umgeht die schaltkreisseitige Kontaktierung, da die für die gesamte Grundscheibe gemeinsam aufgebrachten und verstärkten Goldbahnen sowohl der Zwischenverbindung im Schaltkreis als auch der Verbindung nach außen dienen können. Das Einfügen des kompletten, durch Trennfugen isolierten Schaltkreisgebildes (Bild 80) in ein Gehäuse erfordert

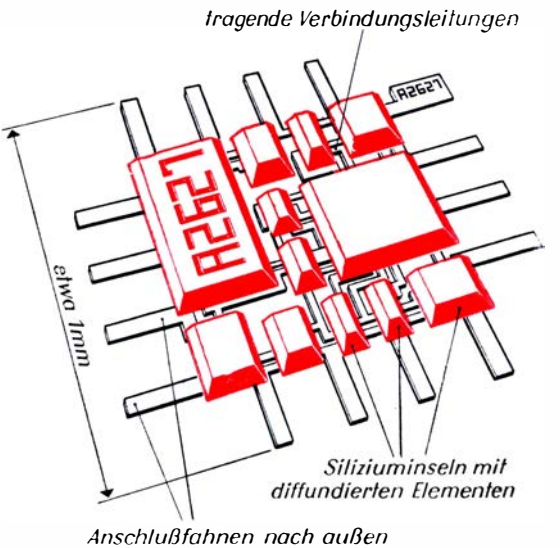


Bild 80. Struktur eines beam-lead-Schaltkreises

lediglich die unkritische Kontaktierung der wenige 100 µm breiten und etwa 10 . . . 20 µm dicken Goldfähnchen an den Gehäusedurchführungen. Die Kontaktierung erfolgt üblicherweise mittels Thermokompression. Da die Realisierung der Leiterzüge auf einem Maskenverfahren basiert, welches enge mechanische Toleranzen ermöglicht, steht einer Mechanisierung des Vorganges und der gleichzeitigen Herstellung mehrerer Kontakte nichts im Wege.
Schaltkreise, welche mit kleinen, exakt positionierten Kontaktstellen der verschiedensten Formen versehen sind, bieten in dieser Hinsicht die gleichen Möglichkeiten. Nach einer Justierung des Chips lassen sich alle Kontakte durch Thermokompression, Ultraschallschweißung oder Löten gleichzeitig herstellen. Die Chipkontakte gehören dabei als Metallflächen entweder unmittelbar zum Leitungsmuster oder sie bestehen aus kleinen mit speziellen Verfahren in Lötzinn eingebetteten bzw. in Kontaktzonen einlegierten Kugeln, welche verzinnt oder durch ein geeignet gewähltes Material in anderer Weise einem bestimmten Kontaktierungsverfahren angepaßt sind. Die zwangsläufige Anordnung der Kontakte auf der Vorderseite des Schaltkreises erfordert beim Einbau der Chips eine Drehung derselben und führt dazu, daß die Kontaktseiten von Chip und Trägerplatte einander zugewandt sind (Flip-Chip-Technik).
Beide Varianten bieten verhältnismäßig ungünstige Voraussetzungen für die Abführung der Verlustwärme, andererseits jedoch gegenüber der Verbindung über Drähte neben der Kostensenkung eine höhere Zuverlässigkeit. Die Verbesserung der Zuverlässigkeit resultiert aus der Verringerung des manuellen Einflusses auf die Kontaktierung und die nur geringe Wärmeabfuhr aus dem schlechten Wärmekontakt über die elektrischen Anschlüsse und gegebenenfalls eine umhüllende Vergußmasse. In einer durch Glasuren geschützten Ausführung eignen sich beide Bauformen für eine gehäuselose Kontaktierung in Filmschaltkreisen.
Die dritte außerordentlich interessante Variante fußt auf einem vorgefertigten »Leiterrahmen«, der beispielsweise die in Bild 81 gezeigte Form aufweisen kann. In diesen Rahmen aus etwa 100 µm dicker Kovarfolie wird der am Rand mit Kontaktflächen versehene Schaltkreis eingesetzt und in einem Arbeitsgang vorzugsweise durch Thermokompression oder Ultraschallverbindung kontaktiert. Die Kontaktflächen entstehen im Zuge des Leitungsmusters

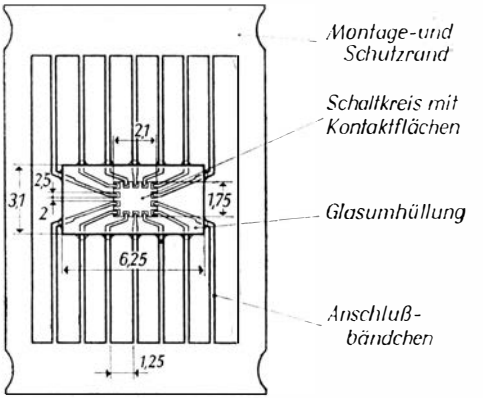


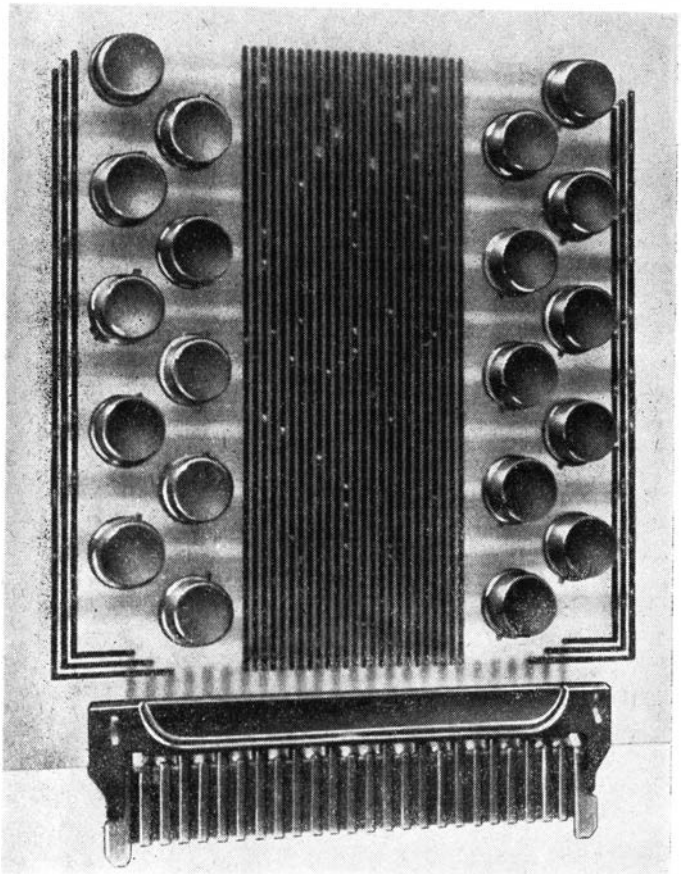
Bild 81
Verkappung eines Schaltkreises ohne vorgefertigte Kapsel (alle Maße in mm)

und haben Abmessungen von etwa 250 µm × 250 µm, während sich die Breite der Anschlußfahnen am inneren Ende auf etwa 200 µm verringert. Eine nachfolgende Plastverkappung oder Verglasung des Substrats bringt eine stabile mechanische Verbindung mit den Anschlußfahnen und einen ausreichenden Schutz gegen klimatische und mechanische Einflüsse. Das geeignet gewählte Material des Leiterrahmens gewährleistet eine gute Haftfestigkeit zwischen den Anschlußfahnen und dem Plast oder der Glasschmelze und damit in einem weiten Temperaturbereich einen sicheren Verschluß des Schaltkreises.

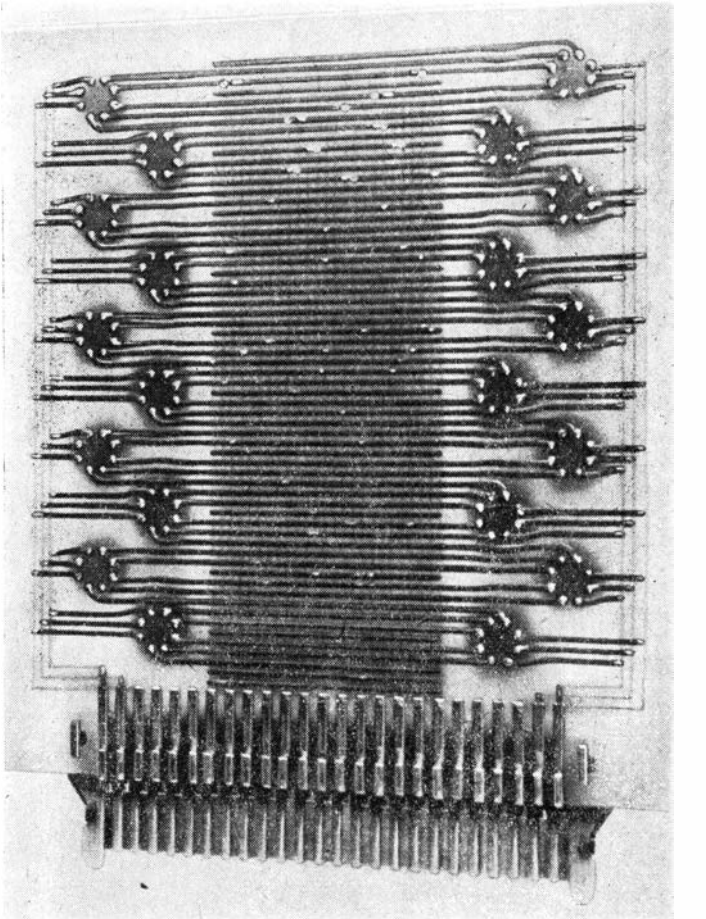
Ein in der beschriebenen Weise elektrisch und mechanisch mit den Anschlußbändchen fest und maßhaltig verbundener Schaltkreis läßt sich nach der Umhüllung ebenso weiterverarbeiten wie ein Schaltkreis in einem vorgefertigten Gehäuse. Der die einzelnen Anschlußfahnen zunächst stabilisierende und damit das Verfahren ermöglichende Rahmen ist nach der Verglasung überflüssig und wird in einem abschließenden Arbeitsgang abgetrennt.

3.4.3. Verbindung der Schaltkreise mit der äußeren Schaltung

Festkörperschaltkreise werden gegenwärtig in den meisten Fällen auf Leiterkarten zu größeren Baugruppen zusammengefaßt.



a)



b)

Bild 82. Leiterplatte, bestückt mit 20 integrierten Halbleiterschaltkreisen im TO 5-Rundgehäuse, die durch eine Verdrahtungsmatrix in zwei Ebenen mit minimalem Aufwand an Fläche ohne Uberkreuzungsstellen verbunden sind (Abmessungen der Leiterkarte 100 mm × 100 mm)

a) Vorderseite
b) Rückseite

In digitalen Schaltungen enthalten die Leiterkarten fast nur Schaltkreise und die zugehörige Verdrahtung, während in analogen Schaltungen die Vereinigung von Schaltkreis und diskret zugesetzten Elementen auf der gedruckten Leiterkarte erfolgt.

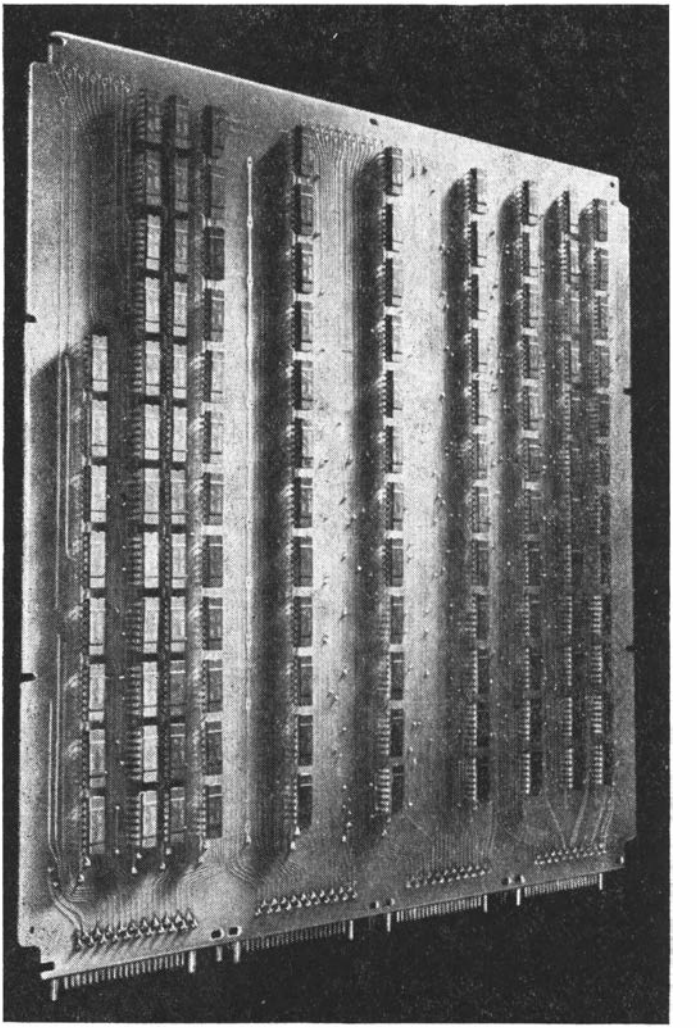
Als Verbindungsverfahren kommen wie beim Dünnschichtschaltkreis Löten und Schweißen in Betracht. Lötverfahren sind technologisch durchentwickelt und in Form des Tauchlötens sehr wirtschaftlich; Schweißverfahren eignen sich für Verbindungen bei sehr geringen Kontaktabständen und weisen unter extremen Bedingungen eine höhere Zuverlässigkeit auf, bedingen jedoch für eine rationelle Anwendung teure Spezialeinrichtungen. Schaltkreise im TO-Rundgehäuse und dual-inline-Gehäuse werden üblicherweise tauchgelötet, während die Weiterverarbeitung von Flachgehäusen fast ausschließlich mit speziellen Schweißeinrichtungen erfolgt. Der Tauchlötprozeß, der die gleichzeitige Kontaktierung aller Verbindungen gestattet, verlangt durchsteckbare Anschlüsse; demgegenüber ermöglichen die Flachgehäuse, die Anschluß für Anschluß flach mit den Leiterbahnen verschweißt werden, die Anordnung von Schaltkreisen auf beiden Seiten der Leiterkarte.

Die im Zusammenhang mit der Verbindung der Dünnschichtschaltkreise angeschnittenen Probleme der Begrenzung der Packungsdichte durch die für die Verdrahtung aufzuwendenden Flächen bzw. Räume sowie der vernünftigen Beherrschung der Verlustwärme trotz großer Packungsdichte treten bei der Verwendung von Festkörperschaltkreisen noch stärker in den Vordergrund. In diesem Rahmen sind noch umfassende Arbeiten notwendig, bei denen im Vordergrund stehen muß, daß die Steigerung der Zuverlässigkeit innerhalb des Festkörperschaltkreises nicht durch die mit der Weiterverarbeitung der Schaltkreise verbundenen Probleme wieder zunichte gemacht werden darf.

Eine zweckentsprechende Verbindung der Schaltkreise erfordert in vielen Fällen, insbesondere jedoch bei digitalen Schaltungen, zwei- oder mehrfach kaschierte Leiterplatten und geeignete Verbindungskonzeptionen, wie sie z. B. die in Bild 82 dargestellte

Bild 83. Anordnung von Schaltkreisen im dual-inline-Gehäuse auf einer Leiterkarte

3



Verbindungsmatrix zeigt. Bild 83 veranschaulicht eine Anordnung von Schaltkreisen im dual-inline-Gehäuse.
Als interessante Variante der Weiterverarbeitung von Festkörperschaltkreisen ist ihre Verknüpfung mit Filmschaltkreisen in einer technologisch zweckmäßigen Form anzusehen. Durch eine Verglasung oder Plastverkappung gegen Umgebungseinflüsse geschützte beam-lead-Schaltkreise oder Schaltkreise mit Chipkontakten u. a. ermöglichen eine unmittelbare Kontaktierung in Filmschaltkreisen, wobei sich durch die »Einsparung« des Gehäuses und die zweckmäßige Anordnung bemerkenswerte technische und ökonomische Vorteile ergeben können. Bei dünnen Anschlußbändchen bietet sich als Verbindungsverfahren die Thermokompression oder Ultraschallverbindung, während sich bei Chipkontakten ein spezieller Lötprozeß für die Herstellung aller Kontakte in einem Arbeitsgang eignet.
Gegenüber der Zusammenfassung größerer Baugruppen auf Leiterkarten bietet diese Form der Verbindung der Schaltkreise untereinander und mit anderen Bauelementen neben günstigen fertigungstechnischen und ökonomischen Bedingungen eine Steigerung der Zuverlässigkeit und die Voraussetzungen für eine stärkere Miniaturisierung, die für eine Reihe von Anwendungen durchaus erstrebenswert ist. Auf Grund dessen, daß alle Arbeitsgänge der Automatisierung zugänglich sind, bringt diese Variante, obwohl die einzelnen Elemente nicht auf einem gemeinsamen Träger hergestellt werden, eine echte Steigerung des Integrationsgrades. Die Tatsache, daß sich der Erhöhung des Integrationsgrades auf einem gemeinsamen Träger noch beträchtliche Schwierigkeiten entgegenstellen, über die später noch zu sprechen sein wird, erhöht die Bedeutung dieser Bauform vor allem für solche Anwendungen, die geringe Streuungen der Kennwerte und geringe parasitäre Effekte verlangen.

3.5. Formen der Festkörperschaltkreise

Durch eine sinnvolle Verknüpfung der verschiedenen in den vorstehenden Abschnitten beschriebenen Technologien sind in Anpassung an die jeweiligen technischen und ökonomischen Anforderungen und die Möglichkeiten der Schaltkreishersteller Schalt-

kreise in den verschiedensten Formen realisierbar. Im folgenden Teil werden einige besonders bemerkenswerte Varianten vorgestellt.

3.5.1. Monolithische Schaltkreise mit Sperrschichtisolation

Diese Variante läßt sich mit den gegenwärtig verfügbaren Technologien sicher beherrschen und stellt z. Z. die ökonomischste Form eines Festkörperschaltkreises dar. Die günstige Ökonomie beruht dabei auf der Tatsache, daß für die Herstellung nur verhältnismäßig wenig Arbeitsgänge erforderlich und alle Arbeitsgänge, außer der Kontaktierung mit den nach außen führenden Anschlüssen, für eine sehr große Anzahl von Schaltkreisen gemeinsam durchführbar und weitgehend automatisierbar sind. Gegenüber der Herstellung von Planartransistoren sind nur ein oder zwei zusätzliche Arbeitsgänge — die Isolations- und die Kollektordiffusion — notwendig. Fast alle im Angebot befindlichen Festkörperschaltkreise werden in dieser Form (Bild 84) hergestellt. Die technischen Grenzen sind durch die Auswirkungen der unvermeidbaren parasitären Kapazitäten gegeben. Am Beispiel des in den Bildern 85 und A 2 (s. Farbtafeln) gezeigten dreistufigen Verstärkers soll der auf einem gemeinsamen Träger angeordnete, sperrschichtisolierte Schaltkreis charakterisiert werden.

Die Schaltung beinhaltet drei Transistoren und fünf Widerstände, die mit den erforderlichen Parametern hergestellt, in der durch die Schaltung vorgegebenen Weise verbunden und mit den Anschlußfahnen des Gehäuses kontaktiert werden müssen.

Im ersten Herstellungsschritt erfolgt die Diffusion der zur gegenseitigen Isolation der einzelnen im Schaltkreis enthaltenen Elemente notwendigen »Isolationswände«. Im Abschnitt 2.3.4. ist dieser Vorgang im einzelnen dargestellt. Bild A 2a zeigt die durch Isolierzäune unterteilte Oberfläche eines Substrats als Ausschnitt aus der Oberfläche der Grundscheibe.

In den durch die Isolationsdiffusion abgeteilten Wannen oder Inseln entstehen in nachfolgenden Prozessen, entsprechend dem im Abschnitt 3.3. geschilderten Ablauf, die verschiedenen Elemente. Zunächst, wie Bild A 2 b dies veranschaulicht, in den drei kleineren Wannen die Basiszonen der Transistoren und dabei

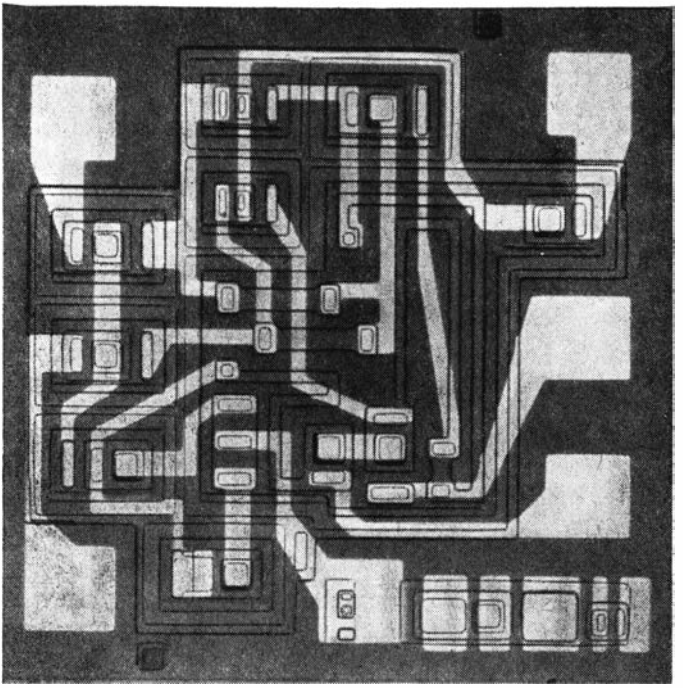
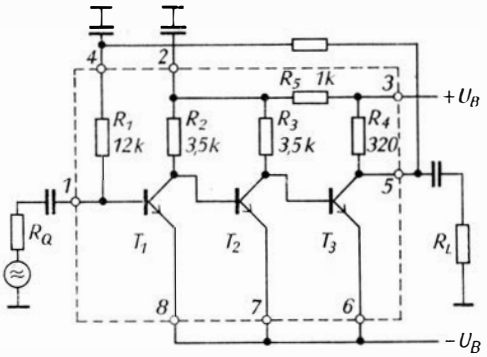


Bild 84. Struktur eines Festkörperschaltkreises mit diffundierten Elementen und aufgedampften Leiterbahnen

im gleichen Arbeitsgang in der größeren Wanne die erforderlichen Widerstände; danach in weiteren Schritten die Emitterzonen und die Kollektorkontaktzonen (Bild A 2 c). Die Bilder A 2 d und e lassen die in weiteren Prozessen im Anschluß an die Verwirklichung der Elemente vom Oxid freigeätzten Kontaktflächen und die auf die Oxidschicht gedampften Verbindungsleitungen erkennen. Den auf den Boden eines Metallgehäuses auflegierten und über Drahtverbindungen mit den Gehäuseanschlüssen kontaktierten Schaltkreis zeigt Bild A 3 (s. Farbtafeln).
Die für die Isolation der durch die Isolierwände abgeteilten n-leitenden Inseln notwendige Sperrpolung ergibt sich durch die



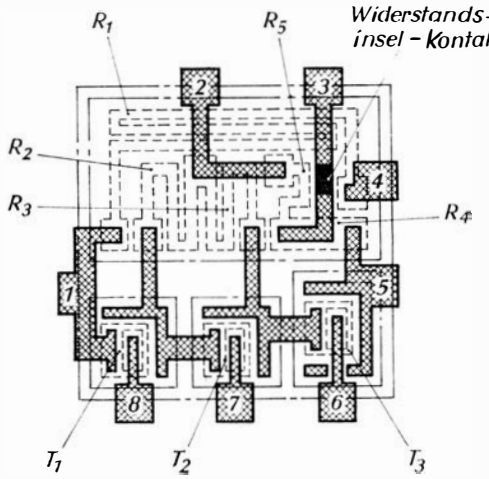


Bild 85
Schaltbild und Aufbauschema des nach Bild A 2 integrierten dreistufigen Verstärkers

über den Gehäuseboden erfolgende Verbindung des Substrats mit dem tiefsten negativen Potential — U_B der Schaltung. Eine gegenseitige Isolation der gemeinsam in einer Wanne untergebrachten Widerstände wird dadurch erreicht, daß diese n-leitende Wanne über den in Bild A 2 c und d erkennbaren Kontakt an das höchste

in der Schaltung vorkommende positive Potential $+U_B$ gelegt wird. Die zwischen der n-leitenden Widerstandsinsel und den p-leitenden Widerstandsbahnen liegenden pn-Übergänge sind damit in Sperrichtung gepolt.
Bild A 4 (s. Farbtafeln) veranschaulicht die Herstellung einer komplizierten Struktur mit vergrabenen Schichten (s. Abschnitt 3.3.1.) am Beispiel eines UND/ODER-Gatters vom Typ FLH 151.

3.5.2. Monolithische Schaltkreise mit SiO_2-Isolation

Anstelle der Sperrschichtisolation tritt bei dieser Schaltkreisvariante die im Abschnitt 2.3.4. detailliert behandelte dielektrische Isolation, welche die Herstellung von Schaltkreisen mit bedeutend verringerten parasitären Effekten und damit verbesserten elektrischen Parametern ermöglicht. Die Realisierung der einzelnen Elemente und der Verbindungen erfolgt in der gleichen Weise wie bei der sperrschichtisolierten Variante. Da die für die Herstellung der Isolation notwendigen Technologien wesentlich aufwendiger und teurer sind als die entsprechenden Verfahren beim sperrschichtisolierten Schaltkreis, wurden diese Schaltkreise trotz der für viele Anwendungen sehr nützlichen, nachweisbar besseren elektrischen Parameter bisher nur im bescheidenen Umfang eingesetzt. Mit zunehmender Beherrschung der verschiedenen Technologien ist jedoch ein merkliches Ansteigen der Bedeutung zu erwarten.

3.5.3. MOS-Schaltkreise

MOS-Schaltkreise fußen auf den im Abschnitt 3.3.1. beschriebenen MOS-Transistoren und nutzen die schaltungstechnischen und technologischen Vorteile derartiger Strukturen. Als schaltungstechnische Vorteile weisen MOS-Transistoren eine Reihe von günstigen Parametern auf, die u. a. die Verwirklichung hochohmiger Schaltungen mit geringen Verlustleistungen ermöglichen. Aus der Sicht des Schaltkreisherstellers gestatten MOS-Transistoren gegenüber bipolaren Transistoren unter günstigen Bedingungen eine Herstellung mit einer geringeren Anzahl von Arbeitsgängen und

kleineren geometrischen Abmessungen. Daraus resultieren niedrige Fertigungskosten und Schaltkreise mit geringem Aufwand an Substratfläche bzw. einem hohen Integrationsgrad. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß in MOS-Schaltkreisen keine Widerstandsstrukturen im üblichen Sinne, sondern an deren Stelle ausschließlich MOS-Transistorstrukturen eingesetzt werden.
In zunehmendem Umfang werden MOS- und bipolare Transistoren auf einem gemeinsamen Substrat kombiniert. Diese Variante ermöglicht eine sinnvolle Verknüpfung der vorteilhaften Eigenschaften beider Elemente.

3.5.4. Beam-lead-Schaltkreise

Für den beam-lead-Schaltkreis gilt das für den Schaltkreis mit SiO_2-Isolation Gesagte, mit dem Unterschied, daß beim beam-lead-Schaltkreis über Zwischenschichten Goldleiterbahnen aufgebracht und nachträglich auf galvanischem Wege so weit verstärkt werden, daß sie nach der Entfernung des zwischen den einzelnen Elementen befindlichen Siliziums als tragendes Gebilde des Schaltkreises in Erscheinung treten. Anstelle des Goldes kann auch Aluminium als Material für die Anschlußbahnen dienen. Von seiten der Isolation sind die im Schaltkreis enthaltenen Elemente als integriert hergestellte, diskrete Bauelemente zu betrachten.
Die besonders herausragenden Eigenschaften des beam-lead-Schaltkreises sind seine isolationsmäßig verständlicherweise guten HF-Eigenschaften und die gewissermaßen integriert angebrachten Anschlüsse nach außen. Letztere ermöglichen eine technisch und ökonomisch sehr vorteilhafte Kontaktierung in Gehäusen und Filmschaltkreisen u. a.

3.5.5. Matrix-Schaltkreise

Matrix-Schaltkreise enthalten auf einem gemeinsamen Träger eine zweckmäßige Standardanordnung von Elementen und stellen in dieser Form zunächst Halbfabrikate dar, die erst zu einem späteren Zeitpunkt durch geeignete Zwischenverbindungen bestimmten gerätetechnischen Anwendungen angepaßt werden. Die An-

wendung dieses Verfahrens ist ein Weg, der den Einsatz von Festkörperschaltkreisen auch in solchen Fällen gestattet, wo nur eine relativ kleine Stückzahl spezieller Schaltkreise notwendig ist. Es bietet eine verhältnismäßig ökonomische Nutzung der technischen Vorteile der Festkörpertechnik, insbesondere der hohen Zuverlässigkeit, die durch diese Bauform nicht gemindert wird. Allerdings kann sich aus ungünstig liegenden Elementen und Verbindungsleitungen vor allem bei höheren Frequenzen eine nachteilige Beeinflussung der Parameter ergeben.

Die Diffusion der einzelnen Elemente erfolgt in der üblichen Weise für eine große Anzahl von Standardschaltungen gemeinsam im Verband der Grundscheibe, wobei diese Anordnungen bis zu über hundert einzelne Elemente — Transistoren, Dioden, Widerstände, Überkreuzungsstellen und in geringem Umfang auch Kapazitäten — aufweisen. Hinsichtlich der Parameter und des Wertebereiches sind keine Besonderheiten zu verzeichnen. Der gegenseitigen Isolation der Elemente können entweder diffundierte Isolationswände oder SiO_2-Schichten dienen. Die Verbindung der Elemente untereinander und die Ausbildung von Kontaktflächen für die Verbindungen nach außen geschieht mittels aufgedampfter Aluminiumbahnen normalerweise beim Schaltkreishersteller auf Grund bestimmter Kundenwünsche oder im Rahmen eines fixierten Fertigungsprogramms, kann jedoch auch beim Geräteherstellers im unmittelbaren Zusammenhang mit der Gerätefertigung erfolgen. Voraussetzung für eine sinnvolle Verarbeitung in der letztgenannten Form ist ein mit allen Elementen kontaktierter, die gesamte Oberfläche bedeckender Aluminiumfilm, welcher mittels eines Fotoätzprozesses in das gewünschte Leitungsmuster zerlegt werden kann. Die außerordentlich bemerkenswerte Besonderheit dieser Variante liegt darin, daß sie Beeinflussungen der Schaltkreisfunktion ohne aufwendige und teure technologische Einrichtungen ermöglicht.

Eine Herstellung der Zwischenverbindungen durch Drahtbrücken, welche mittels der Thermokompression kontaktiert werden, ist möglich, bringt jedoch neben einem bedeutenden Aufwand an manueller Arbeit eine Verringerung der Zuverlässigkeit, so daß diese Form nur für die Musterherstellung in Betracht kommt.

Die mit dem Matrix-Verfahren eingeschlagene Richtung verdeutlicht die Bemühungen um technisch und ökonomisch vorteilhafte

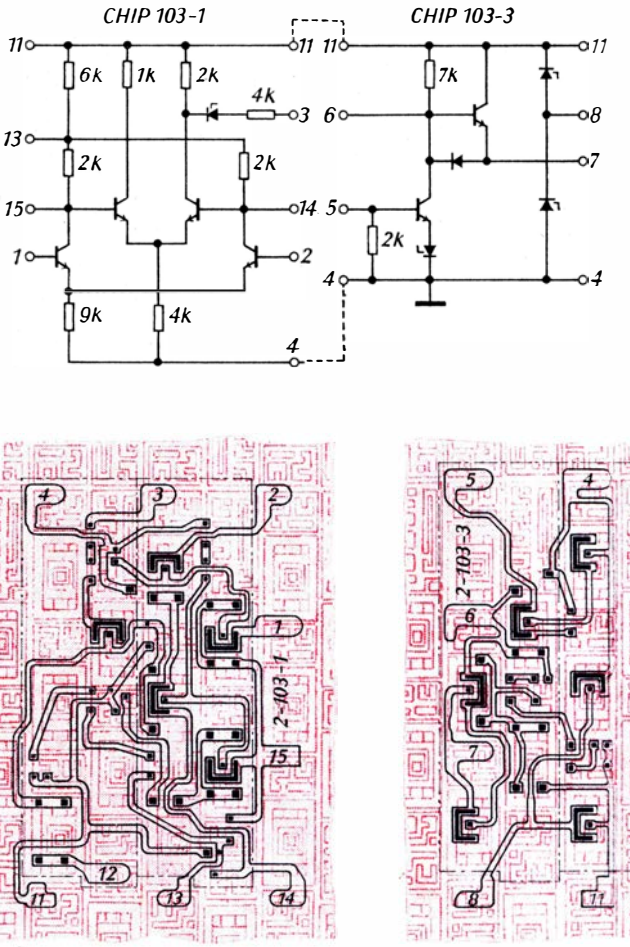


Bild 86. Verwirklichung eines Differenzverstärkers mit Matrix-Schaltkreisen. Schaltbild und Chips mit Standardanordnungen, auf denen die erforderlichen Kontaktierungen und Leiterzüge markiert sind

Fertigungsmethoden für Schaltkreistypen, die unter dem Druck ökonomisch ungünstiger Fertigungszahlen stehen.
Bild 86 veranschaulicht die Herstellung von Schaltkreisen unter Verwendung vorgefertigter Standardanordnungen am Beispiel eines Differenzverstärkers, der aus vier Standardanordnungen Matrix M 2 der Firma General Electric »zusammengeschaltet« wird. Für die Zwischenverbindungen, die in diesem Fall aufgedampft werden, sind jeweils zwei Masken erforderlich; eine Maske für die Ätzung der Kontaktstellen und die zweite für das Aufdampfen der Aluminiumleiterzüge.

3.5.6. Large-scale Integration (LSI)

Die gegenwärtig zum überwiegenden Teil auf Leiterkarten erfolgende Verknüpfung kleinerer Funktionskreise zu komplexeren Einheiten beinhaltet erhebliche Probleme bei der Unterbringung bzw. Verlegung der Verbindungsleitungen und führt zu Abstrichen in der Zuverlässigkeit sowie, bezogen auf die enthaltenen integrierten Schaltkreise, zu einer Vergrößerung des Volumens um mehrere Zehnerpotenzen. In den Gesamtkosten einer derartigen Baueinheit stellen die reinen Schaltkreiskosten, selbst wenn man voraussetzt, daß alle Bauelemente in den Schaltkreisen zusammengefaßt sind, nur einen Bruchteil dar. Der größte Kostenaufwand ist für die separat und teilweise manuell durchzuführenden Arbeitsgänge zur Kontaktierung, Verkappung, Montage und Verbindung der einzelnen Schaltkreise erforderlich.
Diese Tatsachen führen zu Bestrebungen, eine komplexere Funktionsgruppe unmittelbar im Schaltkreis zusammenzufassen, um auf diese Weise die Vorteile der integrierten Technik — automatisierte Mehrfachbearbeitung und hohe Zuverlässigkeit — für einen größeren Komplex zu nutzen, die Herausführung von Zwischenverbindungen weitgehend zu vermeiden und die Kontaktierungs- und Verkappungskosten entscheidend zu senken. Schwierigkeiten auf diesem Wege resultieren aus noch bestehenden Unfertigkeiten in der Beherrschung verschiedener Technologien, wobei sich in letzter Zeit jedoch eine enge Bindung zwischen der LSI und der MOS-Technik herauskristallisierte. Ein wesentliches Problem liegt in der Überwindung der Ausbeutebegrenzung durch

die bei einer wachsenden Zahl der Elemente je Schaltkreis infolge der Flächenvergrößerung ebenfalls wachsende Wahrscheinlichkeit von Elementefehlern und die bei einer Vergrößerung der geometrischen Abmessungen zunehmende Zahl der Fehlstellen im Substrat. Es ist in diesem Zusammenhang bemerkenswert, daß eine Verringerung der geometrischen Abmessungen der im Schaltkreis enthaltenen Elemente bei allen üblichen Technologien zu größeren Toleranzen führt, so daß die angestrebte Einsparung an Fläche durch größere Ungenauigkeit erkauft werden muß. Die MOS-Technik ist in dieser Hinsicht am günstigsten, weil integrierte MOS-Transistoren eine kleinere Fläche brauchen als Bipolartransistoren.

Da die Ausbeute sehr eng mit den Schaltkreiskosten verknüpft ist, hat sie für den in der Fertigung realisierbaren Umfang komplexer Schaltkreise ausschlaggebende Bedeutung. Nicht zu unterschätzen ist in diesem Zusammenhang der Einfluß der Zuverlässigkeit, die, weil bei einem Ausfall eines umfangreichen Schaltkreises ein erheblicher Teil des Gesamtgerätes zu ersetzen ist, den Nutzen der large-scale integration in Abhängigkeit der Schaltkreiskosten mehr oder weniger in Frage stellen kann.

Möglichkeiten zur Erreichung einer akzeptablen Ausbeute bestehen prinzipiell darin, einzelne, nicht brauchbare zusammenhängende Gruppen oder Elemente durch andere im Schaltkreis enthaltene zu ersetzen. Voraussetzung dafür ist eine zweckmäßige Anpassung zwischen der zu realisierenden Schaltung und den im Substrat angeordneten Elementen. Den Angaben von Schaltkreisherstellern kann entnommen werden, daß die Ausbeute bei 70 % liegt, wenn die Schaltung so gewählt wird, daß im Idealfall etwa 50 % der angeordneten Elemente genutzt sind.

Im einfachsten Fall kann der »Ersatz« dadurch geschehen, daß neben dem starren, für die Schaltkreise eines Typs einheitlichen Leitungsmuster spezielle, gegen das starre Muster isolierte Leitungszüge aufgebracht werden, welche die »Ersatzelemente« anstelle der fehlerhaften Elemente in die Schaltung einfügen.

Wesentlich eleganter ist eine zweite Technologie, die mit einer festen Anordnung der Elemente, jedoch flexiblen Zwischenverbindungen arbeitet. In dieser Form erfolgt im Anschluß an die Herstellung der Elemente und die Verbindung und Funktionsprüfung der Teilgruppen der Entwurf eines speziellen Leitungs-

musters unter Berücksichtigung der Prüfergebnisse. Ein derartiges Verfahren ist mit den bisher üblichen Methoden des Schaltungsentwurfs und Technologien der Maskenherstellung nicht in vertretbaren Zeiträumen lösbar. Die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen werden deshalb Computern zugeführt, welche ein geeignetes Leitungsmuster entwerfen und mit den Ausgabewerten unmittelbar die Herstellung steuern. Eine optimale Ausbeute läßt sich erreichen, wenn der Rechner entweder eine zweckmäßige Verbindung der brauchbaren Elemente einer Anordnung zu einem bestimmten Schaltkreis ermittelt oder aus einem vorgegebenen Programm eine Schaltung auswählt, die sich unter optimaler Ausnutzung der brauchbaren Elemente verwirklichen läßt. Die Steuerung des Fertigungsprozesses durch den Rechner erfolgt in bereits realisierten Einrichtungen beispielsweise dadurch, daß der Rechner ein Ablenkprogramm für einen Elektronenstrahl ausgibt, wonach die mit Fotolack beschichteten Substrate durch den Elektronenstrahl so belichtet werden, daß eine Maske entsteht, welche die Herstellung des Leitungsmusters in einem selektiven Ätz- oder Aufdampfprozeß gestattet.

Unter Anwendung solcher oder ähnlicher Methoden werden bereits gegenwärtig Schaltkreise gefertigt — vorwiegend nach MOS-Technologien —, die umfangreiche Systeme, wie Speicher, Schieberegister und Zähler u. a., beinhalten und dabei jeweils einige tausend Einzelelemente in sich vereinigen.

Da der Aufwand wesentlich gesteigert wird, wenn auch speziellere Parameter, wie Rauschen, Linearität, Grenzfrequenz u. a., die insbesondere für analoge Schaltkreise notwendig sind, als Kriterien in den Auswahlprozeß einbezogen werden, kommen die erwähnten Verfahren zunächst vor allem für relativ langsame Digitalschaltkreise in Betracht. Die sich aus der teilweise recht ungünstigen Leitungsführung und Anordnung einzelner Elemente ergebende Erhöhung der parasitären Effekte verschiebt den Anwendungsbereich in der gleichen Richtung. Für eine auf spezielleren Bauelementen mit engen Toleranzen fußende Schaltungstechnik erscheint die Integration größerer Funktionsgruppen in Form des monolithischen Festkörperschaltkreises zumindest zunächst nicht geeignet, da die Beherrschung dieser Problematik schon bei relativ einfachen Festkörperschaltkreisen erhebliche Schwierigkeiten bereitet.

Als zweckmäßige Variante für diesen Anwendungsbereich ist die Integration auf der Basis des Dünnschichtschaltkreises unter Zufügung von Halbleiterelementen in Form von einzelnen Transistoren und Dioden sowie kompletten Festkörperschaltkreisen geringeren Umfangs anzusehen. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Herstellung ist jedoch eine entsprechende Gestaltung der Halbleiterelemente hinsichtlich des Verschlusses und der Kontaktierung. In dieser Variante ist für einzelne Elemente eine nahezu beliebige Auswahl in den verschiedensten Richtungen möglich.
Neben den behandelten Schaltkreisformen existieren weitere Varianten, wie beispielsweise der Multichip-Schaltkreis und der Festkörper-Hybrid-Schaltkreis. Diese Schaltkreise wurden bereits in anderen Abschnitten mit ihren Besonderheiten erwähnt und haben entweder wie der Multichip-Schaltkreis nur im beschränkten Umfang Bedeutung für die Kleinserienfertigung oder sind wie der Festkörper-Hybrid-Schaltkreis (Bild A 5, s. Farbtafeln) bestimmten Anwendungsfällen angepaßte Kombinationen zwischen der Festkörper- und der Dünnschichttechnik, bei denen in jedem Teil die entsprechenden Eigenschaften in Erscheinung treten.

3.6. Verkappung

Bereits bei den Verbindungsverfahren kam zum Ausdruck, daß die nach der Trennung der Grundscheibe mit ihren winzigen Abmessungen in Erscheinung tretenden Festkörperschaltkreise eines Schutzes gegen klimatische und mechanische Einflüsse bedürfen und im Interesse einer vernünftigen Weiterverarbeitung weitere Kontaktabstände sowie geeignete Anschlußelemente notwendig sind. Die Schaltkreise werden deshalb entweder in vorgefertigte Gehäuse gesetzt oder in Glas oder Kunststoff eingebettet. Sie erhalten dabei die erforderlichen Anschlußelemente.
Nachdem anfangs mit elektrischen Durchführungen versehene, hermetisch verschließbare Metall-, Keramik- oder Glasgehäuse dominierten, erlangten in neuerer Zeit die Kunststoffumhüllungen eine zunehmende Bedeutung. Diese Tatsache ist offensichtlich auf die im allgemeinen weniger aufwendigen Technologien

und damit niedrigeren Kosten zurückzuführen. Die Entwicklung zielt auf Formen der Verkappung und Gestaltung der Anschlußelemente, die, wie bereits im Abschnitt 3.4. angedeutet, eine gleichzeitige Mehrfachbondung des Chips auf einem Trägerstreifen mit der Umhüllung zu vereinigen gestatten. Die Bedeutung moderner mit der Kontaktierung gekoppelter Verschlußverfahren ist offensichtlich. Die Kosten der gegenwärtig üblichen vorgefertigten Gehäuse und der Montage des Schaltkreises in diese Gehäuse übersteigen die bisher bei der Herstellung des Schaltkreises selbst entstandenen Kosten in Abhängigkeit vom Integrationsgrad um das Anderthalb- bis Zehnfache.

Entsprechend der Rolle, die diese Elemente spielen, kommt auch der Umhüllung der für eine unmittelbare drahtlose Kontaktierung geeigneten Chip- und beam-lead-Schaltkreise Aufmerksamkeit zu. Üblicherweise werden derartige Elemente durch Nitridschichten und Verglasungen geschützt.

Noch nicht vollkommen geklärt ist in diesem Zusammenhang die Frage, ob die durch eine Kunststoffumhüllung oder einen Glasüberzug geschützten Schaltkreise hinsichtlich der Klimafestigkeit mit hermetisch verkappten Schaltkreisen konkurrieren können. Kunststoffumhüllungen neigen bei tiefen Temperaturen zu der bereits von den kunststoffumhüllten Kondensatoren bekannten Rißbildung und damit zur Feuchtigkeitsaufnahme. Bei der Verglasung besteht gegenwärtig noch die Schwierigkeit, daß die im Hinblick auf die Schmelztemperaturen mit den Schaltkreisen harmonierenden niedrigschmelzenden Gläser einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen als Silizium und SiO_2 und

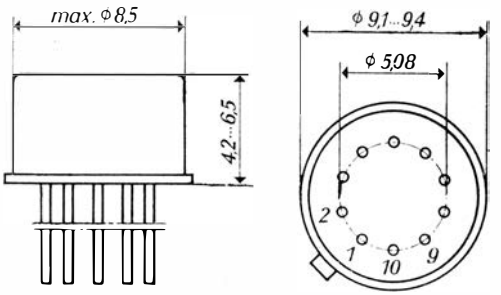


Bild 87
TO 5-Gehäuse
mit 10 Anschlüssen

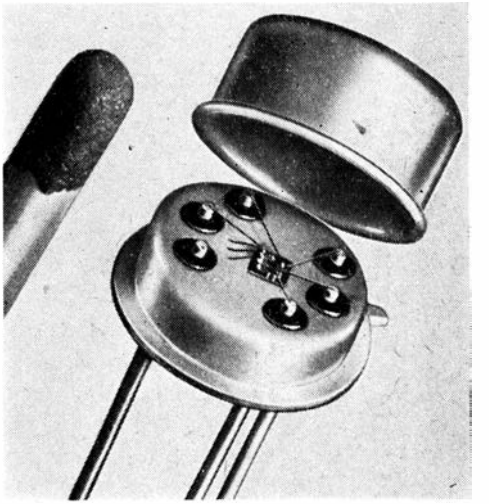


Bild 88
Kontaktierter Schaltkreis im TO 5-Gehäuse

dadurch nur in einer sehr dünnen Schicht aufgebracht werden können, während Gläser mit einem geeigneten Ausdehnungskoeffizienten Schmelztemperaturen erfordern, die zur Zerstörung des Schaltkreises führen würden. Gegenwärtig laufende Untersuchungen werden die Frage beantworten müssen, ob dünne Glasschichten, welche die Ausdehnungsunterschiede durch eine elastische Verformung ausgleichen können, in der Lage sind, der Feuchtigkeit einen ausreichenden Widerstand entgegenzusetzen.
Plastverkappte Elemente werden aus diesem Grunde, obwohl die intensiven Bemühungen um eine Verbesserung der Plastwerkstoffe eine Erweiterung des Anwendungsbereiches erwarten lassen, nur für geringere klimatische Anforderungen mit eingeengtem Betriebstemperaturbereich angeboten, während für extreme klimatische Anforderungen nach wie vor der hermetische Verschluß dominiert. Die bedeutend höheren Kosten werden dabei im Interesse der größeren Zuverlässigkeit in Kauf genommen.
Hermetisch verschließbare Kapseln haben sich bisher in Form von TO-Rundgehäusen und als Flachkapseln in mehreren Varianten durchgesetzt.
Rundgehäuse, insbesondere Varianten des TO 5-Gehäuses (Bild 87) mit bis zu zehn Anschlüssen, sind ausschließlich Metallkapseln,

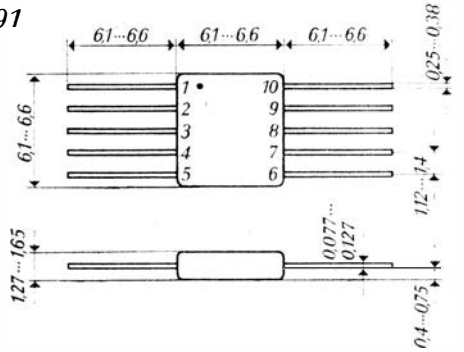


Bild 89. Prüfung der Schaltkreise mit Hilfe eines Sondenmanipulators vor der Trennung der Grundscheibe und dem Einbau in ein Gehäuse

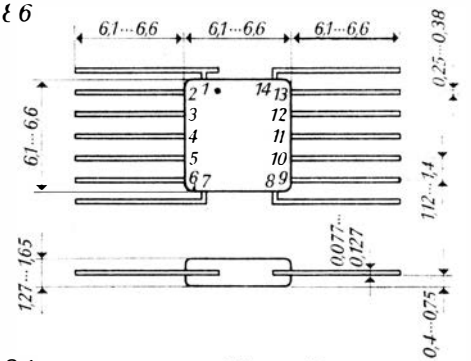
die sich bereits bei der Verkappung von Transistoren bewährt haben. Die Siliziumsubstrate werden über eine Goldzwischenlage auf dem Gehäuseboden auflegiert und erhalten dadurch eine hervorragende Ableitung der im Betrieb entstehenden Verlustwärme. Die Kontaktierung der Schaltkreise erfolgt sowohl schaltkreisseitig als auch an den Durchführungsstiften üblicherweise durch Thermokompression (Bild 88) oder Ultraschallverbindung.

Bild 90. Flachgehäuse (flat-pack) in den Bauformen TO 91, TO 86 und TO 84

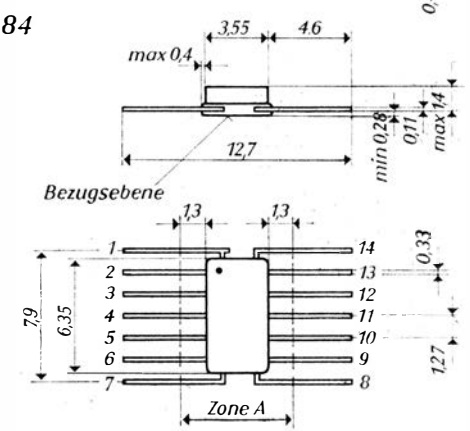
TO 91



TO 86



TO 84



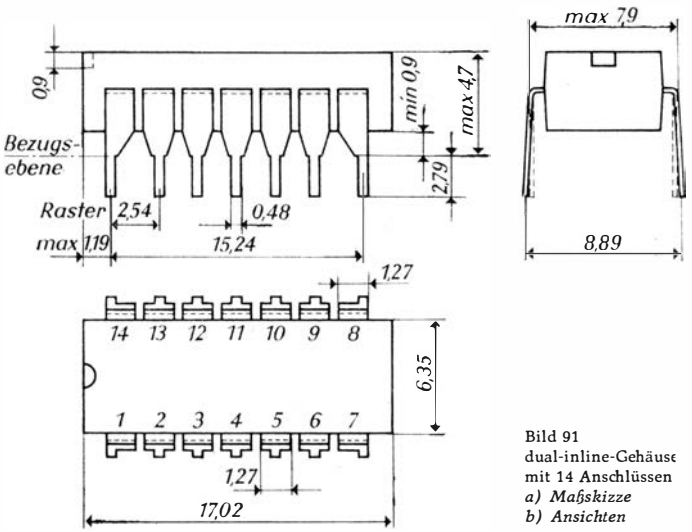
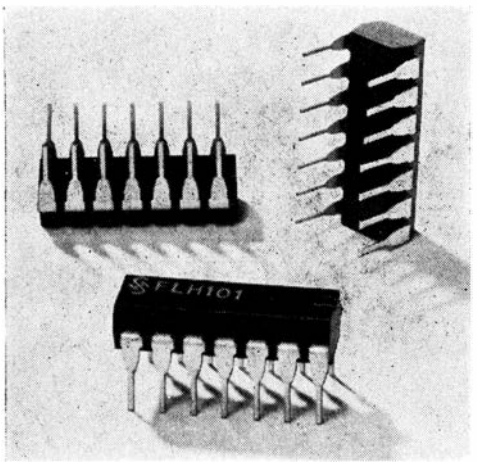


Bild 91
dual-inline-Gehäuse mit 14 Anschlüssen
a) Maßskizze
b) Ansichten



b)

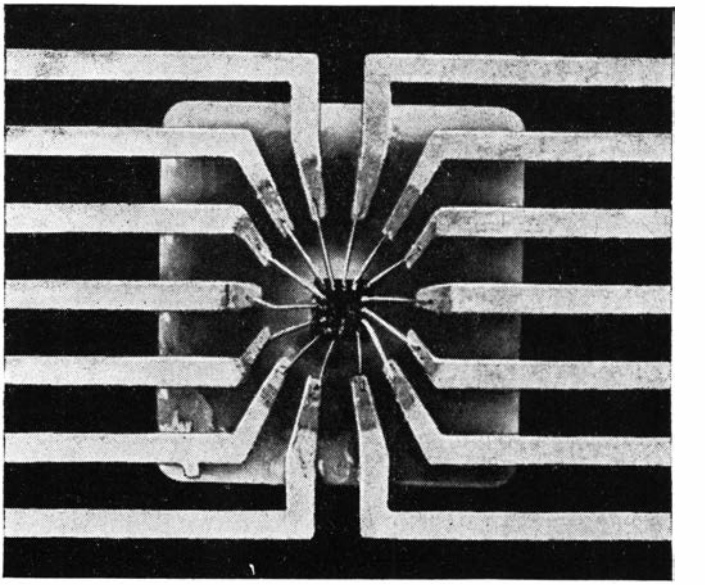


Bild 92. Kontaktierung eines Schaltkreises im Flachgehäuse

Der Verkappung werden nur funktionstüchtige Schaltkreise zugeführt. Die Prüfung auf Funktionstüchtigkeit erfolgt bereits im Verband der Grundscheibe mittels eines in Bild 89 gezeigten, außerordentlich präzisen Meßkopfes, der die Schaltungen durch aufgesetzte Meßspitzen kontaktiert und auf ihre elektrischen Parameter prüft. Funktionsuntüchtige Schaltungen werden markiert und vor den nachfolgenden teuren Einzelprozessen ausgeschieden.

Flachgehäuse stehen in verschiedenen Ausführungsformen, die im wesentlichen den technologischen Möglichkeiten der Schaltkreishersteller angepaßt sind, zur Verfügung. Im Prinzip sind alle Varianten auf zwei Grundformen zurückzuführen: die Flachgehäuse mit seitlich herausgeführten Anschlußbändchen im 1,25-mm-Raster (Bild 90) und die dual-inline-Gehäuse, deren Anschlüsse ebenfalls an den Seiten angeordnet, jedoch im 2,5-mm-Raster in Richtung der Leiterkarte abgebogen sind (Bild 91). Die erstgenannte Form erfordert auf der Leiterkarte zweckmäßiger-

weise Schweißverbindungen, die mit komplizierten Punktschweißmaschinen nacheinander hergestellt werden müssen; die dual-inline-Gehäuse ermöglichen ebenso wie die Rundgehäuse ein Durchstecken der Anschlüsse und damit eine rationelle Tauchlötung.
Gegenüber den Rundgehäusen passen sich die flachen, rechteckigen Gehäuse dem Schaltkreis besser an (Bild 92) und gewährleisten auf diese Weise eine bessere Raumausnutzung bei der Montage. Moderne Umhüllungen ohne vorgefertigte Kapseln sind nur in dieser Form realisierbar.
Alle bisher bekannten Gehäusevarianten sind nach einer verhältnismäßig kurzen Entwicklungszeit sicher nur als erste Entwicklungsstufen zu betrachten. Den für die Kontaktierung und den Verschluß der Schaltkreise eingesetzten Verfahren haften die bereits erwähnten technologischen Mängel an, so daß sich sowohl hinsichtlich der Kosten als auch des Volumens erhebliche Abstriche von den Parametern der nackten Schaltkreise ergeben. Im Zusammenhang mit der wachsenden Bedeutung der integrierten Schaltungstechnik und den damit verbundenen ökonomischen Aspekten sowie der technischen Entwicklung in Richtung Mikroleistungstechnik und large-scale integration ergeben sich Forderungen nach einer zweckmäßigen Verschlußtechnik. Die verringerten Leistungen lassen eine Verringerung der Gehäuseabmessungen zu; für die LSI ist eine bedeutend größere Anzahl von Anschlüssen erforderlich. Bereits gegenwärtig werden Entwicklungsmuster von Schaltkreisen mit mehreren Grundfunktionen in Kapseln mit bis zu etwa 60 Anschlüssen und mehr untergebracht. Von den beschriebenen Varianten dürften am ehesten die Verschlußtechniken ohne vorgefertigte Kapsel den steigenden Anforderungen gerecht werden.

3.7. Entwurf und Fertigung von Schaltkreisen

Im Rahmen von Dünnschichtschaltkreisen lassen sich Elemente in einem breiten Wertebereich verwirklichen, ohne daß die bei der Herstellung dieser Elemente notwendigen technologischen Verknüpfungen wesentliche Einschränkungen mit sich bringen. Auf Grund dessen gelten für den Entwurf von Schaltungen, die in

Form von Dünnschichtschaltkreisen entstehen sollen, die gleichen Voraussetzungen wie auch für diskret aufgebaute Schaltungen. Der wesentlichste Teil der bei der Arbeit mit diskreten Elementen gewonnenen Erfahrungen läßt sich für den Dünnschichtschaltkreis nutzen.

In Festkörperschaltkreisen unterscheiden sich die einzelnen Elemente von den entsprechenden konventionellen Elementen (die Kollektorkontakte der Transistoren liegen in der Ebene der Emitter- und Basiskontakte, Sperrschichtkondensatoren und diffundierte Widerstände wurden bisher nicht angewandt) und weisen infolgedessen mehr oder weniger abweichende Eigenschaften und Kennwerte auf.

Von besonderem Einfluß sind die Auswirkungen der parasitären Kapazitäten, die sich vor allem bei sperrschichtisolierten Schaltkreisen sehr stark bemerkbar machen.

Diese Besonderheiten der Festkörperschaltkreise sind beim Schaltungsentwurf zu beachten. Ein Entwurf allein unter Berücksichtigung der Begrenzung im Wertebereich, wie er noch beim Dünnschichtschaltkreis möglich war, führt nicht mehr zu einer brauchbaren Lösung; die abweichenden Eigenschaften der einzelnen Elemente und die parasitären Effekte verlangen neue Betrachtungsweisen. Es ist dabei notwendig, eine Reihe technischer Gegebenheiten, die zudem von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich sind, zu berücksichtigen, so daß nur eine enge Zusammenarbeit zwischen Schaltungstechniker und Halbleiterphysiker bzw. »Schaltkreistechnologen« sowie Schaltkreis- und Gerätehersteller optimale Ergebnisse bringen wird.

Das Fehlen von Induktivitäten und großen Kapazitäten führt zwangsläufig zu Änderungen in den Geräte- und Systemkonzeptionen. Mit diesen Fragen wird sich Abschnitt 4. befassen. Die parasitären Effekte und besonderen Eigenschaften der Elemente müssen unmittelbar mit dem Schaltkreisentwurf abgefangen bzw. in den Entwurf einbezogen werden. Durch die Wahl einer dielektrischen Isolation lassen sich die parasitären Kapazitäten wesentlich herabsetzen, wenn der damit verbundene Aufwand gerechtfertigt erscheint.

In der Anfangszeit waren für den Schaltungsentwurf in relativ großem Umfang experimentelle Untersuchungen erforderlich, die einesteils auf der Ermittlung des Verhaltens der verschiedenen

Elemente und der Übertragung der Ergebnisse auf die zu entwerfende Schaltung beruhten und andererseits unmittelbar auf einer »Brettschaltung« aus separat verkappten aktiven und passiven Halbleiterelementen fußten. Auch der Multichip-Schaltkreis hat, obwohl er die parasitären Kapazitäten der Sperrschichtisolation ebensowenig nachbildet wie die Brettschaltung, in diesem Zusammenhang Bedeutung erlangt, weil er in sehr zweckmäßiger Weise sowohl eine große Flexibilität als auch verhältnismäßig reale Verhältnisse bietet.

Ständig wachsende Erkenntnisse lassen experimentelle Untersuchungen in dieser Form in den Hintergrund treten. Die mit den bereits gefertigten Schaltkreisen gesammelten Erfahrungen gestatten es, Abschätzungen, die bei theoretischen Entwürfen unumgänglich sind, fundiert und in guter Näherung vorzunehmen. In kritischen Sonderfällen bieten Hybrid-Varianten meist einen Ausweg mit günstigen elektrischen Verhältnissen und dem großen Wertebereich der Dünn- bzw. Dickschichttechniken. Sie sind jedoch gegenüber vollständig diffundierten Festkörperschaltkreisen, ebenso wie die Schaltkreise mit dielektrischer Isolation, immer mit höheren Kosten behaftet.

Die Herstellung von Festkörperschaltkreisen beruht auf einer Aufeinanderfolge der in den zurückliegenden Abschnitten beschriebenen Prozesse, die der Vorbereitung des Substrats, der Verwirklichung der Schaltung, der elektrischen Verbindung der im Substrat liegenden Elemente, der Trennung der einzelnen Schaltungen, der Kontaktierung und der Verkappung dienen. Besonders hingewiesen sei an dieser Stelle auf die nach jedem Fertigungsgang erfolgenden Zwischenprüfungen. Sie verkörpern einen beträchtlichen Teil des gesamten Fertigungsaufwandes und dienen zunächst unmittelbar der Qualitätssicherung des jeweiligen Elementes bzw. der Elementengruppe. Darüber hinaus wirken sie jedoch unter Anwendung der elektronischen Datenverarbeitung bis in die ersten Phasen des Produktionsprozesses zurück. Nur auf diese Weise lassen sich die sehr langwierigen Prozesse stabil beherrschen und im Endeffekt die Grundmerkmale der integrierten Technik – hohe Zuverlässigkeit und vorteilhafte Ökonomie – sichern.

3.8. Angebot an Festkörperschaltkreisen

Bei Festkörperschaltkreisen steht das vorbereitete Standardsortiment, welches eine Fertigung mit großen Stückzahlen erlaubt, im Vordergrund. Standardschaltkreise werden in geschlossenen, abgerundeten Reihen vorwiegend als Universalschaltkreise mit großer Anwendungsbreite angeboten.
Digitalschaltkreise sind in einem breiten Sortiment verfügbar. Die einzelnen Digitalreihen weisen eine an die elektrischen Erfordernisse hinsichtlich Schaltgeschwindigkeit, Störfestigkeit, Leistung u. a. sowie die technologischen Möglichkeiten angepaßte Schaltungstechnik auf. Typische Reihen, die in wenig abgewandelter Form von verschiedenen Herstellern angeboten werden und sich einerseits in ihren technischen Parametern unterscheiden, andererseits jedoch bestimmte Entwicklungsetappen des integrierten Digitalschaltkreises verkörpern, sind die Widerstand-Transistor-Logik (RTL), die Dioden-Transistor-Logik (DTL) sowie die Transistor-Transistor-Logik (TTL) und die emittergekoppelte Logik (ECL).
Die mit Abstand größte Bedeutung haben die TTL-Schaltkreise erlangt. Das von mehreren Herstellern mit nahezu äquivalenten Kennwerten gefertigte Sortiment ist im allgemeinen den Interessen der Datenverarbeitungstechnik angepaßt, im wesentlichen jedoch auch für andere Gerätetechniken gut geeignet. Für extreme Anforderungen an die Schaltzeiten bieten sich die ECL-Reihen an.
Dem Trend zur Erhöhung des Integrationsgrades entsprechend beinhaltet das Angebot in zunehmendem Maße hochintegrierte MSI- und LSI-Schaltkreise. Die MSI-Typen basieren vorwiegend auf den bipolaren TTL-Reihen, die LSI-Schaltkreise, vor allem bei extrem hohem Integrationsgrad, auf der MOS-Technik. Der LSI-Komplex beinhaltet u. a. sehr umfangreiche Speicher, Schieberegister und Zähler jeweils für die unterschiedlichsten Einsatzfälle und bietet damit für zukünftige Geräteentwicklungen interessante Aspekte.
Analogschaltkreise lassen sich prinzipiell für die verschiedensten Anwendungen verwirklichen. Als in der Fertigung sicher beherrschbare elektrische Grenzen können für HF-Verstärker Frequenzen bis 100 MHz und für NF-Verstärker Ausgangsleistungen

von 10 W bei unterschiedlicher Eingangsempfindlichkeit angesehen werden. Mischer und Oszillatoren sind in geeigneter Form ebenfalls im genannten Frequenzbereich realisierbar. Für meßtechnische Anwendungen und empfindliche Regelsysteme stehen temperaturstabilisierte Differenzverstärker mit beachtlichen Parametern (Offsetspannung 1 mV, Spannungsdrift 0,2 μV/°C, Stromdrift 10 pA/°C – jeweils bezogen auf den Eingang) zur Verfügung.

Unabhängig von diesen für breite Anwendungsgebiete überaus beachtlichen Parametern ist das Analogsortiment zumindest aus der Sicht der kommerziellen Gerätetechnik wesentlich schmaler als das Digitalsortiment. Offensichtlich werden die technologischen Möglichkeiten bei weitem nicht ausgeschöpft. Es dominieren, vor allem aus dem Gesichtswinkel des Absatzes und damit der Preisentwicklung, Schaltkreise, die auf historisch gewachsenen Gerätefamilien — Rechnern und Datenverarbeitungsgeräten sowie Rundfunk- und Fernsehgeräten — basieren und innerhalb dieser Familien, im wesentlichen in gleicher Form, ständig wiederkehren. Auf der einen Seite stehen die bereits herausgestellten Operationsverstärker, Komparatoren und Spannungsregelschaltungen, seit einiger Zeit auch Leseverstärker, teilweise kombiniert mit digitalen Elementen für logische Verknüpfungen, sowie Kern- und Leitungstreiber, auf der anderen Seite Elemente der Rundfunk- und Fernsehgeräteindustrie — ZF-Verstärker mit und ohne Demodulator, NF-Verstärker und Stereodekoder u. a. sowie Schaltkreise für Fernsehgeräte, die verschiedene Varianten der Realisierung nahezu kompletter Schwarzweiß- und Farbfernsehgeräte gestatten. Die Rundfunk- und Fernsehgeräteindustrie setzt dabei sehr große Stückzahlen gleicher Schaltkreise ein und bietet dem Schaltkreishersteller die gleichen Bedingungen, wie sie für digitale Schaltkreise bestehen.

Neben diesen beiden Gruppen enthält das Standardangebot einige sehr flexible Schaltkreise, im wesentlichen Differenzverstärker kleineren Umfangs, die ihre Flexibilität im Grunde genommen auf Kosten eines vernünftigen Integrationsgrades erkaufen.

Neben den Standardschaltkreisen mit großer Anwendungsbreite tauchen in zunehmendem Maße auch speziellere Festkörperschaltkreise im Angebot auf. Die Schaltkreishersteller stellen sich damit auf die Belange der Gerätetechnik ein, ermöglichen eine umfas-

sendere Integration und festigen bzw. erweitern dabei ihren Marktanteil. Die Gerätehersteller unterstützen diese Bemühungen durch eine Orientierung auf Gerätekonzeptionen, die eine optimale Nutzung spezieller Schaltkreise gewährleisten. Grundlage für die beiderseitigen Bemühungen sind die gewachsenen Fähigkeiten, einerseits auf dem Gebiet der Technologie und des Schaltkreisentwurfs und andererseits in der Nutzung integrierter Elemente im Rahmen der Schaltungstechnik.

Ein international üblicher Weg zur ökonomischen Ausweitung des Sortiments beruht auf der Nutzung von Arbeiten, die der Schaltkreishersteller im Zusammenhang mit speziellen Kundenentwicklungen geleistet hat. Er bezieht für bestimmte Anwendungen entwickelte Schaltkreise nach Freigabe durch den Kunden in das Angebot ein. Die Kosten der Schaltkreisentwicklung trägt dabei der Kunde, für den die Entwicklung durchgeführt wird. Er erhält jedoch gegebenenfalls günstige Bedingungen, wenn sich abzeichnet, daß der Schaltkreis von allgemeinem Interesse ist und die Freigabe zu einem frühen Zeitpunkt erfolgt.

Die Herstellung anpassungsfähiger Schaltkreise fußt in zunehmendem Umfang auf modernen rechnergestützten Methoden. Dabei wird das geometrische Muster des Schaltkreises auf der Basis vorliegender Erfahrungen in kürzester Frist entworfen und verläßt den Rechner in einer Form, die eine unmittelbare Steuerung der Fertigungseinrichtungen ermöglicht.

Innerhalb der genannten Gruppen treten die angewandten Herstellungs-, Isolations- und Verbindungstechnologien nach außen nur in Form elektrischer und ökonomischer Kennwerte in Erscheinung. Die übergroße Mehrheit aller auf dem Markt befindlichen Schaltkreise sind vollständig diffundierte, d. h. sperrschichtisolierte Kreise. Festkörper-Hybrid-, SiO_2-isolierte und Multichip-Schaltkreise sind in einem wesentlich kleineren Rahmen spezielleren Anwendungen vorbehalten, während beam-lead-Schaltkreise und andere interessante Varianten bisher zumindest für den zivilen Sektor offensichtlich nur als Versuchsmuster diskutabel sind.

Im Bereich niederer Schaltgeschwindigkeit werden die sehr ökonomisch zu fertigenden sperrschichtisolierten Schaltkreise im wesentlichen allen Anforderungen gerecht. Die in der Herstellung aufwendigeren und deshalb kostspieligeren Schaltkreise mit

dielektrischer Isolation sind vor allem für höhere Frequenzen bis in den GHz-Bereich bedeutungsvoll.

Alle Schaltkreise werden für zivile Anwendungen zumindest für einen Betriebstemperaturbereich von 0 ... +70 °C angeboten. Im Metallgehäuse sind die Schaltkreise jedoch in den meisten Fällen in einer zweiten Variante für einen erweiterten Betriebstemperaturbereich von —55 ... +125 °C verfügbar.

Die Preisentwicklung zeigt sowohl für digitale als auch analoge Schaltkreise eine außerordentlich günstige Tendenz. Einfachere Standardschaltkreise, vor allem digitaler Art, liegen im Preis weit unter vergleichbaren Schaltungen in diskretem Aufbau. Die im Zusammenhang mit der technologischen Weiterentwicklung mehrfach herausgestellte, zunehmende Automatisierung der Fertigung bringt auch für kompliziertere Schaltkreise ähnliche Verhältnisse.

Im sozialistischen Wirtschaftsgebiet werden digitale TTL-Schaltkreise produziert. Für analoge Anwendungen gibt es mehrstufige Verstärker. Die Schaltkreise sind vorzugsweise in dual-inline-Gehäusen untergebracht.

4

Einsatz mikroelektronischer Schaltkreise

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, daß die in Dünnschicht- und Festkörpertechnik hergestellten Baugruppen in mancherlei Hinsicht andere Maßstäbe setzen, als sie in der konventionellen Technik mit diskreten Bauelementen üblich sind. Das betrifft sowohl die Bauelemente selbst, d. h. deren realisierbaren Wertebereich oder deren erreichbare Toleranzen, als auch die Baugruppe im ganzen, z. B. ihre zulässige Verlustleistung oder das günstigste Verhältnis von aktiven zu passiven Bauelementen. Nur durch Beachtung aller dieser Eigenschaften und Eigenheiten der jeweils verwendeten Technologie wird ein technisch und ökonomisch sinnvoller Einsatz der mikroelektronischen Technologien in der Gerätetechnik möglich sein. Einen ganz wesentlichen Einfluß auf die Beantwortung der Frage, welche der beiden erwähnten Technologien im betreffenden Fall eingesetzt werden soll, hat jedoch die Konzeption des zu entwickelnden Gerätes selbst. Auf diesen Punkt ist bisher nur andeutungsweise eingegangen worden, und er soll deshalb in den folgenden Abschnitten ausführlicher behandelt werden. Er erfordert eine getrennte Betrachtung der sogenannten analogen und digitalen Schaltungstechnik.

4.1. Unterschiede zwischen Analog- und Digitaltechnik

Unter der analogen oder auch linearen Schaltungstechnik wird eine Technik der Signalverarbeitung verstanden, die es in der Regel mit kontinuierlich verlaufenden Vorgängen zu tun hat. In der Digitaltechnik dagegen werden sprungartig verlaufende Si-

gnale verwendet; im extremen Fall werden nur zwei verschiedene Signalwerte zugelassen (O oder 1; Ein oder Aus). Man spricht dann von einer binären Technik oder Schaltung. An einem Beispiel soll dieser Unterschied zwischen Analog- und Digitaltechnik veranschaulicht werden.

Es sei z. B. die Aufgabe gestellt, auf elektronischem Wege die Drehzahl einer Welle zu messen und anzuzeigen. Der Geräteentwickler oder -konstrukteur muß dazu zuerst eine Gerätekonzeption entwerfen, d. h., er muß angeben, auf der Grundlage welcher Funktionsprinzipien er das von ihm gewünschte Gerät oder (allgemeiner) System aufbauen will. Von den vielen Möglichkeiten, die ihm zur Verfügung stehen, sollen drei typische herausgegriffen werden: eine rein analoge, eine rein digitale und eine gemischt digitalanaloge Lösung.

Bild 93 a zeigt die rein analoge Systemkonzeption. Mit der rotierenden Welle, deren Drehzahl zu messen ist, ist ein Dynamo verbunden. Dessen Ausgangswechselspannung erreicht eine um so höhere Amplitude, je höher die Drehzahl ist. Die Wechselspannung durchläuft einen Verstärker und wird danach in einem Gleichrichter in eine Gleichspannung umgewandelt, die damit ebenfalls der Drehzahl proportional ist. Diese Gleichspannung wird einem Meßinstrument zugeführt.

Der dazu notwendige Verstärker ist ein typischer Analogverstärker. Er muß (in einem festgelegten Aussteuerbereich) streng linear sein, d. h., eine beliebige Eingangsspannung muß eine immer um den gleichen Faktor (nämlich den Verstärkungsgrad) höhere Ausgangsspannung zur Folge haben. Ändert sich der Verstärkungsgrad im Laufe der Zeit oder bei schwankenden Betriebsspannungen, oder ist er von der angelegten Wechselspannungsamplitude abhängig, wird das Meßergebnis verfälscht. Ähnliches gilt für den Gleichrichter. Läßt sich bei ihm aus physikalischen Gründen keine strenge Linearität zwischen Eingangswechsel- und Ausgangsgleichspannung erreichen, so wird die Eichung des Meßgerätes zwar darauf noch Rücksicht nehmen können; jede Abweichung der Gleichrichtereigenschaften (z. B. durch veränderliche Umgebungstemperatur) wird jedoch dann zu einer Fehlanzeige führen.

In Bild 93 b ist eine rein digitale Lösung der gleichen Aufgabe gezeigt. Eine Nockenscheibe auf der zu messenden Welle schließt bei jeder Umdrehung einmal einen Kontakt, so daß ein kurzer

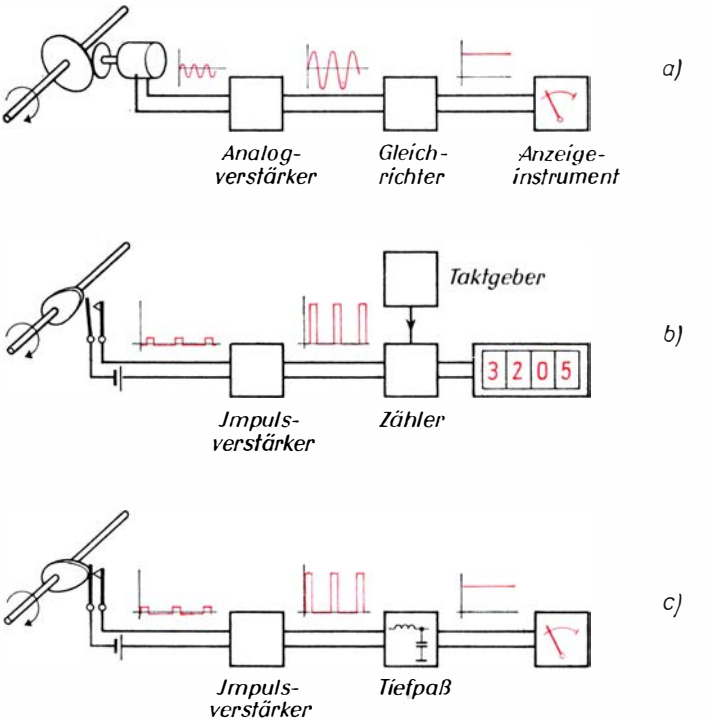


Bild 93. Elektronische Messung einer Drehzahl mit analogem (a), digitalem (b) und gemischt digitalanalogem Verfahren (c)

Spannungsimpuls zum Verstärkereingang gelangt. Die Anzahl der Impulse je Sekunde ist gleich der gesuchten Umdrehungsgeschwindigkeit der Welle. Auch diese Impulse werden verstärkt und gelangen auf einen elektronischen Zähler, der von einem Taktgeber nach jeweils einer Sekunde angehalten wird. Am Zählerausgang erscheint unmittelbar die gesuchte Drehzahl.

An den Impulsverstärker dieser Konzeption werden andere, und zwar weit geringere Anforderungen gestellt. Von ihm wird keine Linearität erwartet, sondern lediglich ein Ausgangssignal dann, wenn die Eingangsamplitude einen bestimmten Wert überschritten hat, also eine Ja-Nein-Entscheidung. Da der nachfolgende Zähler

Tabelle 14. Zusammenstellung analoger Funktionsgruppen

Hauptgruppe	Untergruppe	Wichtigste Merkmale
Verstärkung	Selektivverstärker	Frequenzbereich Bandbreite Rauscheigenschaften Anpassung Verstärkung Phasen- und Amplitudengang Regelverhalten mechanische oder elektrische Durchstimmbarkeit
	Breitbandverstärker	Bandbreite Empfindlichkeit Verzerrungen Leistungsabgabe Rauschen Anpassungswiderstände Regeleigenschaften
Frequenzerzeugung	Oszillatoren	Frequenzbereich Durchstimmbarkeit Amplituden- und Frequenztoleranzen Ausgangsleistung Nebenwellenleistung
	Frequenzteiler	. . .
	Frequenzvervielfacher	. . .
	Frequenzmischer	. . .
Modulation und Demodulation	. . .	usw.

(auf dessen Einzelheiten nicht eingegangen werden soll) ebenfalls nur darauf anspricht, ob ein Eingangsimpuls anliegt oder nicht, darf die Ausgangsamplitude des Verstärkers in gewissen Grenzen schwanken, ohne das Meßergebnis zu verfälschen.
Schließlich ist eine gemischt digitalanaloge Lösung des Problems möglich (Bild 93 c). Nockenwelle, Kontakt und Impulsverstärker werden beibehalten, es folgt jedoch ein einfaches (analoges) Tiefpaßfilter und wiederum ein kontinuierlich anzeigendes Meßinstrument. Wenn dafür gesorgt wird, daß die Impulsbreite und Impulsamplitude unabhängig von der Drehzahl sind, ist die Ausgangsspannung des Filters proportional der Drehzahl und die Anzeige linear. Hier ist also der erste Teil des Gerätes digital, der letzte analog aufgebaut.
Die digitale und analoge Technik sind demnach zwei verschiedene Wege zum gleichen Ziel, nämlich der vorgegebenen notwendigen Funktion des betreffenden Gerätes oder Systems. Welche von den beiden Techniken im speziellen Fall angewendet wird, hängt von einer ganzen Reihe von Einflußgrößen ab.
Bereits aus dem speziellen betrachteten Beispiel erkennt man, daß die digitale Konzeption offenbar einen größeren Aufwand an Funktionsgruppen erfordert, also auch an aktiven, verstärkenden Bauelementen (z. B. Transistoren). Diese Tatsache gilt allgemein und war der Grund dafür, daß bisher analoge Konzeptionen im elektrischen Gerätebau vorherrschten, denn der Preis eines Gerätes wurde in der bisherigen Technik vorwiegend durch die Zahl der notwendigen aktiven Bauelemente bestimmt. Es zeigt sich jedoch, daß diese Begründung für die Wahl einer analogen Lösung nicht mehr in jedem Fall stichhaltig ist, wenn es darum geht, Geräte in vorwiegend mikroelektronischen Technologien zu konzipieren. Das soll durch die Betrachtung der unterschiedlichen Forderungen deutlich gemacht werden, die Digital- und Analogtechnik stellen und die dann ins Verhältnis gesetzt werden sollen zu den Möglichkeiten, die die integrierte Technik bieten kann.

4.1.1. Typenvielfalt der Funktionsgruppen analoger und digitaler Systeme

Ein erster wesentlicher Unterschied zwischen analogen und digitalen elektronischen Baugruppen besteht in ihrer mehr oder we-

niger großen Typenvielfalt. In Tabelle 14 sind einige wesentliche analoge Baugruppen (Verstärker, Frequenzerzeuger usw.) in Untergruppen gegliedert (Selektiv- und Breitbandverstärker, Schwingungserzeugung, -vervielfachung, -teilung usw.), und für einige dieser Untergruppen sind diejenigen Einflußgrößen genannt, die die Eigenschaften des jeweiligen speziellen Bausteins kennzeichnen und in den verschiedenen Anwendungsbereichen selbst noch in sehr weiten Grenzen schwanken. Obgleich die Zusammenstellung nicht vollständig ist, erkennt man doch sofort die ungeheure Vielfalt der Anforderungen, die an analoge Baugruppen gestellt werden. Es hat in der jüngeren Vergangenheit immer wieder Versuche gegeben, diese Vielfalt einzuschränken und »Standardschaltungen« zu entwickeln, die mehrere Funktionen gleichzeitig übernehmen können, also z. B. als Verstärker für die verschiedensten Anwendungsfälle einsetzbar sind. Alle diese Versuche sind gescheitert, solange sie die Technik der diskreten Bauelemente zur Grundlage hatten; die Standardschaltungen waren zu aufwendig und ihr Einsatz deshalb unökonomisch. Selbst unter der Voraussetzung mikroelektronischer Herstellungstechnologien sind einer solchen Standardisierung Grenzen gesetzt, obgleich diese Technologien wesentlich bessere Voraussetzungen dazu mitbringen als die bisherige konventionelle Technik. Man muß sich also damit abfinden, daß analoge elektronische Systeme eine Vielzahl von verschiedenen Grundfunktionen und damit Grundschaltungen verlangen, die dann natürlich nur je ein- oder zweimal in jedem Gerät Verwendung finden.

Grundsätzlich andere Verhältnisse finden sich in der digitalen Technik. Speziell die binären Systeme kommen mit einem Minimum an Grundschaltungen aus. Nur drei Funktionen bilden die Basis aller digitalen Systeme: die Konjunktion (Und-Schaltung), die Disjunktion (Oder-Schaltung) und die Negation. Im Abschnitt 4.3. wird darauf noch näher eingegangen. Der überwiegende Teil z. B. einer elektronischen Rechenmaschine, einer vollelektronischen Vermittlungszentrale oder eines elektronischen digitalen Zählers besteht aus der Zusammenschaltung einer sehr großen Zahl dieser Grundschaltungen.

Diesen Tatsachen seien nun die kennzeichnenden Eigenschaften moderner Mikrotechnologien gegenübergestellt. Wie bereits erwähnt, ist ein wesentlicher kostenbestimmender Faktor sowohl

der Dünnschicht- wie auch der Festkörpertechnik der Aufwand für den Entwurf und die Herstellung der verschiedenartigen Masken, während die Herstellung des Funktionsblocks selbst weitgehend automatisch und um so billiger erfolgt, je höher die verlangte Stückzahl je Typ ist.
Daraus folgt zunächst, daß digitale Systemkonzeptionen hinsichtlich des notwendigen Typensortiments wesentlich bessere Voraussetzungen für den Einsatz integrierter mikroelektronischer Schaltungen bieten als analoge. Ehe betrachtet wird, welche Folgerungen sich aus dieser Aussage ergeben, sollen jedoch erst noch zwei weitere Gruppen wichtiger Eigenschaften digitaler und analoger Systeme untersucht und in gleicher Weise den Möglichkeiten der Mikroelektronik gegenübergestellt werden.

4.1.2. Forderungen an Funktionsgruppen analoger und digitaler Systeme

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal analoger und digitaler Systeme ist, daß bei ersteren die zu verarbeitende Information unmittelbar als kontinuierliche Änderung der Amplitude (auch der Phase oder Frequenz) des elektrischen Signals das System durchläuft, während sie in digitalen Systemen in eine Ja-Nein-Aussage umgewandelt ist.
Daraus folgt unmittelbar, wie bereits am Beispiel der Drehzahlanzeige in Bild 93 diskutiert, daß in einem Analogsystem jede ungewollte Änderung des Systems (verursacht durch irgendwelche Instabilitäten des elektrischen Übertragungsweges) unmittelbar auf das Signal einwirkt und in der Regel von diesem nicht mehr zu trennen ist. Analoge Baugruppen müssen also, je nach ihrem Einsatzzweck, ganz bestimmte und meist recht enge Toleranzen einhalten. Ist die Information in der Amplitude des elektrischen Signals enthalten, muß z. B. die Verstärkung des Übertragungsweges unabhängig von äußeren Einflüssen (Temperatur, Schwankung der Betriebsspannungen) sowie von der Signalamplitude oder auch der Signalfrequenz sein (nichtlineare und lineare Verzerrungen). Handelt es sich dagegen um frequenz- oder phasenmodulierte Systeme, werden ähnliche Anforderungen an andere Parameter gestellt.

Auch in dieser Hinsicht sind digitale Systeme wesentlich weniger anspruchsvoll. Sie gestatten eine Signalregenerierung, eine Eigenschaft, die z. B. in Weitstrecken-Nachrichtensystemen von außerordentlicher Wichtigkeit ist. Signalregenerierung bedeutet, daß selbst ein stark verzerrter (verformter) oder von einem merklichen Rauschsignal überlagerter Impuls vollständig wiederhergestellt werden kann, wenn nur gewährleistet ist, daß der Zustand »Impuls vorhanden« überhaupt noch vom Zustand »Impuls fehlt« unterschieden werden kann. Diese Regenerierung kann beliebig oft wiederholt werden; im Gegensatz zu analogen Verfahren tritt keine Aufsummierung aller unterwegs eingetretenen Signalverfälschungen auf, die dort schließlich zum völligen Unbrauchbarwerden des Analogsignals führen kann. Damit ist es aber auch nicht erforderlich, extrem strenge Maßstäbe an die Stabilität digitaler Schaltungen zu legen. Eine gelegentliche Regenerierung des Signals (die oft sogar automatisch während der Signalverarbeitung erfolgt) ist in der Regel wirtschaftlicher als die Einhaltung extrem enger Toleranzen der elektronischen Baugruppen.
Da ferner die Funktion eines elektrischen Widerstandes in der Festkörpertechnik auf der Halbleitung beruht, die bekanntlich aus physikalischen Gründen temperaturabhängig ist, und da Kondensatoren durch (spannungsabhängige) Sperrschichtkapazitäten verwirklich werden, so wird klar, daß zumindest den Festkörperschaltungen hinsichtlich ihrer Toleranzen Grenzen gesetzt sind. Auch von dieser Seite erweist sich die Digitaltechnik den Möglichkeiten der mikroelektronischen Technologien gegenüber als günstiger.

4.1.3. Forderungen an Einzelbauelemente in analogen und digitalen Systemen

Eben wurde bereits die Forderung nach engen Toleranzen der Eingangs- und Ausgangsparameter einer Funktionsgruppe und damit ihrer Einzelelemente diskutiert. Daneben ist jedoch die Frage nach dem notwendigen Wertebereich der passiven Schaltelemente in der Analog- und in der Digitaltechnik berechtigt.
Auch hier zeigt sich wieder der Vorteil der Digitaltechnik. Sie ver-

langt ein verhältnismäßig geringes Spektrum an relativ weit tolerierten Widerständen — etwa zwischen 10^2 und 10^5 Ω bei einer Toleranz von 10 bis 20 %. Der Wertebereich der notwendigen Kondensatoren läßt sich noch weiter einschränken; in vielen Fällen kommt man sogar ohne Kondensatoren aus. Induktivitäten werden grundsätzlich in logischen Schaltungen nicht benötigt. Demgegenüber verlangt die Analogtechnik Widerstandswerte mindestens zwischen etwa 10^0 und 10^6 Ω bei Toleranzen um 5 bis 20 %, oft noch darunter. Noch größer ist der notwendige Kapazitätsbereich, der sich zwischen 10^{-6} und 10^2 µF bewegt. Schließlich erfordern die frequenzselektiven Glieder in der analogen Schaltungstechnik Induktivitäten zwischen etwa 10^{-6} und 10^2 H (um auch hier wieder nur Richtwerte zu nennen), auf die keinesfalls verzichtet werden kann.

Hier versagt die Festkörpertechnik nahezu völlig. Bereits die Grenzwerte im Spektrum der Widerstände zu erreichen ist praktisch ausgeschlossen. Die erreichbaren Toleranzen der Einzelwiderstände liegen um 20 %, lediglich die Toleranzen der Werteverhältnisse mehrerer im gleichen Substrat befindlicher Widerstände können geringer gehalten werden. Man macht davon z. B. bei der Herstellung von Differenzverstärkern Gebrauch. Das Kapazitätssortiment ist noch weiter eingeschränkt und umfaßt nur ganz geringe C-Werte bei Toleranzen, die für frequenzbestimmende Glieder undiskutabel sind. Die Herstellung von Induktivitäten ist schließlich in der gewohnten Form vollkommen unmöglich.

Nicht ganz so ausweglos sind die Verhältnisse bei der Dünnschichttechnik. Sie erreicht den Wertebereich der Widerstände nahezu vollständig. Mit besonderen Verfahren (Elektronenstrahlfräsung oder Elektronenstrahlabgleich) läßt sich eine Toleranz von 5 % und besser erzielen. Auch die Herstellung von Kapazitäten ist in einem größeren Bereich und enger toleriert möglich als mit der Festkörpertechnik, wenn auch hohe C-Werte ebensowenig ökonomisch realisierbar sind wie allzu geringe Toleranzen. Induktivitäten lassen sich wenigstens mit Werten um einige Mikrohenry als Spiralen oder ähnliche Gebilde aufdampfen. Damit ist hinsichtlich des Bauelementespektrums und seiner Toleranzen nur die Dünnschichttechnik in gewissen Grenzen in der Lage, hohen Forderungen der analogen Schaltungstechnik zu genügen. Die Be-

dingungen der Digitaltechnik lassen sich dagegen auch mit der Festkörpertechnik ohne Schwierigkeiten erfüllen.
Als weiteres Kriterium könnte man die Forderungen und Möglichkeiten hinsichtlich der maximalen Betriebsfrequenz bei analogen Schaltungen bzw. der maximalen Taktfrequenz bei digitalen Schaltungen vergleichen. Hier ergeben sich jedoch keine wesentlichen Unterschiede. Beide Technologien können den an sie gestellten Forderungen genügen; eine Weiterentwicklung besonders der Festkörpertechnik ist jedoch durchaus zu erwarten.

4.1.4. Folgerungen

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der letzten Abschnitte zusammengefaßt. Man erkennt, was bereits mehrmals als Zwischenergebnis deutlich wurde: Die Festkörpertechnik als diejenige Technologie, der man heute die größten Chancen einer Weiterentwicklung einräumt, ist durchaus in der Lage, alle Forderungen zu erfüllen, die von digitalen Systemen gestellt werden. Das volle Spektrum der Anforderungen der Analogtechnik (immer unter der Voraussetzung der heute in der Technik der diskreten Bauelemente vorherrschenden Bedingungen) ist mit Festkörperschaltungen dagegen nicht zu erfüllen und mit Dünnschichtschaltungen nur bedingt.
Daraus lassen sich einige wesentliche Schlußfolgerungen ziehen.
Erstens: Stehen dem Entwickler digitaler elektronischer Systeme sowohl Festkörper- als auch Dünnschichtbausteine zur Verfügung, so wird er sich vorwiegend für erstere entscheiden. Sie erfüllen seine Forderungen, sind zuverlässiger, kleiner und (da in großen Stückzahlen auf dem Markt verlangt) billiger als Dünnschichtschaltungen.
Zweitens: Will der Entwickler analoger Systeme nicht auf die Vorteile mikroelektronischer Technologien verzichten (und das darf er nicht, wenn er in Zukunft technisch und ökonomisch auf dem Weltmarkt konkurrieren will), dann muß er seine bisherige Gerätekonzeption überprüfen und Lösungen suchen, die den Möglichkeiten dieser Technologien entsprechen. Die Vielzahl der zu diesem Ziel führenden Wege läßt sich in drei große Richtungen einteilen.
Der erste Weg wird für die Übergangszeit zwischen der konven-

tionellen Schaltungstechnik mit diskreten Elementen und dem Einsatz integrierter Schaltungen charakteristisch sein. Er heißt: Beibehaltung der bekannten und bewährten Konzeptionen, wobei weitgehend bereits integrierte Schaltungen für Teilfunktionen eingesetzt werden.

Der zweite Weg führt zum Suchen neuer Konzeptionen und Lösungen. Dabei können jedoch im wesentlichen bekannte Verfahren eingesetzt werden, die bisher vielleicht aus ökonomischen Gründen (höherer Aufwand) nicht rentabel waren und sich daher nicht durchsetzen konnten. Sicher werden hierbei bereits digitale Teillösungen in im übrigen analogen Geräten zum Einsatz kommen.

Der dritte, der radikale Weg schließlich führt zur Aufgabe der alten, analogen Konzeption und zur Lösung der Aufgabe mit rein digitalen Mitteln.

Nicht für alle elektronischen Probleme werden alle drei Wege gangbar sein. Für eine Vielzahl von Aufgabenstellungen ist heute keine Möglichkeit bekannt, digitale Verfahren einzusetzen. Es sei z. B. an die Verstärkung, Selektion und Mischung sehr kleiner Hochfrequenzspannungen erinnert — das Grundprinzip der Funkempfangstechnik. Hier wird man die Wege 1 und 2 beschreiten, d. h. eine Digitalisierung in Teilstufen vornehmen (z. B. in der Frequenzerzeugung, bei der Demodulation des frequenzmodulierten Signals, zur Signalanzeige und -verarbeitung usw.) und den verbleibenden analogen Teil (Hoch- und Zwischenfrequenzverstärkung, Mischung usw.) neu und so entwerfen, daß ein maximaler und in technischer und ökonomischer Hinsicht optimaler Einsatz von Festkörper- oder Dünnschichtschaltkreisen möglich wird.

Der folgende Abschnitt wird sich mit der Anwendung mikroelektronischer Technologien in digitalen Systemen befassen. Er kann kurz gehalten sein, da die Einführung der integrierten Technik dort zwar wesentliche technische und ökonomische Vorteile bringt, aber für den Geräteentwickler keine prinzipiellen Umstellungen gegenüber der bisherigen volltransistorisierten Technik erfordert. Daran anschließend soll jedoch in einem ausführlicheren Abschnitt über die Einführung der integrierten Schaltungen in die Analogtechnik gesprochen werden. Die erwähnten drei Wege werden dabei an einigen Beispielen behandelt werden, um heute bereits absehbare Möglichkeiten und Lösungswege aufzuzeigen.

Tabelle 15. Gegenüberstellung der Forderungen der Schaltungstechniken und der Möglichkeiten der mikroelektronischen Technologien

	Forderungen der		Möglichkeiten der	
	Analogtechnik	Digitaltechnik	Dünnschicht-technik	Festkörpertechnik
Typenzahl der Grundschaltungen	hohe Typenzahlen	geringe Typenzahlen	mittlere Typenzahlen	kleine bis mittlere Typenzahlen
Stückzahlen der Einzelschaltungen je Gerät	geringe Stückzahlen	hohe Stückzahlen	mittlere bis hohe Stückzahlen	hohe Stückzahlen
Baugruppentoleranzen	hohe Anforderungen	geringe Anforderungen	größere Möglichkeiten	geringere Möglichkeiten
Wertebereich und Toleranzen der Widerstände	hohe Anforderungen; etwa $10^0 \ldots 10^6\ \Omega$	geringe Anforderungen; $10^2 \ldots 10^5\ \Omega$	mittlere bis große Möglichkeiten	mittlere Möglichkeiten
der Kapazitäten	hohe Anforderungen; $10^{-12} \ldots 10^{-4}$ F	geringe bis keine Anforderungen; $10^{-10} \ldots 10^{-8}$ F	mittlere Möglichkeiten	geringe Möglichkeiten
der Induktivitäten	hohe Anforderungen; $10^{-6} \ldots 10^2$ H	keine Anforderungen	geringe Möglichkeiten	keine Möglichkeiten

4.2. Einsatz in digitalen Gerätekonzeptionen

Noch bis vor wenigen Jahren wurde die Digitaltechnik praktisch allein in der Rechentechnik eingesetzt. Die dort erforderliche hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit war mit analogen Verfahren nicht erreichbar. Auch als in der Phase der Volltransistorisierung der elektronischen Geräte (etwa um 1960) die Digitaltechnik in einige Gebiete der Meßtechnik eindrang, war der Gesichtspunkt der erreichbaren Genauigkeit noch vorrangiger Anlaß dazu. Erst in den folgenden Jahren, in denen sich die Möglichkeiten der heutigen mikroelektronischen Technologien abzeichneten, konnte man daran denken, die Vorteile digitaler Lösungen auch in anderen Gebieten des elektronischen Gerätebaus und für andere Zwecke wirtschaftlich sinnvoll nutzbar zu machen. In Abschnitt 4.3.3. werden dafür einige Beispiele angegeben.
Der Übergang von der Volltransistorisierung der Systeme zum Einsatz mikroelektronischer Baugruppen ging in der Digitaltechnik reibungsloser und schneller vor sich als in der Analogtechnik. Prinzipielle Änderungen in der Gerätekonzeption, wie sie in der Analogtechnik zur Diskussion stehen, waren nicht erforderlich, lediglich gewisse Änderungen der digitalen Grundschaltungen, um eine optimale Anpassung an die Möglichkeiten der mikroelektronischen Technologien zu erreichen. In Abschnitt 4.2.3. wird darauf eingegangen.
Da es nicht Aufgabe dieses Buches sein kann, intensiv die Probleme der digitalen Schaltungstechnik zu diskutieren, beschränken sich die beiden folgenden Abschnitte auf eine prinzipielle Erklärung der digitalen Grundelemente und — gleichzeitig als Beispiel dafür, wie auch in dieser Technik eine Anpassung der vorgegebenen Funktion an die Möglichkeiten der Herstellungstechnologie erforderlich war und zu neuartigen Schaltungskonzeptionen führte — eine Beschreibung der heute gebräuchlichen wesentlichsten Arten digitaler Schaltungen.

4.2.1. Grundschaltungen digitaler Systeme

Praktisch alle digitalen elektronischen Systeme bauen auf einer binären Logik auf, d. h., innerhalb des jeweiligen Systems treten

nur zwei verschiedene Signalwerte auf, die als Ja — Nein, Ein — Aus, L — O oder ähnlich interpretiert werden. (Nur in wenigen Ausnahmefällen werden auch ternäre Systeme eingesetzt, die dann drei oder auch noch mehr Signalwerte unterscheiden, z. B. + 1, 0 und — 1.) Dadurch ergeben sich einige bereits erwähnte wesentliche Vorteile, von denen nur die zwei wichtigsten noch einmal angeführt werden sollen.

1. Jede Funktionsgruppe innerhalb eines digitalen Systems bekommt am Eingang nur eines von zwei überhaupt möglichen Signalen angeboten und muß an ihren Ausgangsklemmen auch nur jeweils eines der beiden möglichen Signale wieder abgeben. Sowohl eingangs- wie ausgangsseitig sind damit gewisse Toleranzen zugelassen, die nur dadurch begrenzt werden, daß man die beiden möglichen Zustände noch klar unterscheiden können muß. Daraus folgt, daß auch die Funktionsgruppe selbst verhältnismäßig weit toleriert sein kann, ohne daß dadurch ihre Funktion beeinträchtigt wird, und daß ferner äußere Störungen bis zu einem gewissen Grade keinen Einfluß auf die ordnungsgemäße Funktion des digitalen Systems ausüben können, solange nämlich auch unter deren Einfluß eine Unterscheidung beider Signalwerte noch gewährleistet ist.

2. Die Beschränkung auf nur zwei mögliche Signalwerte verringert die Zahl der logischen Entscheidungen, die einer digitalen Funktionsgruppe abverlangt werden. Sie verringert damit auch die Zahl der Grundschaltungen, aus denen sich beliebig komplizierte digitale Systeme aufbauen lassen.

Tatsächlich lassen sich mit Hilfe von nur drei Funktionen — der Konjunktion, der Disjunktion und der Negation — und damit nur drei Grundschaltungen sämtliche logischen Entscheidungen realisieren. Es sollen bei der folgenden Erklärung die beiden möglichen Zustände mit »Signal« und »kein Signal« bezeichnet werden.

Konjunktion

Die konjunktive Grundschaltung gibt dann an ihrem Ausgang ein Signal ab, wenn an allen ihren Eingängen gleichzeitig ein Signal anliegt, also an Eingang 1 und an Eingang 2 und an Eingang 3 usw. Es wird deshalb Und-Tor oder Und-Gatter genannt bzw. in der englischen Schreibweise AND-Gatter.

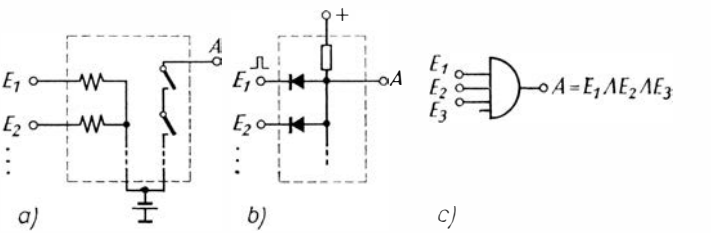


Bild 94. Konjunktion (Und-Gatter) in Relaisdarstellung (a) und mit Dioden (b), (c) zeigt das Schaltzeichen

Ihre elektrische Realisierung läßt sich am einfachsten durch eine Relaisschaltung nach Bild 94a erklären. Jede der Eingangsklemmen E_n des Tores ist mit der Wicklung eines Relais verbunden, das jeweils einen Arbeitskontakt hat. Nur wenn alle Wicklungen gleichzeitig unter Strom stehen und so alle Kontakte gleichzeitig geschlossen sind, entsteht am Ausgang ein Signal.

Bild 94 b zeigt eine Schaltung, die die gleiche Funktion mit elektronischen Bauelementen verwirklicht. Solange auch nur an einem der Eingänge noch kein Signal anliegt ($U_E = 0$), liegt der Punkt A ebenfalls auf 0-Potential und liefert kein Ausgangssignal. Erst wenn an allen Eingängen ein Signal (positive Spannung) anliegt, sind alle Dioden gesperrt, Punkt A nimmt das positive Signal U an und liefert damit ein Ausgangssignal.
Bild 94 c zeigt das Kurzschaltbild eines Und-Gatters.

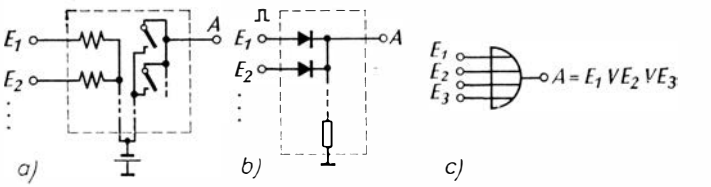


Bild 95. Disjunktion (Oder-Gatter) in Relaisdarstellung (a) und mit Dioden (b), (c) zeigt das Schaltzeichen

Disjunktion

Diese Grundschaltung gibt dann an ihrem Ausgang ein Signal ab, wenn entweder an Eingang 1 oder an Eingang 2 oder an Eingang 3 usw. ein Signal anliegt. Sie heißt Oder-Tor oder Oder-Gatter (OR-Gatter).
Ihre Darstellung als Relaisschaltung führt auf eine Parallelschaltung der Arbeitskontakte der durch die Eingangssignale erregten Relais (Bild 95 a), ihre elektronische Realisierung auf mehrere Dioden, die parallel auf einen gemeinsamen Widerstand arbeiten (Bild 95 b). Wenn auch nur an einem der Diodeneingänge ein Signal anliegt, wird die Diode leitend, und das Signal erscheint am Ausgang.
Bild 95 c zeigt wieder das Kurzschaltbild des Oder-Gatters.

Negation

Diese dritte Grundschaltung kehrt die Aussage über einen Signalwert um, d. h., liegt ihr ein Signal an, liefert sie kein Ausgangssignal; liegt kein Signal an, gibt sie ein Signal an den Ausgang ab.
Diese Funktion läßt sich leicht durch ein Relais mit Ruhekontakt erklären (Bild 96 a). In der elektronischen Realisierung erfordert es ein aktives Element mit Phasendrehung zwischen Ein- und Ausgang, also z. B. einen Transistor (Bild 96 b).

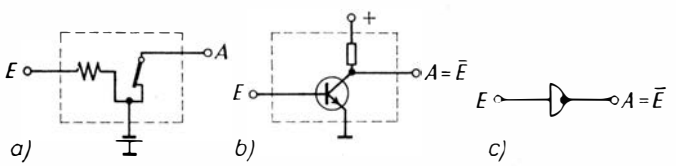


Bild 96. Negation (Inverter)
in Relaisdarstellung (a) und in elektronischer Relaisdarstellung (b), (c) zeigt das Schaltzeichen

Aus diesen drei Grundschaltungen lassen sich alle logischen Systeme zusammensetzen. Durch bestimmte Maßnahmen gelingt es sogar, entweder auf die Und- oder auf die Oder-Gatter zu ver-

zichten. Auch von dieser Tatsache wird im Sinne einer wirtschaftlichen Realisierung digitaler Systeme Gebrauch gemacht.

4.2.2. Wichtigste Kennwerte der digitalen Grundschaltungen

Ähnlich wie es bei analogen Schaltungen üblich ist, werden auch die Eigenschaften digitaler Schaltungen durch bestimmte für die Anwendung wichtige Parameter gekennzeichnet. Davon seien die Verzögerungszeit, die Störfestigkeit, die Verzweigungsmöglichkeit und die Verlustleistung näher erläutert.

Verzögerungszeit

Durch bestimmte Vorgänge in den Sperrschichten der aktiven Halbleiterbauelemente erscheint ein an den Eingang einer logischen Schaltung gelegtes Signal nicht gleichzeitig am Ausgang, sondern um eine gewisse Zeit verzögert. Diese Erscheinung tritt sowohl beim Ein- wie auch beim Ausschaltvorgang auf. Bezeichnet man mit t_e die Einschaltverzögerung, mit t_a die Ausschaltverzögerung, so ergibt sich eine mittlere Signalverzögerungszeit

$$t_p = \frac{t_e + t_a}{2},$$

die allgemein als »Verzögerungszeit« des logischen Elements angegeben wird (Bild 97). Auf die mit den verschiedenen Schaltungsarten erreichbaren Größenordnungen dieser Zeit soll am

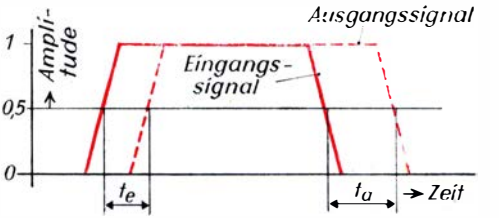


Bild 97. Verzögerung des Signalimpulses in digitalen Schaltungen
t_e Einschaltverzögerung t_a Ausschaltverzögerung

Schluß des Abschnittes eingegangen werden (Tab. 17). Sind — wie im Regelfall — mehrere logische Glieder in Reihe geschaltet, so ist die Verzögerungszeit dieser logischen Kette etwa gleich der Summe der Verzögerungszeiten ihrer Glieder.
Da die Anpassungsverhältnisse am Eingang und Ausgang des jeweiligen Funktionselementes ebenso wie der normalerweise nicht ideal rechteckförmige Verlauf des ansteuernden Impulses die Größe t_p beeinflussen, wird sie in einer Meßschaltung ermittelt, die dem betriebsmäßigen Einsatz weitgehend entgegenkommt. Das zu messende logische Element wird dazu eingangs- und ausgangsseitig mit gleichartigen Elementen abgeschlossen, also tatsächlich als Glied in einer Kette betrachtet.
Die Verzögerungszeit ist von der angelegten Betriebsspannung und der Umgebungstemperatur abhängig. Im Regelfall verringert sich mit wachsender Betriebsspannung die Verzögerungszeit.

Störfestigkeit

Die Störfestigkeit eines digitalen Elements wird durch einen Spannungswert charakterisiert, der gleich derjenigen Gleichspannung ist, die gerade noch keine Änderung des betreffenden Schaltzustandes hervorruft.
Auch diese Größe, die in der Regel zwischen einigen zehntel Volt und etwa einem Volt liegt, ist von Betriebsspannungen und Umgebungstemperatur abhängig, vor allem aber von der gewählten Schaltungskonzeption (s. Abschnitt 4.2.3.).

Verzweigungsmöglichkeit

In praktisch allen digitalen Systemen treten Verzweigungs- und Knotenpunkte der binären Informationen auf. Damit wird z. B. für die in einem Knotenpunkt liegende Schaltung interessant, wieviel gleichartige logische Elemente parallel ihren Eingang ansteuern können. Diese Zahl wird als fan-in der Schaltung bezeichnet. Andererseits interessiert für eine in einem Verzweigungspunkt liegende Schaltung, wie viele Elemente parallel an ihrem Ausgangspunkt angeschlossen werden können, ohne die zulässigen Toleranzen zu überschreiten. Diese Zahl ist gleich dem fan-out der betreffenden Schaltung.

Die Zahl der ein- und ausgangsseitig angeschlossenen Elemente einerseits und die Signalverzögerung der betreffenden Schaltung andererseits sind voneinander abhängig; mit größer werdender Belastung der Schaltung steigt die Verzögerungszeit.

Verlustleistung

Schließlich sei auf die Verlustleistung P_V als wichtigen Kennwert zur Beurteilung eines logischen Elements verwiesen. Sie ergibt sich als Differenz zwischen Leistungsaufnahme P der Schaltung und der abgegebenen Nutzleistung P_N

$$P_V = P - P_N$$

Da P_N in der Regel vom Schaltzustand des logischen Elements abhängig ist, wird oft eine mittlere Verlustleistung angegeben, die sich aus der im Ein-Zustand (P_{V1}) und der im Aus-Zustand (P_{V0}) errechnet:

$$P_{Vm} = \frac{P_{V1} + P_{V0}}{2}$$

4.2.3. Schaltungsarten

Von den logischen Grundschaltungen wird gefordert, daß sie eine Zusammenschaltung zu komplizierten Systemen gestatten und dabei einerseits eine gegenseitige Beeinflussung der Schaltungen durch eine ausreichende Entkopplung vermeiden, andererseits die unvermeidlichen Verluste durch eine eigene Leistungsverstärkung kompensieren. Von der technologischen Seite werden bestimmte, inzwischen mehrfach diskutierte Forderungen hinsichtlich Umfang des eingesetzten Bauelementespektrums, Toleranz der Bauelemente usw. gestellt. Die vielen und oft recht verschiedenartigen Forderungen des Anwenders hinsichtlich Schnelligkeit (zulässige Verzögerungszeit), Störfestigkeit, Zahl und Größe der Betriebsspannungen usw. bei minimalem Preis vervollständigen die Wunschliste.
Es ist naheliegend, daß es keine optimale Realisierungsvariante in dem Sinne gibt, daß alle Forderungen erfüllt und alle Nach-

teile vermieden werden. Es haben sich vielmehr im Laufe der Entwicklung eine Reihe von Schaltungsprinzipien durchgesetzt, von denen die wichtigsten im folgenden genannt werden sollen.

RTL-Technik

Die ersten Serien digitaler Schaltkreise erschienen als Widerstands-Transistor-Logik (RTL), d. h., die Grundfunktionen wurden allein mit Hilfe von Widerständen und Transistoren erreicht (Bild 98 a). Das Eingangssignal wird über einen Widerstand der

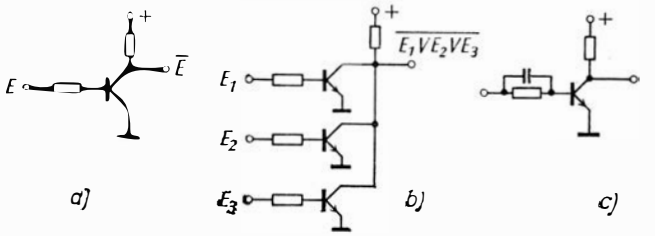


Bild 98. RT-Logik
a) Grundschaltung
b) NOR-Gatter
c) kapazitive Überbrückung des Eingangswiderstandes zur Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit der Stufen

Basis eines Transistors zugeführt, an dessen Kollektor die Ausgangsgröße abgenommen wird. Mehrere dieser Grundschaltungen, die auf einen gemeinsamen Kollektorwiderstand arbeiten, ergeben eine Oder-Schaltung mit anschließender Negation (wegen der Phasendrehung zwischen Transistorein- und -ausgang), ein sogenanntes NOR-Gatter (Nicht-Oder-Gatter, Bild 98 b).
Diese Schaltungstechnik ist noch der konventionellen Technik diskreter Bauelemente entlehnt; die notwendige Bauelementezahl ist minimal, jedoch sind recht eng tolerierte Widerstände notwendig. Durch die Streukapazitäten und die Eingangskapazitäten der Transistoren ergeben sich zusammen mit den hochohmigen Reihenwiderständen Zeitkonstanten, die zu hohen Verzögerungszeiten und damit geringen Schaltfrequenzen führen. Auch das fan-out dieser Logik ist gering.
Durch Überbrückung der Reihenwiderstände durch kleine Konden-

satoren läßt sich zwar das Schaltverhalten verbessern, gleichzeitig verringert sich aber die Störfestigkeit (Bild 98 c).
Diese Technik findet sich heute nur in einem kleinen Teil der angebotenen Festkörperkreise; sie ist mehr für integrierte Schaltungen in Dünnschichttechnik geeignet und wird auch vorwiegend dort eingesetzt.

DTL-Technik

Die Dioden-Transistor-Logik entstand nach der RTL-Technik, aufbauend auf der Grundschaltung des Und-Gatters (s. Bild 94 b) mit nachfolgendem Transistor als Spannungs- und Leistungsverstärker (Bild 99 a). Da auch dabei wieder eine Phasenumkehr er-

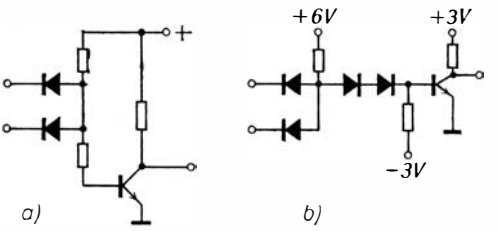


Bild 99. DT-Logik
a) Grundschaltung mit nachgeschaltetem Transistor als Inverter und Leistungsverstärker
b) Variante mit mehreren Betriebsspannungen

folgt, ergibt sich insgesamt ein NAND-Gatter (Nicht-Und-Gatter). Obgleich dieser Schaltungsentwurf noch ein Minimum an Bauelementen anstrebt, stellt er doch einen guten Kompromiß möglichst geringer Verlustleistung und Verzögerungszeit dar; auch die Störfestigkeit ist bei diesem Schaltungsprinzip recht hoch.
Schwierigkeiten treten auch hier durch die geforderten engen Bauelementetoleranzen auf und führten zu einer Reihe von Modifikationen (Einführung einer zweiten und sogar dritten Betriebsspannung, Einfügung von stabilisierenden Dioden anstelle von Widerständen usw., Bild 99 b); gelegentlich werden ebenfalls Kondensatoren zur Verbesserung des Schaltverhaltens eingesetzt.
Die DTL-Technik wird gegenwärtig in recht hohem Umfang in der Festkörper- wie auch in der Dünnschichttechnik angewandt.

TTL-Technik

Die Transistor-Transistor-Logik baute ursprünglich unmittelbar auf der DTL-Technik auf, indem sie die steuernden Dioden ebenfalls durch Transistoren ersetzte (Bild 100 a). Sie löste sich jedoch bald endgültig von den Vorstellungen der konventionellen Schaltungstechnik mit diskreten Elementen, als es ihr gelang, die Vielzahl der nötigen Steuertransistoren am Eingang in einem gemeinsamen, in der diskreten Technik unbekannten Element zu vereinen: im Multiemitter-Transistor (Bild 100 b). Diese Technik ver-

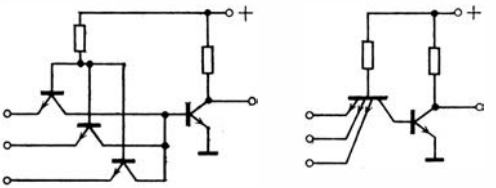


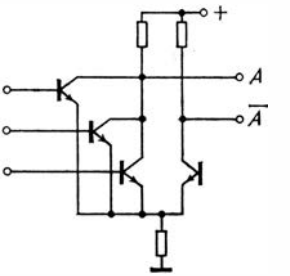
Bild 100. TT-Logik
a) Grundschaltung
b) Variante mit Multiemitter-Transistor

eint hohe Störfestigkeit mit verhältnismäßig geringer Verlustleistung und geringen Verzögerungszeiten; sie ist wegen ihres hohen Aufwandes an Transistoren nur in Festkörpertechnik wirtschaftlich einsetzbar.
Neben den erwähnten Vorteilen sind ein hoher fan-out-Wert dieser Technik und die Notwendigkeit nur einer einzigen Betriebsspannung zu erwähnen. Die TTL-Technik hat sich deshalb in den letzten Jahren sehr schnell und gut eingeführt und kann heute als eine der wichtigsten digitalen Techniken bezeichnet werden.

ECL-Technik

Außer den drei wichtigsten Grundtypen logischer Schaltungen entstand in letzter Zeit die emittergekoppelte Logik (ECL). Sie vermeidet den Betrieb der eingeschalteten Transistoren im gesättigten Zustand, der stets zu Speichereffekten und damit zur Erhöhung der Verzögerungszeit führt. Da das angelegte Eingangssignal eine Stromverschiebung zwischen angesteuertem und Ausgangstransistor verursacht, bezeichnet man diese Betriebsweise

Bild 101. EC-Logik



auch als CML (current mode logic). Am Kollektor des angesteuerten Transistors steht dabei das Ausgangssignal in negierter, am Ausgangstransistor in direkter Form zur Verfügung (Bild 101).
Den Vorteilen dieser Technik (geringe Verzögerungszeiten, hohe Störfestigkeit, komplementäre Ausgänge u. a.) stehen einige wesentliche Nachteile gegenüber (notwendige hohe Konstanz der beiden erforderlichen Betriebsspannungen, hoher Aufwand und Preis), so daß diese Technik bisher nur in geringem Umfang eingesetzt wurde.

Tabelle 16. Vergleich verschiedener digitaler Schaltungstechniken

Technik	Verzögerungszeiten	Störfestigkeit	Verlustleistung
RTL	60 ... 200 ns	250 mV	2 ... 25 mW
DTL	8 ... 80 ns	1 V	5 ... 60 mW
TTL	5 ... 30 ns	1 V	10 ... 40 mW
ECL	2 ... 15 ns	500 mV	10 ... 60 mW

In Tab. 16 werden einige typische Kennwerte für die vier diskutierten Techniken gegenübergestellt.

4.3. Einsatz in analogen Gerätekonzeptionen

In Abschnitt 4.1. wurden drei Wege zum Einsatz der integrierten Schaltungstechnik in analogen Geräten angegeben: Einsatz von analogen Schaltkreisen ohne Änderung der Systemkonzeption; Anpassung der Systemkonzeption an die Möglichkeiten und das

Angebot integrierter Schaltungen, wobei neben analogen auch schon bestimmte digitale Lösungsprinzipien angewendet werden; vollständige Umstellung der Systemkonzeption auf eine rein digitale Lösung des Problems. Nunmehr sollen diese drei Wege näher erläutert werden. Dabei wird bei den Darlegungen des ersten Weges vorwiegend über die Möglichkeiten einzelner Schaltkreise und Funktionsgruppen zu sprechen sein, bei der Diskussion der letzten beiden Wege dagegen mehr über Systemkonzeptionen und prinzipielle Lösungswege.

4.3.1. Grundschaltungen analoger Systeme

Als erster möglicher Weg zum Einsatz mikroelektronischer Baugruppen in analogen Systemen war der teilweise Ersatz von bisher mit diskreten Elementen ausgeführten Funktionsgruppen durch integrierte Schaltkreise genannt worden. Dieser Weg wird vorwiegend in der Übergangsphase bei der Einführung mikroelektronischer Schaltungen bedeutsam sein, jedoch in vielen Fällen überhaupt der einzig gangbare bleiben, nämlich dann, wenn bessere als die bisherigen Lösungswege für die gestellte Aufgabe gar nicht bekannt sind. In diesem Fall entsteht die Frage nach der möglichen Herstellbarkeit der Vielzahl der heute angewendeten Funktionsgruppen in integrierter Schaltungstechnik.
Im vorangegangenen wurde bereits gesagt, daß die Analogtechnik nicht wie die Digitaltechnik auf bestimmte wenige Elementarschaltungen zurückgreifen kann, aus denen sich dann baukastenartig analoge Systeme aufbauen lassen. Trotzdem sind in den vergangenen Jahren viele Typen analoger Festkörperschaltkreise bekannt geworden. Einige von ihnen erreichen dabei die aus ökonomischen Gründen notwendige hohe Fertigungsstückzahl je Typ dadurch, daß sie in vielfältiger Weise variierbar und damit für verschiedene Zwecke sehr universell einsetzbar sind. Andere angebotene Analogschaltkreise dagegen sind ganz speziell für einen bestimmten Anwendungsfall entwickelt und nur dafür einsetzbar; es muß dann gewährleistet sein, daß die Stückzahl der mit diesen Schaltkreisen versehenen Geräte ausreichend groß ist.
Ehe auf das Spektrum der Analogschaltkreise eingegangen wird, das den Raum zwischen diesen beiden Extremen ausfüllt, sollen einleitend die grundsätzlichen Variationsmöglichkeiten der Funktionsgruppe »Verstärker« betrachtet werden.

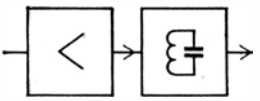
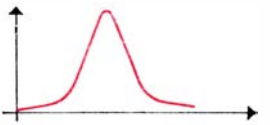
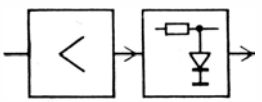
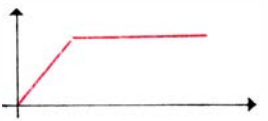
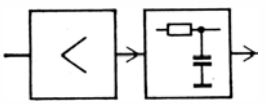
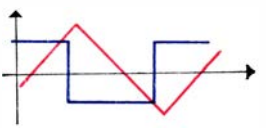
4

Der rückgekoppelte Verstärker

Neben der Forderung, Spannungen, Ströme oder Leistungen zu verstärken, werden an eine Funktionsgruppe in der Regel Nebenbedingungen anderer Art gestellt, beispielsweise die eines bestimmten Frequenzverhaltens. Dazu wird dem eigentlichen (breitbandigen) Verstärker ein passives Netzwerk in Reihe geschaltet. Als wichtigstes Beispiel sei der frequenzselektive Verstärker genannt. Er muß innerhalb eines festgelegten Frequenzbandes eine bestimmte Verstärkung aufweisen, außerhalb dieses Bandes aber sperren, d. h. die Verstärkung Null haben. Diese Aufgabenstellung findet sich in allen Hoch- und Zwischenfrequenzverstärkern der analogen Schaltungstechnik.
Aber nicht nur hinsichtlich des Frequenzganges ist der Verstärker durch zusätzlich in Reihe geschaltete passive Netzwerke ergänzbar. Ebenso beeinflußbar ist natürlich seine (im Idealfall lineare) Amplitudenabhängigkeit. Durch eine nachfolgende Diodenschaltung kann z. B. eine bestimmte Aussteuerungscharakteristik, ein Begrenzungseffekt oder eine Nullpunktunterdrückung erreicht werden. Damit ergibt sich eine erste Gruppe möglicher Einsatzfälle eines durch in Reihe geschaltete zusätzliche passive Netzwerke ergänzten Verstärkerelements (Tab. 17).
Weitere Variationen ergeben sich durch die Einführung einer Mitkopplung oder einer Gegenkopplung zwischen Ausgang und Eingang des Verstärkers. In Bild 102 ist das prinzipielle Schaltbild eines rückgekoppelten Verstärkers dargestellt; ein Teil $kv u_e$ der um den Verstärkungsfaktor v verstärkten Eingangsspannung u_e wird der dem Funktionsblock angelegten Spannung u_1 so zugeschaltet, daß die Verstärkerausgangsspannung sich als Summe oder Differenz (je nach Phasenlage der Rückkopplung) dieser beiden Größen ergibt. Setzt man den Fall der Gegenkopplung voraus, so zeigt eine kurze Rechnung, daß die resultierende Verstärkung V eines solchen Systems aus einem aktiven Element mit der Verstärkung v und einem Rückführungsglied mit dem Übertragungsmaß k sich zu

$$V = \frac{u_a}{u_1} = \frac{v}{1 - kv} = \frac{1}{\frac{1}{v} - k}$$

Tabelle 17. Verstärker mit nachgeschalteter Funktionsgruppe

Zusätzliche Funktionsgruppe mit definiertem	liefert z. B.
	
Frequenzverhalten	Selektivverstärker
	
Amplitudenverhalten	Begrenzerverstärker
	
Zeitverhalten	integrierenden Verstärker

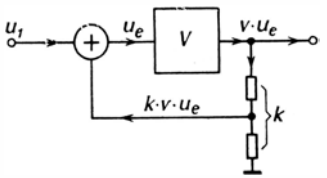
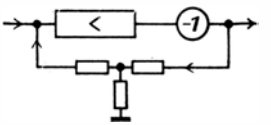
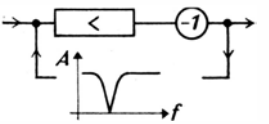
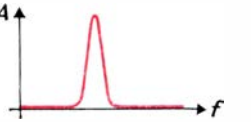
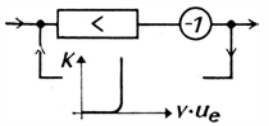
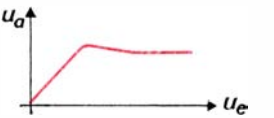


Bild 102
Prinzip eines rückgekoppelten Verstärkers

ergibt, also praktisch unabhängig von v gleich $1/k$ wird, wenn v sehr groß ist. Legt man in den Rückführungsweg einen frequenzunabhängigen Spannungsteiler mit dem Teilverhältnis k, so wird die Gesamtverstärkung des Systems damit von Toleranzen des Verstärkers weitgehend unabhängig und nur durch k bestimmt. Dieses Verfahren kann dann wichtig werden, wenn in ihren Wer-

ten weit streuende mikroelektronische Verstärker eingesetzt werden müssen, kann aber auch zur äußeren Einstellung eines genau definierten, sehr stabilen Verstärkungsgrades oder zur Verstärkungsregelung verwendet werden.
Selbstverständlich gelten die gleichen Verhältnisse auch noch, wenn k eine frequenzabhängige Größe ist. Es entsteht z. B. ein Selektivverstärker, wenn in den Gegenkopplungszweig ein Netzwerk mit einer Nullstelle, also eine Bandsperre, gelegt wird. Ein derartiger Verstärker ist z. B. in Bild 115 dargestellt. Sie gelten

Tabelle 18. Verstärker mit zusätzlicher Funktionsgruppe im Gegenkopplungszweig

Zusätzliche Funktionsgruppe	Ergebnis
 Breitbandspannungsteiler	konstante Verstärkung $\frac{U_a}{U_e} = konst.$
 Bandsperre	 Bandpaß (Selektivverstärker)
 Diodenkennlinie	 Begrenzereffekt

ferner, wenn k nichtlinear, also von der anliegenden Amplitude abhängig ist. Durch Einfügen einer Schaltung mit Dioden- oder Zenerdiodencharakteristik (sperrend bis zu einer bestimmten Schwellspannung, darüber als Kurzschluß wirkend) ergibt sich wiederum ein Begrenzungseffekt; durch Einschalten eines Amplitudenbegrenzers folgt umgekehrt eine Nullpunktunterdrückung (Tabelle 18).
Führt man die Ausgangsspannung gleichphasig auf den Eingang zurück (Mitkopplung), so ergibt sich schließlich bei einer frequenzunabhängigen Rückführung ein Kippvorgang und damit ein bistabiles Verhalten des Systems. Wichtiger ist jedoch der Fall, daß k frequenzabhängig ist. Es wird dann aus dem Verstärker ein Oszillator, der eine Ausgangsspannung mit etwa der Durchlaßfrequenz des Rückführungsgliedes liefert (Tabelle 19).

Operationsverstärker

Aus den eben dargelegten prinzipiellen Betrachtungen erkennt man leicht die Forderungen, die an einen Verstärker zu stellen sind, wenn er in einer derart universellen Weise durch Zuschal-

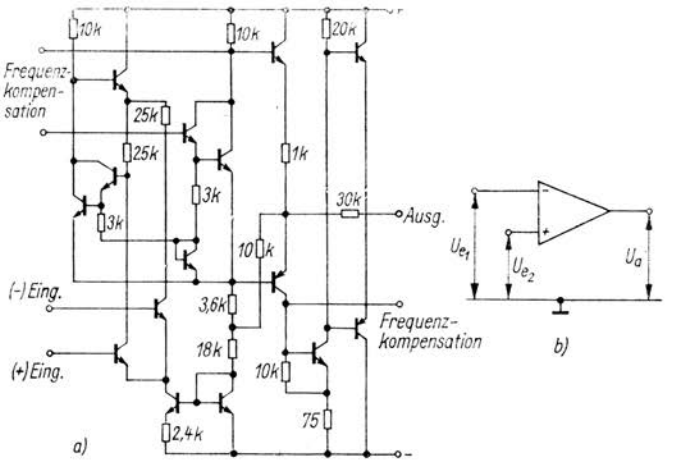


Bild 103. Schaltbild des Operationsverstärkers SN 72 709 (TI) (a) und sein Kurzzeichen (b)

tung äußerer Elemente variierbar und universell einsetzbar sein soll: Er muß eine hohe Verstärkung haben und zur leichten Anschaltung äußerer Netzwerke einen geringen Ausgangs- und einen hohen Eingangswiderstand aufweisen. Da, wie aus den Tabellen 18 und 19 erkennbar ist, der Verstärker sowohl mitgekoppelt als auch gegengekoppelt betrieben werden soll, sind ferner zwei gegenphasige Eingänge erwünscht.
Diese Bedingungen erfüllen in hohem Maße die sog. Operationsverstärker.
Bild 103 a zeigt das Schaltbild eines sehr universell einsetzbaren Typs. Neben den üblichen verstärkertypischen Kennwerten eines Operationsverstärkers (Bild 103 b)

Spannungsverstärkung $v_{\text{Diff}} = \dfrac{U_a}{U_{e1} - U_{e2}}$

Eingangswiderstand $r_e = \dfrac{\Delta U_e}{\Delta I_e}$

Ausgangswiderstand $r_i = \dfrac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$

sind, bedingt durch seinen symmetrischen Aufbau, vor allem diejenigen Parameter wichtig, die die Abweichungen der Symmetrie beschreiben:

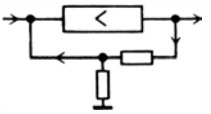
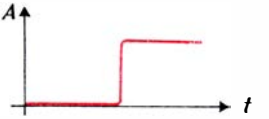
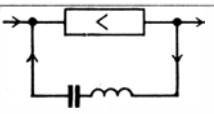
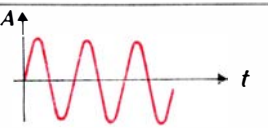
Offsetspannung $U_{off} = U_{e1} - U_{e2}$, damit $U_a = 0$;
Offsetstrom $I_{off} = I_{e1} - I_{e2}$ bei $U_a = 0$;

Gleichtaktunterdrückung $G = \dfrac{v_{\text{Diff}}}{v_{\text{Gl}}}$

v_{Diff} Spannungsverstärkung bei Differenzaussteuerung
v_{Gl} Gleichtaktverstärkung.

Hochwertige Operationsverstärker haben geringe Offsetwerte und eine sehr hohe Gleichtaktunterdrückung.
Die Berechnung der äußeren Netzwerke zur Beschaltung eines Operationsverstärkers wird meist recht einfach, weil gegen dessen hohe Verstärkung die eingangsseitig anliegenden Spannungen und einfließenden Ströme praktisch gleich Null gesetzt werden können. Daraus läßt sich beispielsweise die Verstärkung des gegengekoppelten Operationsverstärkers (Bild 104 a) aus der Knotenregel mit $i_1 + i_2 = i_{e1} = 0$ errechnen:

Tabelle 19. Verstärker mit zusätzlicher Funktionsgruppe im Mitkopplungszweig

Zusätzliche Funktionsgruppe	Ergebnis
	
Breitbandspannungsteiler	Kippverhalten
	
Frequenzselektives Netzwerk	Oszillator

$$\frac{U_e}{R_1} + \frac{U_a}{R_2} = 0 \text{ bzw. } U_a = -U_e \frac{R_2}{R_1}$$

und damit

$$v = \frac{R_2}{R_1} .$$

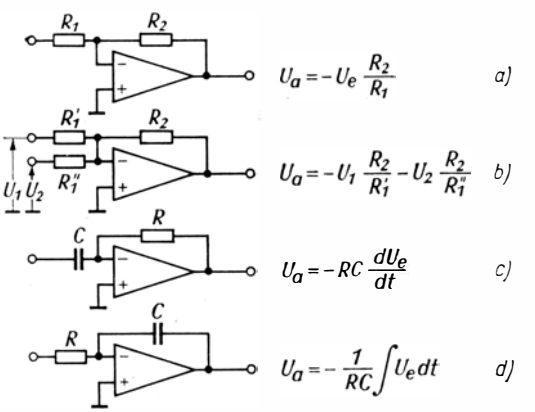


Bild 104. Beispiel für den Einsatz eines Operationsverstärkers als stabilisierter Verstärker (a), Addierglied (b), Differenzierglied (c) und Integrierglied (d)

Entsprechend einfach ergeben sich die in Bild 104 b, c und d angegebenen Beziehungen für die Additions-, Integrations- und Differenzierschaltung. Weitere Variationsmöglichkeiten und spezielle Beschaltungen des Operationsverstärkers finden sich in der Fachliteratur und in den Datenblättern der Hersteller. Es sei lediglich darauf verwiesen, daß die im Anhang genannten typischen Werte nur Richtzahlen und Größenordnungen sein können; spezielle Typen erreichen für den einen oder anderen Parameter z. T. erheblich bessere Werte.

Komparatoren

Dem Operationsverstärker nahe verwandt und dabei gleichzeitig Bindeglied zu den logischen Schaltungen ist der Differentialkomparator. Er vergleicht zwei an seinen beiden Eingängen liegende analoge Spannungen und liefert ausgangsseitig die binäre Aussage, ob U_{e1} größer oder kleiner als U_{e2} ist.
Typische Werte eines universellen Komparators sind im Anhang angegeben. Auch hier liefern spezielle Typen bessere Parameter, so daß die angegebenen nur als Richtwerte aufgefaßt werden dürfen.
Bild 105 zeigt das Übergangsverhalten eines Komparatorschaltkreises (Ausgangsspannung über der Eingangsspannungsdifferenz).

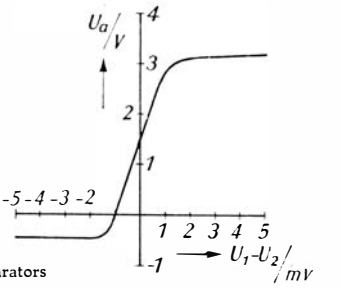


Bild 105. Übergangsfunktion eines Komparators

Differenzstufen als Universalschaltkreise

Die von verschiedenen Herstellern angebotenen und als Differenz- oder Doppeldifferenzverstärker ausgeführten Grundschaltungen sind Universalschaltkreise im weitesten Sinne.
Sie werden vorzugsweise als Verstärkereinheit in HF- und ZF-

Stufen sowie als Oszillatoren, Mischer usw. eingesetzt. Je nach der zugrunde gelegten Schaltung bieten sie obere Grenzfrequenzen von etwa 40 bis 100 MHz. Grundsätzlich nimmt jedoch der Integrationsgrad mit höherer Grenzfrequenz sehr schnell ab. Für Anwendungen im Bereich um 100 MHz enthält der Schaltkreis dann lediglich noch zwei durch einen gemeinsamen Emitterwiderstand gekoppelte Transistoren, die durch einen äußeren (Resonanz-)Kreis zum Selektivverstärker vervollständigt werden müssen.

Bild 106a zeigt das Schaltbild eines für diese Gruppe typischen Schaltkreises.

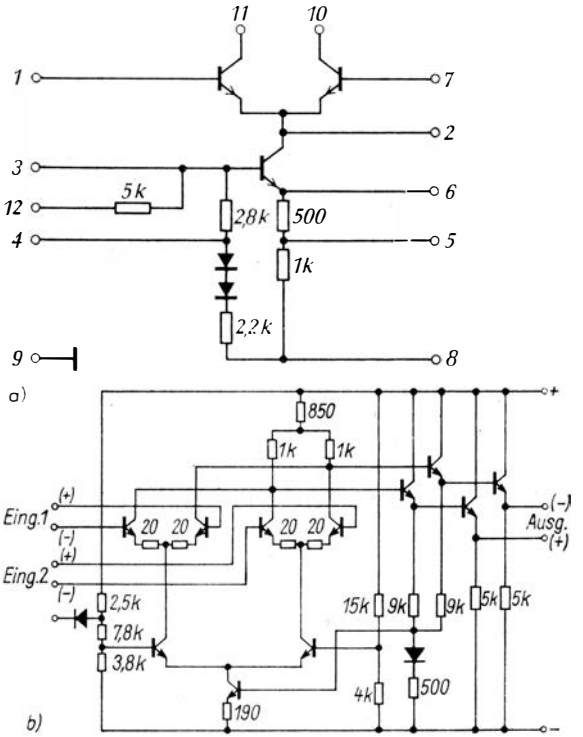


Bild 106. Schaltung eines typischen Differenzverstärkers für universellen Einsatz (CA 3005, RCA) (a) und des mehrstufigen Differenzverstärkers MC 1545 (Motorola) (b)

Bemerkenswert erscheint an dieser Stelle, daß die mit dem Einsatz sehr universeller Schaltkreise der beschriebenen Art erreichbaren Vorteile oft den durch die Nachteile des geringen Integrationsgrades bedingten zusätzlichen Aufwand nicht ausgleichen können. Durch die fast immer notwendige umfangreiche äußere Beschaltung universeller Schaltkreise werden vor allem der ökonomische Nutzen und die Steigerung der Zuverlässigkeit in Frage gestellt. Vorteile ergeben sich allerdings dann, wenn beispielsweise durch die thermische Verkopplung der im Schaltkreis auf gemeinsamem Chip liegenden Transistoren einer Differenzstufe bessere elektrische Parameter zu erreichen sind, als mit diskreten Elementen bei gleichem Aufwand möglich wäre.

Auf dem Prinzip des Differenzverstärkers sind auch drei- und vierstufige Verstärker aufgebaut, die dann als Breitbandverstärker mit symmetrischen Ein- und Ausgängen zur Verfügung stehen. Als typischer Vertreter sei der Schaltkreis MC 1545 (Motorola) genannt. Sein Schaltbild ist in Bild 106 b dargestellt.

Damit ist bei diesen wie bei den vorangegangenen Schaltkreisen zu erkennen, daß auch beim Aufbau analoger Funktionsgruppen ständig wiederkehrende Grundelemente eingesetzt werden (Differenzstufen mit Konstantstromquelle, Darlingtonstufe usw.), ähnlich wie in der digitalen Technik das Gatter als Grundelement eine wesentliche Rolle spielt. Allerdings lassen sich in der Analogtechnik die Anpassungsprobleme nicht so bequem lösen wie beim Gatter, wo im wesentlichen nur der Ausgangslastfaktor als bestimmende Größe in Erscheinung tritt.

Spannungsregelschaltungen

Spannungsregelschaltungen stellen vor allem in monolithisch integrierter Form recht interessante Elemente dar. Der Schaltkreis enthält in der Regel einen temperaturkompensierten Referenzverstärker, eine Vergleichsstufe, einen Ausgangsleistungstransistor und eine Schaltung zur Strombegrenzung. Durch zusätzliche äußere Leistungstransistoren kann der nutzbare Ausgangsstrom praktisch beliebig erhöht werden. Die wahlweise Anschaltmöglichkeit der Ausgangsspannung des Referenzverstärkers auf den

invertierenden oder den nicht invertierenden Eingang der Vergleichsstufe gestattet die Nutzung des Reglers für positive und negative Spannungen. Wichtig sind die sehr geringen Abweichungen und Driften sowie die hohe Welligkeitsunterdrückung und die extrem geringen geometrischen Abmessungen, die die Spannungsregler für sehr viele Zwecke vorteilhaft erscheinen lassen.

NF-Verstärker

Als weitere Gruppe von Analogschaltkreisen ist die der Niederfrequenzverstärker zu nennen. Hier steht bereits nicht mehr der universelle Einsatz im Vordergrund. Schaltkreise dieser Art sind in den meisten Fällen aus den speziellen Anforderungen der Gerätehersteller der Heimelektronik-Industrie entstanden und optimal auf diesen Anwendungszweck zugeschnitten. Da nun allerdings NF-Verstärker in den verschiedensten Bereichen einsetzbar sind, gelingt sehr oft auch die Anwendung der angebotenen Schaltkreise an anderer Stelle.
Da der geforderte Frequenzbereich und die notwendige Verstärkung kein herstellungstechnisches Problem darstellen, variieren die im Angebot befindlichen Schaltkreise hauptsächlich in den Parametern Ausgangsleistung, Linearität und Leerlaufstromaufnahme. Dabei stehen heute Nutzleistungen bis etwa 5 W zur Verfügung.
Bild 107 a zeigt das Schaltbild eines typischen 1-W-NF-Verstärkers

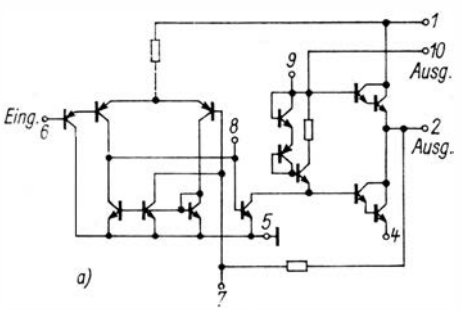


Bild 107. Schaltbild (a) und äußere Beschaltung (b) eines 1-W-NF-Verstärkers (TAA 611, SGS)

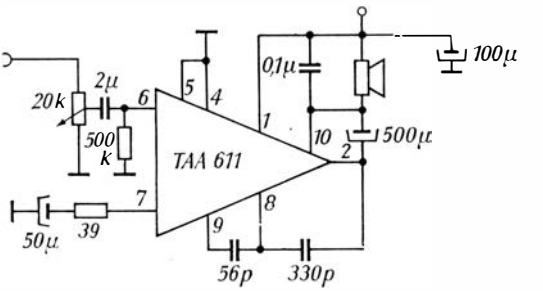


Bild 107 b)

und Bild 107 b den Verstärker mit der notwendigen äußeren Beschaltung. Man erkennt vor allem die nicht integrierbaren Kondensatoren mit hohen Kapazitätswerten sowie den üblichen Lautstärkeregler.

Spezielle Schaltkreise

Mit fortschreitender Verbesserung der mikroelektronischen Technologien wurde es in den vergangenen Jahren auch in zunehmendem Maße möglich, spezielle analoge Schaltkreise in integrierter Form anzubieten. Es ist naheliegend, daß die ersten Anwendungen in Geräten der Heimelektronik erfolgten, weil dort die größten Fertigungsstückzahlen auftreten und somit einen Preis der Schaltkreise ermöglichen, der mit dem Herstellungspreis der mit diskreten Bauelementen aufgebauten Funktionsgruppen konkurrieren kann.
Da das Angebot auf diesem Sektor in ständiger Entwicklung begriffen ist, wird auf die Angabe spezieller Schaltungen und Schaltkreistypen verzichtet. Es stehen heute eine Vielzahl von Rundfunkempfängerbaugruppen (HF- und ZF-Verstärker für AM und FM, mit und ohne Demodulator, Stereodekoder usw.) ebenso zur Verfügung wie entsprechende Schaltkreise für Fernsehempfängerstufen.
Eines der Hauptprobleme bei der Integration von Funktionsgruppen analoger Systeme ist dabei nach wie vor das der Realisierung

der Selektionsmittel, die sehr oft – fast immer – noch als äußere Bauelemente zugeschaltet werden. Auf dieses spezielle Problem soll deshalb anschließend noch besonders eingegangen werden.

Selektion und Schaltungsintegration

Die Trennung von verschiedenen Quellen entstammenden elektrischen Signalen, die über einen gemeinsamen Übertragungsweg zum Empfänger gelangten (z. B. über den Funkweg oder ein mehrfach ausgenutztes Kabel), erfolgt heute entweder mit den Mitteln der Zeitselektion oder der Frequenzselektion (andere Multiplexverfahren sind zwar möglich, werden aber bisher kaum genutzt).
Wenn auch die Zeitmultiplextechnik und die dadurch mögliche Zeitselektion in letzter Zeit mehr und mehr interessant und angewendet wurde — nicht zuletzt deshalb, weil die mikroelektronischen Technologien eine ökonomisch und technisch vorteilhafte Realisierung ermöglichten —, sind doch die meisten heute verwendeten System- und Gerätekonzeptionen auf die Frequenzmultiplextechnik und damit auf die Frequenzselektion abgestimmt. Als Beispiel sei nur auf die Rundfunk- und Fernsehtechnik verwiesen, die ohne die Hilfsmittel der Frequenzselektion nicht auskommt und auch in Zukunft nicht auskommen wird. Das gleiche trifft jedoch auf die meisten Gebiete der kommerziellen Funktechnik zu. Andererseits wurde bereits mehrfach auf die praktische Unmöglichkeit verwiesen, in monolithischer Technik hochstabile Spulen und Kondensatoren — die Kernbauelemente der konventionellen Frequenzselektion — herzustellen.
Es ist verständlich, daß deshalb immer wieder Anstrengungen unternommen wurden, um in dieser Hinsicht Möglichkeiten und Notwendigkeiten aneinander anzupassen.
Ein kleiner Schritt in dieser Richtung scheint noch verhältnismäßig einfach, wie am Beispiel des Aufbaus eines üblichen ZF-Verstärkers gezeigt werden soll. Bisher wurden die zur Erreichung der erforderlichen Frequenzselektion notwendigen passiven Schaltelemente (Filterglieder) nahezu gleichmäßig auf den gesamten Verstärkertrakt verteilt, d. h., es folgten in der Regel Verstärkerstufen und Bandfilter immer abwechselnd aufeinander (Bild

108 a). Diese Variante ist beim Einsatz einer integrierten Schaltungstechnik unzweckmäßig, da eine Vielzahl von Zugriffspunkten zu dem integrierten Schaltkreis notwendig wäre, die seine Größe ebenso wie seine Zuverlässigkeit ungünstig beeinflussen würden. Hier scheint es zweckmäßiger, nach Möglichkeit die Funktionen Verstärkung und Selektion zu trennen (Bild 108 b). Dabei ist die Reihenfolge prinzipiell gleichgültig, praktische Gesichtspunkte können jedoch für die Wahl der einen oder anderen Lösung ausschlaggebend sein (Vermeidung der Übersteuerung des Verstärkers erfordert z. B. die Voranstellung, maximale Unterdrückung seines Eigenrauschens dagegen eine Nachschaltung des Filters). Man spricht in diesem Falle von einer »konzentrierten Selektion«.

Diese Maßnahme ist zweifellos zweckmäßig, löst aber das eigentliche Problem noch nicht, weil ja nach wie vor die Selektionsmittel nicht integriert sind und als äußere Elemente zugeschaltet werden müssen.

Ein naheliegender Ausweg ist es natürlich, einen »Ersatz« für das Bauelement Induktivität zu suchen, d. h. den für sie kennzeichnenden physikalischen Effekt des Nacheilens des Stromes hinter der angelegten Spannung auf andere Weise zu verwirklichen. Tatsächlich ergibt sich ein derartiger Effekt praktisch nebenbei in bestimmten Mehrschichtdioden oder -transistoren, so daß diese Bauelemente dann eine Spule »ersetzen« können. Leider sind die erreichbaren Induktivitätswerte ebenso wie die Güte zu klein; der geringe Variationsbereich, die großen Herstellungstoleranzen und die mangelhafte Stabilität sind weitere Gründe, die einem praktischen Einsatz derartiger Ersatzinduktivitäten bisher im Wege standen.

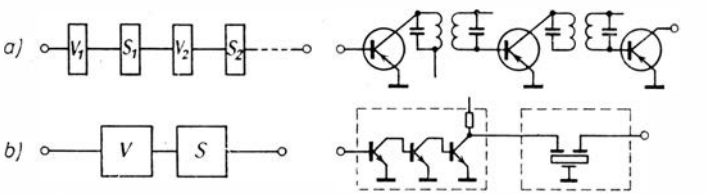


Bild 108. Selektivverstärker
a) mit verteilter und b) mit konzentrierter Verstärkung und Selektion

Prinzipiell lassen sich auch unter Zuhilfenahme aktiver Schaltungen mit kapazitivem Abschluß induktive Eigenschaften herstellen. Es sei nur auf die aus der Röhrentechnik her bereits bekannten Reaktanzschaltungen verwiesen, die sich selbstverständlich auch in Halbleitertechnik aufbauen lassen. Eine weitere Möglichkeit bietet der Negativ-Impedanz-Konverter (NIC). Unter Zuhilfenahme dieser aktiven Glieder ist tatsächlich der Aufbau induktivitätsfreier Schaltungen allein unter Verwendung von Widerständen und Kondensatoren möglich. Aber auch diese Lösung wirft im praktischen Einsatz erhebliche Probleme auf. An die Stabilität der passiven und vor allem auch der aktiven Funktionsgruppen werden höchste Anforderungen gestellt, die nur äußerst schwer einzuhalten sind. Man schätzt ein, daß eine technische Nutzung dieser Netzwerke für schmalbandige Filterschaltungen mit hohen Stabilitätsforderungen in nächster Zeit kaum möglich sein wird.

Man kann aus dem Gesagten schließen, daß der einfache »Ersatz« der Induktivitäten in den heute üblichen Schaltungen durch besser integrierbare Elemente (Transistoren, Widerstände und Kondensatoren) für die breite Anwendung kaum ein zukunftssicherer Weg sein wird. Auch die Herstellung engtolerierter R- und C-Werte ist schließlich durchaus problematisch, und es ist fraglich, ob zukünftige Technologien sich überhaupt noch darauf einlassen werden, diese »historischen« Einzelbauelemente nachzubilden. Man wird sich wohl damit abfinden müssen, daß die LC-Filter eine in der Technik der diskreten Bauelemente optimale Lösung darstellen, die unter den dort geltenden Voraussetzungen zu einem hohen Stand entwickelt wurde und Ausgezeichnetes leistet; in der Technik vollintegrierter Systeme wird man jedoch nach neuen und diesen Verfahren besser angepaßten Lösungen suchen müssen.

Obgleich dieser zweite Lösungsweg ebenfalls in mehreren Richtungen in Angriff genommen worden ist, läßt sich heute noch kein Verfahren absehen, das als universell einsetzbar und optimal anzusehen ist. (Wenn man bedenkt, daß auch in der bisherigen Technik neben den LC-Filtern noch ganz andere Filterarten erforderlich und im Einsatz waren, wird es unwahrscheinlich, daß es einen solchen Universaltyp für alle Frequenzbereiche und alle Selektionsforderungen im Bereich der integrierten Schaltungen ge-

ben wird.) Einige wesentliche Richtungen, soweit heute bekannt, sollen jedoch trotzdem genannt werden.

Wie erwähnt, wurden auch in der konventionellen Technik neben den LC-Filtern andere Filtertypen eingesetzt. Es handelte sich dabei einerseits um Quarzfilter, andererseits um verschiedene Arten sog. mechanischer Filter. In beiden Fällen wurden mechanische Eigenresonanzen bestimmter Körper ausgenutzt, um über geeignete elektromechanische Wandler oder unter Ausnutzung solcher Effekte im Resonanzkörper selbst (wie beim Quarzfilter) elektrische Resonanzeigenschaften nachzubilden. Am bekanntesten ist das mechanische Filter mit Stahlresonatoren und magnetostriktivem Wandler (Bild 109). Daneben wurden in den letzten Jahren piezoelektrische Schwinger als Selektionselemente benutzt und teilweise schon zu mehrkreisigen Filteranordnungen zusammengefaßt. Bei allen diesen Konstruktionen handelt es sich im Grunde bereits um konzentrierte, in sich integrierte Filteranordnungen, wenn sie auch hinsichtlich ihrer Größe und Herstellung noch nicht an mikroelektronische Maßstäbe heranreichen. Von ihnen ausgehend, zeichnen sich jedoch Entwicklungen ab, die zu gewissen Hoffnungen auf volle Integrierbarkeit Anlaß geben. Bild 110 zeigt z. B. die Anordnung von piezoelektrischen Dickenschwingern auf einem Trägersubstrat. Um eine Dämpfung der Schwingungen durch das Substrat zu vermeiden, werden zwischen Schwinger und Unterlage $\frac{\lambda}{4}$-Schichten angeordnet (λ Wellenlänge der mittleren Betriebsfrequenz des Schwingers). Dabei gelingt es gleichzeitig, störende Nebenresonanzen des Schwingers weitgehend zu unterdrücken. Gelänge es, den Prozeß des Aufdampfens der Zwischenschichten und der Resonatorschicht einschließlich der Elektroden zu beherrschen, so wäre dieses selektive Element der Dünnschichttechnologie weitgehend angepaßt und könnte dort voll integriert werden. Filter dieser Art dürften bis etwa 50 MHz einsetzbar sein. Bild 111 zeigt ein Sechskreisfilter auf einer gemeinsamen Trägerplatte.

Eine weitere interessante Variante beruht auf dem Stimmgabelprinzip. Ein den Abmessungen der Festkörpertechnik angepaßter und mechanisch schwingender Resonanzkörper stellt das frequenzselektive Element, nämlich die Torelektrode eines MOS-Transistors, dar. Diese Anordnung (Bild 112) wird als resonant-gate-

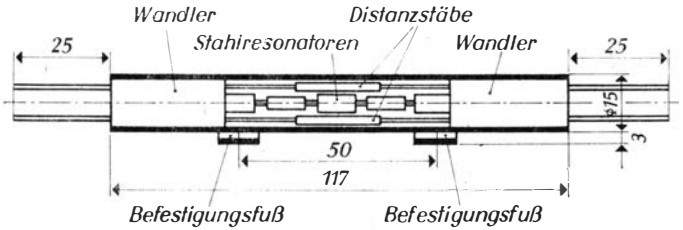


Bild 109. Mechanisches Filter mit Stahlresonatoren und magnetostriktivem Wandler

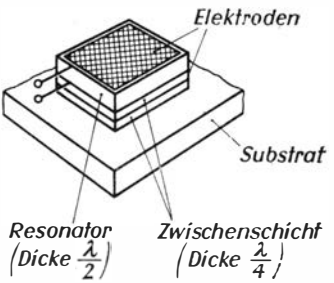


Bild 110. Aufbringen eines piezoelektrischen Resonators auf ein Substrat über $\frac{\lambda}{4}$-Zwischenschichten

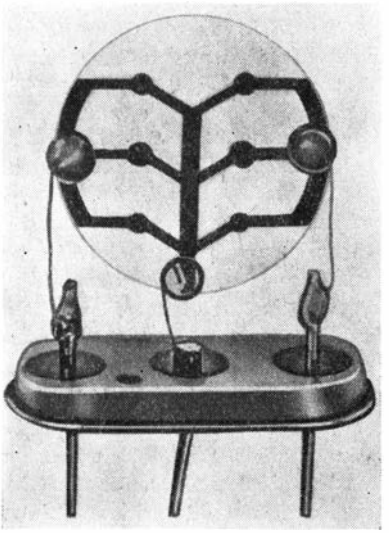


Bild 111. Anordnung von sechs piezoelektrischen Resonatoren eines Filters auf einem gemeinsamen Substrat

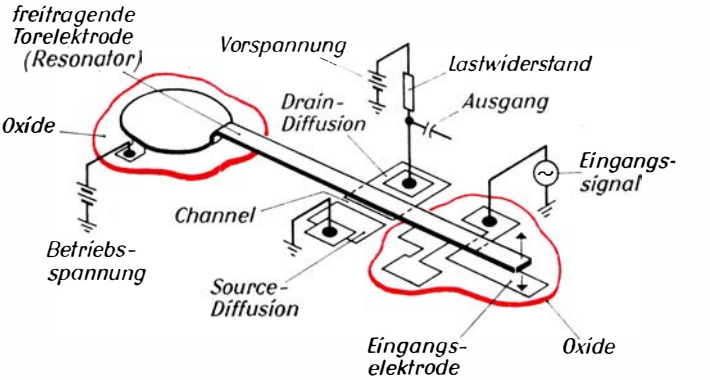


Bild 112. Prinzipaufbau des resonant-gate-Transistors

Transistor bezeichnet. Er läßt sich mit den bekannten Festkörpertechnologien herstellen; die Resonatorlänge beträgt etwa 1 mm. Versuchsausführungen arbeiten im Frequenzbereich um 45 kHz, eine Erweiterung bis 1 MHz wird als möglich erachtet. Ein ähnlicher Aufbau soll bei einer Resonatorlänge von wenigen Mikrometern im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 MHz Gütewerte von etwa 1000 geliefert haben.

Als ein weiteres und letztes, allerdings andersartiges Selektionsprinzip seien schließlich die digitalen Filter genannt. Sie verwenden weder elektrische noch mechanische Resonanzerscheinungen, sondern beruhen auf dem Abtastprinzip, das in Bild 113 erläutert wird. Danach wird das anliegende Signal mehrere Male innerhalb einer Schwingungsperiode abgetastet, und die jeweils vorgefundenen Spannungswerte werden ebenso vielen Speicherkondensatoren über Ladewiderstände zugeführt. In Bild 113 ist dieser Vorgang am Beispiel mechanisch gesteuerter Schalter dargestellt, tatsächlich werden zur Realisierung des Abtastvorganges rein elektronische (digitale) Einrichtungen verwendet.

Stimmt die Drehgeschwindigkeit der Schalterarme mit der Frequenz des Signals genau überein, so wird bei jeder Schalterumdrehung jedes RC-Glied immer wieder den gleichen Spannungswert angeboten erhalten, und der zugehörige Kondensator wird sich nach einiger Zeit auf diesen Wert aufladen. Am Schalterarm

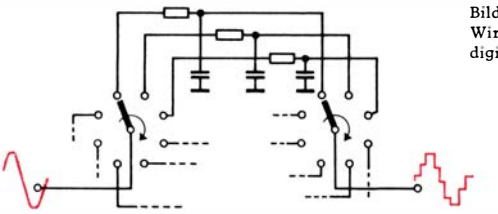


Bild 113. Prinzipielle Wirkungsweise eines digitalen Filters

eines zweiten Schalters, der mit dem ersten synchron läuft und seinerseits die Ladekondensatoren abfragt, entsteht somit das Bild des Eingangssignals wieder. Stimmen Schaltfrequenz und Signalfrequenz nicht überein, erhalten die einzelnen RC-Glieder bei jeder Schalterumdrehung andere positive und negative Spannungswerte angeboten, und über eine längere Zeit gemittelt, gleichen sich die Ladungen an den Kondensatoren aus — die Ausgangsspannung des Filters ist praktisch Null. Man erkennt, daß beim digitalen Filter die »Resonanzfrequenz« durch die Geschwindigkeit der Schalterdrehung, in der realen Ausführung mit elektronischen Schaltern durch die Schaltfrequenz, bestimmt wird. Da diese veränderlich gemacht werden kann, läßt sich ein digitales Filter sehr leicht in weiten Grenzen elektronisch durchstimmen. Sein Nachteil besteht darin, daß es in dieser einfachsten Ausführung eine große Zahl von Nebenresonanzen aufweist.

Das digitale Filter wird heute vorwiegend in der Digitaltechnik, selten als Analogfilter verwendet. Auf eine interessante Anwendung wird in Abschnitt 4.3.3. eingegangen.

Auf einen weiteren möglichen Weg sei abschließend verwiesen: den des Einsatzes der Phase-lock-Technik zur Realisierung von Selektionsproblemen. Grundgedanke dieses Prinzips ist es, einen Hilfsoszillator der empfangenen modulierten Schwingung mit Hilfe eines Regelkreises so nachzusteuern, daß Frequenz und Phase beider Schwingungen stets übereinstimmen. Ein derartiges System hat nicht nur manche Eigenschaften selektiver Funktionsgruppen, sondern ermöglicht darüber hinaus eine optimale Befreiung des empfangenen Signals von Störungen. Die Realisierung sowohl der Regelschaltung als auch des spannungssteuerbaren Hilfsoszillators ist leicht in integrierter Technik möglich. Dabei sind keine Induktivitäten erforderlich, weil das Oszillator-

Ausgangssignal nicht unbedingt sinusförmigen Verlauf aufweisen muß; die bei dreieckförmigem oder rechteckförmigem Verlauf auftretenden Oberwellen können im Laufe der weiteren Signalbehandlung leicht durch nachgeschaltete RC-Selektionsmittel beseitigt werden.
Diese Technik wird heute bereits in bestimmten Schaltkreisen der Rundfunktechnik zur Realisierung spulenloser Stereodekoder verwendet. Sie wurde an dieser Stelle erwähnt, weil sie eine der wenigen aussichtsreichen Verfahren zu sein scheint, an bestimmten (nicht allen) Stellen von der LC-Selektion weg zu integrationsfreundlichen Frequenzselektionsverfahren zu führen. Sie ist jedoch von der Sache her eher in den folgenden Abschnitt 4.3.2. einzuordnen und als ein Beispiel für einen seit langem bekannten, aber früher mit vernünftigem Aufwand nicht realisierbaren (und in der Regel nicht notwendigen) Lösungsweg anzusehen.
Wenn auch mit der vorangegangenen Beschreibung noch kein endgültiger Weg aufgezeigt werden konnte, so erkennt man doch, daß die Integration elektronischer Schaltungen in Zukunft sicher auch den Vorgang der Selektion mehr und mehr miterfassen wird. Es bestehen jedoch kaum Aussichten, die konventionellen und hochentwickelten LC-Filter unmittelbar in die Dünnschicht- und Festkörpertechnik umzusetzen.

4.3.2. Einsatz integrationsfreundlicher Teilkonzeptionen

War es bei der Diskussion des ersten Weges zur Integration von Systemen, wie er im vorangegangenen Abschnitt dargelegt wurde, bereits schwierig, allgemeingültige Möglichkeiten aufzuzeigen, so wird es um so schwerer, wenn es um den Einsatz neuer und für die Anwendung integrierter Schaltkreise günstigerer Konzeptionen in an sich bekannten Geräten und Verfahren geht. Hier muß eine Aufzählung einiger Beispiele einen unvollkommenen Ersatz bieten, solange umfangreiche Erfahrungen noch nicht vorliegen.
Es gibt eine ganze Reihe bekannt gewordener Versuche, bestimmte Gerätefunktionen auf nicht konventionelle, neuartige Weise mit dem Ziel zu verwirklichen, ihren Aufbau in mikroelektronischer Technologie leichter, billiger, technisch vorteilhafter oder sogar überhaupt erst möglich zu machen. Es ist dabei inter-

essant festzustellen, daß in praktisch allen diesen Fällen zwar tatsächlich unkonventionelle, aber durchaus nicht völlig neue Lösungswege gefunden wurden. Offensichtlich ist das Reservoir an solchen elektrischen Schaltungen sehr groß, die durchaus funktionstüchtig sind und bestimmte sehr gute und nützliche Eigenschaften haben, aber in der bisherigen Technik der diskreten Bauelemente nicht wirtschaftlich waren. Das trifft ganz besonders auch auf Lösungen zu, die eine Digitalisierung bestimmter Teilstufen anstreben. Viele der heute angewendeten oder zur Diskussion stehenden Verfahren waren bereits weit vor der Einführung mikroelektronischer Technologien bekannt, meist jedoch so aufwendig, daß ihre durchaus erkannten und anerkannten Vorteile aus wirtschaftlichen Gründen nicht genutzt werden konnten.

Als erstes Beispiel soll der Entwicklungsgang eines Flugzeugbordgerätes verfolgt werden, das folgende einfache Funktion zu erfüllen hatte. Beim Anflug des Landeplatzes überfliegt das Flugzeug nacheinander drei Funkbaken, die auf einer gemeinsamen Trägerfrequenz (75 MHz) mit drei verschiedenen Tonfrequenzen moduliert sind. Diese müssen empfangen, demoduliert und getrennt angezeigt werden, so daß beim Überfliegen der drei Baken jeweils eine von drei zugeordneten farbigen Kontrollampen aufleuchtet. Die gesamte Anlage war bereits in volltransistorisierter Ausführung vorhanden und in Betrieb, so daß bei der gewünschten Umentwicklung des Empfängers mit mikroelektronischen Schaltkreisen keine Möglichkeit bestand, schon von der System-

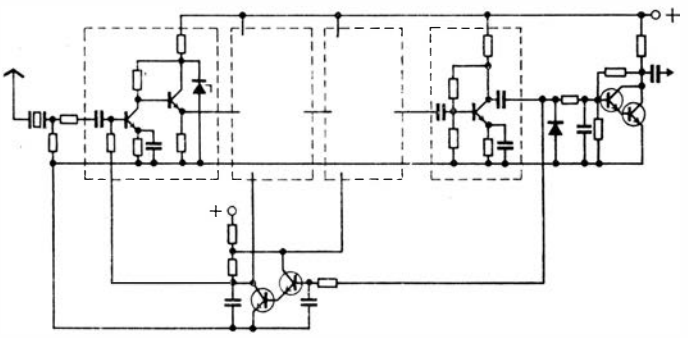


Bild 114. Erster Entwurf eines Funkbakenempfängers in Festkörpertechnik

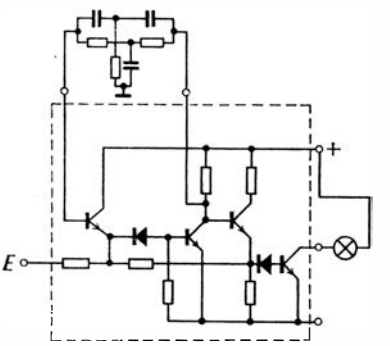


Bild 115. Selektionsteil für den NF-Ton im Funkbakenempfänger mit Doppel-T-Glied

seite auf die Belange der Festkörpertechnik Rücksicht zu nehmen und vielleicht ein günstigeres Modulations- oder Übertragungsverfahren zu verwenden. Es mußte lediglich versucht werden, die im Empfänger erforderlichen Funktionen (Empfang des 75-MHz-Trägers, Demodulation, Trennung der Tonfrequenzen) auf eine möglichst günstige Weise in der Mikrotechnologie zu verwirklichen. Es ist bezeichnend, daß dies nicht in einem Schritt gelang. Der ersten Variante folgte unmittelbar eine zweite, die auf Grund der gesammelten Erfahrungen noch einmal erheblich verbessert werden konnte. Die erste Abweichung gegenüber der ursprünglichen Transistorversion des Gerätes zeigte sich bereits bei der Gestaltung des HF-Teiles: Die Qualität der in der verwendeten Festkörpertechnologie zur Verfügung stehenden Transistoren führte zum Verzicht auf das Überlagerungsprinzip. Der Empfangsteil bis zur Demodulatordiode bestand in der ersten Variante aus drei gleichen, relativ breitbandigen RC-Verstärkerstufen. Zwischen Antenne und Verstärkereingang lag ein Quarzfilter, das die Selektion vollständig übernahm. Diesem HF-Verstärker folgte eine Diodengleichrichtung, deren Gleichspannungsausgang wie üblich zur automatischen Verstärkungsregelung benutzt wurde. Problematisch war dabei die Realisierung der für die große Regelzeitkonstante erforderlichen Kapazität. Die Lösung bestand schließlich in einer zusätzlichen Impedanzwandlerstufe (Darlingtonschaltung) mit sehr hohem Eingangswiderstand, wodurch eine erhebliche Kapazitätsverminderung möglich wurde (Bild 114).

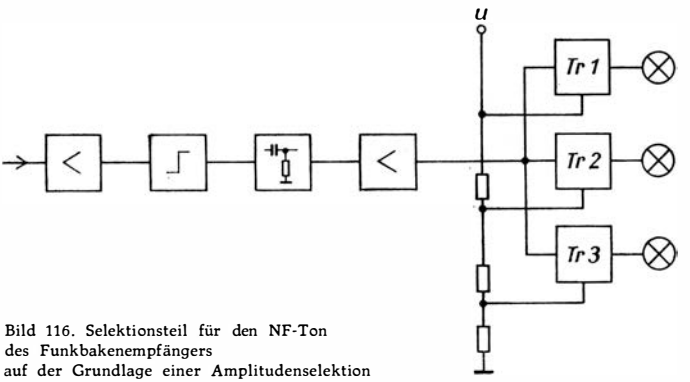


Bild 116. Selektionsteil für den NF-Ton des Funkbakenempfängers auf der Grundlage einer Amplitudenselektion

Im NF-Teil waren nun die drei Tonfrequenzen zu trennen. Die notwendige Frequenzselektivität wurde unter Vermeidung von LC-Netzwerken durch Verwendung von Doppel-T-Gliedern erreicht, die im Gegenkopplungszweig eines zweistufigen Verstärkers lagen; eine Anpaßstufe steuerte schließlich über eine Zenerdiode als Koppelelement einen Schalttransistor, in dessen Kollektorkreis die jeweilige Signallampe lag. Alle drei Auswerteschaltungen waren bis auf die Dimensionierung der RC-Filter identisch (Bild 115); die für diese Filter erforderlichen insgesamt neun Widerstände und neun Kapazitäten mußten sehr eng toleriert sein und wurden deshalb als diskrete Bauelemente eingesetzt.

Bereits mit dieser Variante ergab sich eine Verbesserung gegenüber der volltransistorisierten Ausführung von 1 : 4 in Volumen und Masse, die mittlere Ausfallrate des Empfängers konnte von 10 000 Stunden auf 34 000 Stunden gesteigert werden. Wie erwähnt, folgte dieser ersten Variante sofort eine zweite unter Ausnutzung der gewonnenen Erfahrungen.

In dieser zweiten Variante wurden die Einzelstufen des HF-Verstärkers vereinfacht und nun alle gleichartig ausgeführt, dafür wurde eine Stufe mehr verwendet. Lediglich die vorletzte unterscheidet sich von den vorangegangenen durch einen zusätzlichen äußeren Widerstand im Basisspannungsteiler, und die letzte koppelt über einen externen Schwingkreis unter Anpassung die HF-

Leistung an den Diodenkreis. Der auch hier wieder im Regelkreis zur Impedanzwandlung eingesetzte Darlingtonverstärker wird im Gesamtgerät ebenfalls fünfmal verwendet.

Der wesentliche Unterschied der zweiten Variante besteht jedoch im Auswerteteil. Dort wurde das von der Transistorvariante des Gerätes her übernommene Frequenzselektionsprinzip endgültig verlassen und statt dessen eine Amplitudenselektion verwendet. Die jeweils ankommende Modulationsfrequenz wird dazu in einem Begrenzerverstärker auf gleiche Amplitude gebracht und über ein als frequenzabhängige Dämpfung wirkendes RC-Glied mit nachgeschaltetem Gleichrichter geleitet, an dessen Ausgang nun drei verschiedene Gleichspannungen erschienen, je nachdem, welche der drei Tonfrequenzen empfangen wurde. Dieser Gleichrichterausgang liegt drei Triggerschaltungen an, deren Ansprechpegel den drei Spannungswerten angepaßt sind und die je eine Signallampe steuern (Bild 116).

Man erkennt, daß bei der Lösung dieser speziellen Aufgabe tatsächlich Schaltungen zum Einsatz kommen, die in bisheriger Technik viel zu aufwendig gewesen wären, daß aber andererseits keinesfalls nur rein technische Gesichtspunkte, sondern durchaus auch wirtschaftliche Überlegungen die endgültige Variante bestimmt haben, denn sonst hätte man vermutlich auf den nichtintegrierbaren Schwingkreis im HF-Verstärker verzichtet.

Als weiteres Beispiel seien die von der Firma Standard Elektrik Lorenz AG durchgeführten Untersuchungen angeführt, die zum Ziel hatten, einen UKW-Rundfunkempfänger von seiner Konzeption her weitgehend den Möglichkeiten der integrierten Schaltungstechnik anzupassen. Da als wesentliches Hindernis für eine automatisierbare Fertigung wiederum die 10,7-MHz-ZF-Filter auf-

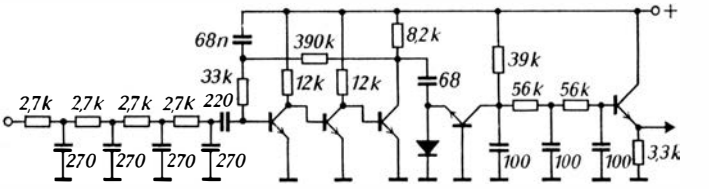


Bild 117. ZF-Teil und Diskriminator des für Herstellung in integrierter Technik entworfenen FM-Empfängers

traten, wurde eine extrem kleine Zwischenfrequenz von nur 120 kHz gewählt. Diese Frequenz ist klein genug, um sie mit geringem Filteraufwand — einem vierstufigen RC-Glied — von den hochfrequenten Mischprodukten zu trennen und anschließend in einem Breitbandverstärker verstärken zu können. Zur Frequenzdemodulation wird das Impulszählverfahren verwendet, das eine größere Linearität als die üblichen Frequenzdemodulationsverfahren (Ratiodetektor oder Diskriminator) hat und ebenfalls ohne Induktivitäten arbeitet. Damit ist vom Eingang des ZF-Verstärkers bis zum NF-Ausgang keine einzige Induktivität, keine engtolerierte Kapazität und damit auch kein Abgleich notwendig. Der HF-Teil konnte unter Beachtung einiger durch die niedrige Zwischenfrequenz bedingter Besonderheiten nahezu konventionell aufgebaut werden, da die dort notwendigen Induktivitäten so klein sind, daß sie mühelos als Spiralen aufgedampft oder aufgedruckt werden konnten. Der Abstimmdrehkondensator — ein ebenfalls nichtintegrierbares Bauteil — wurde selbstverständlich durch eine Kapazitätsdiode ersetzt, die eine Durchstimmung des gesamten UKW-Bandes erlaubt. In Bild 117 ist die Schaltung des ZF-Verstärkers und des anschließenden Zählfrequenzdemodulators dargestellt. Das zwischen 45 und 195 kHz schwankende Zwischenfrequenzsignal wird durch das vierstufige RC-Filter von HF-Komponenten getrennt und in einen dreistufigen direktgekoppelten Breitbandverstärker, der bis in die Begrenzung übersteuert wird, verstärkt. Die am Kollektor des dritten Transistors stehende Rechteckspannung wird differenziert, so daß an den Stellen der abfallenden Flanken jeweils kurze, formgleiche, negative Impulse entstehen (die durch Differenzierung der ansteigenden Flanken entstehenden positiven Impulse werden durch die Diode abgeleitet). Die Zahl dieser Impulse je Sekunde ist gleich dem jeweiligen Wert der Zwischenfrequenz. In einem weiteren zweistufigen Filter wird aus dieser Impulsfolge der quasi-Gleichstrommittelwert ausgesiebt, der ebenfalls unmittelbar proportional der mittleren Impulsrate ist und damit das frequenzdemodulierte NF-Signal darstellt. Sieht man von dem einen in seiner Größe unkritischen 68 nF-Kondensator ab, erkennt man, daß im gesamten Schaltbild nur vier verschiedene C-Werte vorkommen, die in Dünnschichttechnik herstellbar sind; passive oder aktive Elemente mit engen Toleranzen werden grundsätzlich nicht verwendet.

Auf eine weitere interessante Variante für den Empfang amplituden- oder frequenzmodulierter Sendungen (Rundfunk- oder TV-Signale) kann hier nur verwiesen werden. Es wird dabei, aufbauend auf dem klassischen Synchrodynempfänger, der Gedanke weitergeführt, die Zwischenfrequenz zu Null werden zu lassen, so daß auch dort anstelle eines aufwendigen ZF-Verstärkers lediglich ein viel einfacherer Breitbandverstärker angewendet werden kann.

4.3.3. Umstellung auf digitale Verfahren

Dieser letzte, konsequenteste Weg der Umstellung bisher mit analogen Mitteln verwirklichter elektronischer Probleme auf digitale Lösungen wird aus physikalischen Gründen oder wegen des noch ungenügenden Standes unserer Kenntnisse nicht in allen Fällen gangbar sein. Man wird ihn jedoch in der Zukunft sicher weiter verfolgen, und zwar nicht nur deshalb, weil die mikroelektronischen Herstellungsverfahren elektronischer Funktionsgruppen es fordern. Auch von der Seite des Systems her, das ja bestimmte (und in der Regel von Jahr zu Jahr härtere) Bedingungen erfüllen muß, ist die Tendenz zur Digitalisierung spürbar und in einigen Fällen heute schon zwingend. Solche Bedingungen können eine geforderte sehr hohe Meßgenauigkeit oder ein erweiterter Meßbereich elektronischer Meßgeräte, die notwendige Störanfälligkeit von Nachrichtenübertragungs- oder Nachrichtenverarbeitungssystemen (z. B. Rechenmaschinen oder Regel- und Steuereinrichtungen), die notwendige Automatisierung oder leichtere Bedienbarkeit elektronischer Geräte überhaupt u. v. a. sein. Anschließend wird auf einige konkrete Beispiele dazu eingegangen.
Die wirtschaftliche Realisierung digitaler Systeme setzt ein umfassendes Angebot an preisgünstigen Mikroelektronikbausteinen, speziell Festkörperschaltkreisen, voraus, denn die durch den steigenden Aufwand gegenüber einer analogen Lösung (wenn sie überhaupt möglich ist) gestiegenen Kosten können nicht allein durch eine erreichte höhere Zuverlässigkeit, Störanfälligkeit, Servicefreundlichkeit usw. abgefangen werden, wenn auch diese Faktoren durchaus bei der Diskussion des zu wählenden Lösungsweges zu berücksichtigen sind. Die Möglichkeit einer automati-

schen und preisgünstigen Fertigung der digitalen Bausteine ist somit eine Grundvoraussetzung für eine Großanwendung digitaler Verfahren. Darauf wurde früher bereits eingegangen.
Stellvertretend für viele andere Gebiete der Elektronik soll die Tendenz zur Digitalisierung an einigen Beispielen aus der Nachrichtentechnik, der Meßtechnik und der Rechentechnik dargestellt werden.

Einsatz digitaler Verfahren in der Nachrichtentechnik

Der Bedarf an Nachrichtenkanälen, speziell auch an Telefonkanälen, steigt in der ganzen Welt immer stärker an. Deshalb besteht in allen hochentwickelten Industriestaaten die Notwendigkeit, die vorhandenen Telefonleitungen im Ortsamtsbereich mehrfach auszunutzen, um das vor allem in dichtbebauten Gebieten außerordentlich kostspielige Verlegen neuer Kabel zu vermeiden. Dieses Problem ist technisch seit langem lösbar und wird auf Fernstrecken seit Jahrzehnten angewendet. Mehrere Telefoniekanäle werden ebenso vielen Trägerfrequenzen aufmoduliert und diese gemeinsam über ein Kabel oder eine Richtfunkstrecke übertragen. Die dazu am Eingang und am Ausgang der Übertragungsstrecke erforderlichen Trägerfrequenzgeräte standen auch für die vorliegende Aufgabe zur Verfügung, es erwies sich jedoch, daß ihr Einsatz erst bei einer Leitungslänge von mindestens 25 km wirtschaftlich vertretbar war. Für kürzere Streckenlängen war die Verlegung neuer Kabel immer noch billiger als die erforderlichen Trägerfrequenzgeräte. Dieses Problem läßt sich auch durch eine moderne Fertigung der Trägerfrequenzgeräte kaum lösen, da diese eine Vielzahl sehr kritischer LC-Filter enthalten, die einerseits mit mikroelektronischen Technologien nicht erfaßbar sind und andererseits einen hohen Aufwand an manueller Abgleicharbeit erfordern.
An dieser Stelle erwies sich der Einsatz der Digitaltechnik als einziger Ausweg. Durch den Ersatz der in den Trägerfrequenzgeräten angewendeten Einseitenbandmodulation und der nachfolgenden frequenzmäßigen Schachtelung der Einzelkanäle durch eine Pulskodemodulation und zeitliche Schachtelung der entstehenden binären Impulsfolgen gelang es, das jahrelange offen-

stehende Problem zu lösen und die wirtschaftliche Grenze für Mehrfachausnutzung der Kabel bis auf etwa 10 km zu verringern, wodurch ein umfassender Einsatz möglich wurde. Das dabei angewandte technische Verfahren — die Pulskodemodulation — ist seit etwa 30 Jahren bekannt, aber infolge ihres großen schaltungstechnischen Aufwandes bisher nur in Einzelfällen eingesetzt worden. Erst durch das Vorhandensein billiger, kleiner und zuverlässiger digitaler Schaltkreise in Mikroelektronik wurde die wirtschaftliche Nutzung dieses Verfahrens auf breiter Ebene möglich.

In Bild 118 ist das Prinzip eines Pulskodemodulators und in Bild 119 das der Zeitschachtelung mehrerer Kodefolgen verschiedener Teilnehmer dargestellt. Das Analogsignal des Teilnehmers wird durch kurze Impulse im Takt von 8 kHz (also alle 125 µs) abgetastet, d. h., der momentane Amplitudenwert des Signals wird festgestellt. Diese Abtastproben 1, 2 usw. gelangen in den eigentlichen Kodierer. Er realisiert im Prinzip zwei Funktionen. Zuerst wird die Größe der Amplitudenprobe gemessen. Der Kodierer kann dabei in der Regel 128 diskrete Werte zwischen möglichem Größt- und Kleinstwert unterscheiden; treten Zwischenwerte auf, rundet er auf. Die gemessene Größe, eine Zahl zwischen 0 und 127, wird jetzt in dem zweiten Funktionsblock innerhalb des Kodierers in eine 7stellige Dualzahl umgewandelt. Den Kodierer verläßt also eine Folge von 7 Binärzeichen je Abtastung, die die momentane Amplitude des Signals angibt.

Die Gesamtlänge des Kodewortes kann prinzipiell bis zu 125 µs betragen (danach beginnt bereits das folgende Kodewort). Macht man es jedoch kürzer, so bleibt bis zur nächsten Probe ein Zeitintervall frei, indem Kodeworte anderer Kanäle übertragen werden können. Das ist das Prinzip der in Bild 119 dargestellten

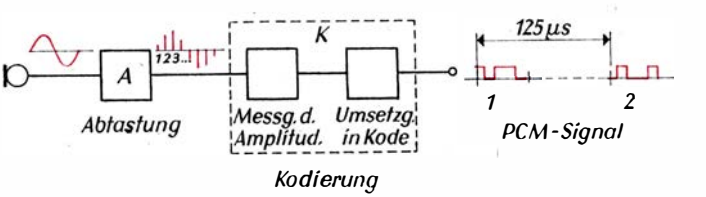


Bild 118. Prinzip des Pulskodemodulators

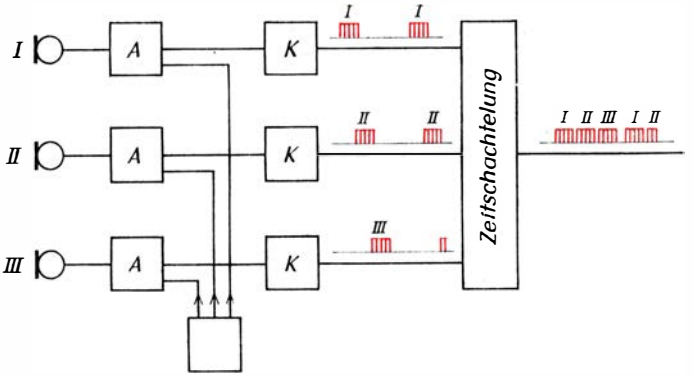


Bild 119. Prinzip der Zeitschachtelung der kodierten Abtastproben mehrerer Signale I, II und III

Zeitschachtelung: Drei Mikrofone I, II, III liefern die Analogsignale, die in A abgetastet und in K kodiert werden. Wenn jedes Kodewort das Intervall nur zu einem Drittel ausnutzt, können alle drei Impulsfolgen zeitlich ineinander geschachtelt und über eine gemeinsame Leitung zum Empfänger übertragen werden. Dort erfolgt die Rückaufteilung vollkommen gleichartig mit Hilfe eines in Bild 119 nicht gezeichneten Synchronzeichens, das eine Kanalverwechslung vermeidet. Ein derartiges Plusmodulationssystem mit Zeitschachtelung der einzelnen Kanäle verwendet keine Misch- und Filtervorgänge und entsprechend keine kritischen Filter, sondern läßt sich allein mit digitalen Schaltungen realisieren.

Selbstverständlich sind es nicht nur Fragen der Wirtschaftlichkeit, die zum Einsatz digitaler Verfahren zwingen. So werden z. B. zur Übertragung extrem starker Bündel von Telefonkanälen (in der Größenordnung 30 000 und mehr), mit denen man bereits in den nächsten Jahren rechnen muß, anstelle von Kabeln Hohlleiter eingesetzt werden (H_{01}-System). Dieses Verfahren hat die unangenehme Eigenschaft, bei starken Krümmungen des Hohlleiters Signalverzerrungen zu verursachen, die bei Verwendung der üblichen analogen Modulationsverfahren unzulässige Werte annehmen. Auch hier wird deshalb die Pulskodemodulation zum

Einsatz kommen, die gegenüber solchen Einflüssen weniger empfindlich ist und durch gelegentliche Regenerierung der Impulse in Zwischenverstärkern gestattet, die aufgelaufenen Störungen vollkommen wieder zu beseitigen. Diese Möglichkeit der Regenerierung gestörter Signale ist allein bei bestimmten digitalen Übertragungsverfahren möglich und auch der Grund für den zu erwartenden stärkeren Einsatz von Pulsmodulationsverfahren in Funksystemen, die bei sehr hohen Frequenzen (größer als 12 GHz) arbeiten, da in diesem Frequenzbereich bereits mäßige Regenfelder zwischen Sender und Empfänger oder zwischen zwei Relaisstellen starke Dämpfungseinbrüche zur Folge haben. Weitere Gesichtspunkte für den Einsatz digitaler Verfahren können schließlich die notwendige Zusammenarbeit mit nachrichtenverarbeitenden Systemen (elektronischen Rechen- und Datenverarbeitungsmaschinen) sein oder auch ganz bestimmte, neuartige Eigenschaften digitaler Nachrichtennetze, die sich mit analogen Verfahren überhaupt nicht erreichen lassen. So wurden z. B. in den letzten Jahren sog. »random access«-Systeme bekannt, die die konventionelle Art der geordneten Zeitschachtelung verlassen und auf statistischer Basis arbeiten. Diese Impulssysteme haben die Eigenschaft, einen beliebigen Zugriff vieler angeschlossener Teilnehmer zum Netz zu gestatten. In einem solchen Nachrichtensystem wird ein Teilnehmer niemals einen Besetztzustand vorfinden, der ihm den Zugang zum Nachrichtennetz verwehrt. Es wird dort lediglich die Qualität der Übertragung mit steigender Netzbelegung schlechter, wodurch andere Teilnehmer veranlaßt werden, ihre Gespräche abzukürzen und so die Leitungen weniger zu belasten. Dieses »selbstregelnde Verhalten« eines Nachrichtennetzes ist mit analogen Verfahren bisher nicht erreichbar.

Einsatz digitaler Verfahren in der Meßtechnik

Wieder andere Gründe sind es, die in der Meßtechnik zur Anwendung digitaler Verfahren führen. Bereits vor der Einführung der Mikroelektronik waren die Anforderungen an die Meßgenauigkeit und den Bedienungskomfort soweit gestiegen, daß bestimmte Meßvorgänge auf digitale Verfahren zurückgeführt werden mußten. Dadurch gelang dann eine digitale Meßwertanzeige

durch unmittelbare Zifferndarstellung. Neben digitale Verfahren der Frequenzmessung traten bald solche der dekadischen Frequenzerzeugung, die ebenfalls weitgehend von digitalen Systemen Gebrauch macht. Nach Einführung der mikroelektronischen Technologien gelang es, dieses hinsichtlich der technischen Möglichkeiten wie auch der Einfachheit der Bedienung vorbildliche Verfahren über die Meßtechnik hinaus auch in der Gerätetechnik zum Einsatz zu bringen; so existieren heute Funkgeräte, die jede Frequenz im Kurzwellenbereich mit einer Genauigkeit von einigen Hertz dekadisch einzustellen gestatten.

Das in der Frequenzmeßtechnik naheliegende Zählprinzip (Auszählen der Schwingungszahl innerhalb einer z. B. durch einen Quarzoszillator vorgegebenen festen Zeitspanne) wurde ebenfalls bereits recht früh auf die Messung von Spannungen angewendet.

In Bild 120 ist eine von sehr vielen Realisierungsmöglichkeiten dieses Prinzips dargestellt. Ein Taktgeber T startet gleichzeitig eine linear ansteigende Sägezahnspannung und einen Impulsgenerator I. Dieser gibt nun solange Impulse an einen Zähler ab, bis die Sägezahnspannung den anliegenden, zu messenden Spannungswert U erreicht hat; in diesem Moment $t = t_1$ wird der Impulsgenerator wieder blockiert. Die Zahl der am Zähler aufgelaufenen Impulse ist dann dem Spannungswert U proportional und kann ziffernmäßig angezeigt werden. Meßgeräte dieser Art gehörten bereits als volltransistorisierte Geräte zum internationalen Angebot der Meßgeräteindustrie; die ersten mit Festkörperschaltkreisen bestückten Geräte sind inzwischen erschienen und bei einem geringeren Preis merklich kleiner als die volltransistorisierte Gerätegeneration.

Nahezu alle digitalen Meßgeräte nutzen heute die Vorteile der digitalen Meßwertdarstellung auch insofern, als sie die unmittelbare Anschaltung von Einrichtungen zum automatischen Ausdrucken bzw. Weiterverarbeiten der Ergebnisse gestatten. Dieser Gesichtspunkt — die Einheit der Meßwerterfassung, -verarbeitung, -übertragung und -auswertung auf digitaler Grundlage — gewinnt mehr und mehr an Interesse und Wichtigkeit.

Als weiteres prägnantes Beispiel für das Eindringen digitaler Techniken in Gebiete, die bisher allein den analogen Schaltungen vorbehalten waren, sei die Konzeption eines Rauschgenerators erwähnt. Derartige Generatoren haben die Aufgabe, ein Signal,

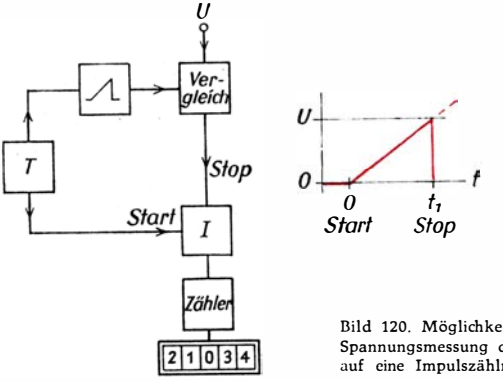


Bild 120. Möglichkeit der digitalen Spannungsmessung durch Zurückführen auf eine Impulszählmessung

dessen Leistungsdichte innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes konstant ist (»weißes Rauschen«), zu erzeugen und abzugeben. In der Regel wird ein solches Signal unmittelbar mit Hilfe von Bauelementen mit einem starken Eigenrauschen gewonnen (hochohmige Widerstände, Vakuumdioden) und lediglich bandbegrenzt bzw. in die gewünschte Frequenzlage umgesetzt. Im vorliegenden Fall waren besondere Forderungen zu erfüllen. Um reproduzierbare Messungen zu ermöglichen, sollte das Signal zwar Zufallscharakter haben, aber mit einer bestimmten Periodendauer wiederholbar sein. Weiterhin waren Rauschbandbreiten weit unter 1 Hz gefordert, um bestimmte Regelkreise ausmessen zu können. Die erstgenannte Bedingung ist ohne den Einsatz von Speichern (z. B. Tonband) mit den üblichen Mitteln gar nicht zu erfüllen, die zweite nur sehr schwer, da die abgegebene Leistung der Rauschquellen sich in gleichem Maße vermindert, wie die Bandbreite verringert wird, und noch dazu im niederfrequenten Bereich durch verschiedene Einflüsse unkontrollierbare Verhältnisse entstehen, die sog. »farbiges« Rauschen entstehen lassen.
In dem angeführten Meßgerät wurde dieses Problem der Erzeugung einer analogen Rauschspannung erstmalig mit digitalen Mitteln gelöst (Bild 121). Der Kern des Gerätes ist ein Schieberegister, d. h. eine digitale Einheit, die im Takte eines fremden und frequenzveränderlichen Impulsgebers an ihrem Ausgang sehr lange binäre Zahlenfolgen abgibt (quasi-Zufallszahlen). Durch

Wahl bestimmter Rückkopplungen innerhalb des Schieberegisters läßt sich die Länge dieser Zufallszahlengruppen und damit ihre Periodizität verändern, im vorliegenden Fall zwischen 15 und 10^6 bit. Weiterhin ist die Taktfrequenz des Registers in weiten Grenzen veränderlich, von 1 MHz (1-µs-Impulse) bis 0,003 Hz (333-s-Impulse). Eine derartige quasi-Zufallszahl hat in einem bestimmten Frequenzbereich das geforderte »weiße« Spektrum, d. h. die konstante Leistungsdichte über der Frequenz. Dieser Bereich wird durch ein nachfolgendes Filter herausgetrennt, an dessen Ausgang somit das gewünschte analoge Rauschsignal erscheint. Durch Wahl der Taktfrequenz ist dabei (ohne Leistungsverminderung!) die Bandbreite des Rauschsignals zwischen 0,00015 Hz und 50 kHz veränderlich, die Wiederholzeit durch Wahl der Wortlänge zwischen 15 µs (Wortlänge 15 bit; 1-µs-Impulse) und 11 Jahren (Wortlänge 10^6 bit; 333-s-Impulse). Da es praktisch unmöglich ist, Analogfilter für den Bereich der tiefsten Frequenzen zu bauen, wurde ein digitales Filter eingesetzt (s. Abschnitt 4.3.1. und Bild 108), dessen Taktfrequenz mit der des Schieberegisters identisch ist. Es konnte sogar das Schieberegister gleichzeitig zur Wahrnehmung der Funktion des Digitalfilters mit herangezogen werden. Durch ein nachfolgendes unkritisches RC-Filter wurde die treppenförmige Ausgangsspannung des Digitalfilters noch geglättet.

Dieses Beispiel dürfte deutlich machen, welche Möglichkeiten digitale Verfahren bieten können, selbst in den Fällen, wo offenbar rein analoge Probleme vorliegen.

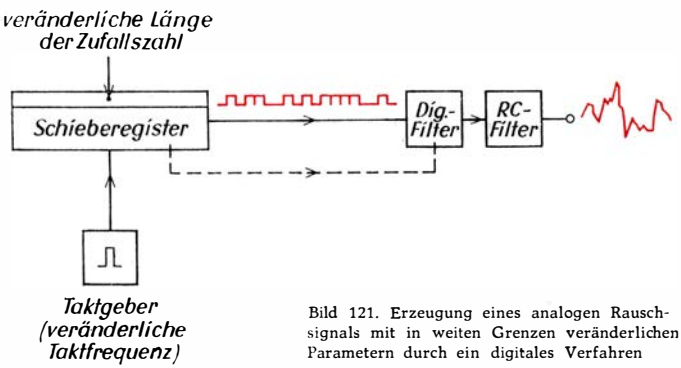


Bild 121. Erzeugung eines analogen Rauschsignals mit in weiten Grenzen veränderlichen Parametern durch ein digitales Verfahren

4

Einsatz digitaler Verfahren in der Rechentechnik

Zur Ergänzung sei ein weiterer Gedanke aus der analogen Rechentechnik angeführt (auf die digitalen Rechner einzugehen erübrigt sich an dieser Stelle, da deren Funktion ebenso wie die an sie gestellten Genauigkeitsforderungen ausschließlich mit digitalen Mitteln erreichbar sind). Ein Problem dieser Technik, in der bekanntlich als analoge Spannungswerte anliegende Eingangsgrößen verarbeitet und als analoge Spannungswerte wieder ausgegeben werden, besteht darin, auch kleine Signalspannungen bei möglichst großer Bandbreite (und damit großer Rechengeschwindigkeit) im Rechner zu verarbeiten. Auch diese rein analogen Probleme lassen sich nach ersten Versuchen an einer amerikanischen Universität digital lösen. Die angelegten analogen Eingangssignale durchlaufen dazu einmalig einen Analog-Digitalwandler A/D (Bild 122). An seinem Ausgang entsteht eine statistische Folge binärer Impulse, von der nur gefordert ist, daß ihr zeitlicher Mittelwert proportional dem jeweiligen Wert des Analogsignals ist (die mittlere Impulsrate ist wesentlich höher als die höchste Signalfrequenz). Ein derartiger Wandler läßt sich verhältnismäßig leicht aufbauen. In der nun folgenden Rechenschaltung werden nur noch diese Impulsfolgen verarbeitet, mit denen sich alle nötigen Rechenoperationen leicht durchführen lassen. Besonders auffällig ist der geringe Aufwand, der jetzt zur Multiplikation zweier Größen notwendig ist (Bild 123). Der Multiplikator besteht aus einem einfachen Und-Tor, an dessen Eingängen die zu multiplizierenden Größen e_1, e_2 und e_3 nach Digitalwandlung zugeführt werden. Da die Wahrscheinlichkeit, daß an allen drei Eingängen gleichzeitig Impulse anliegen (nur dann entsteht am Ausgang ein Impuls), gleich dem Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Impulses an den Eingängen 1, 2 oder 3 ist und diese Einzelwahrscheinlichkeiten der mittleren Impulsrate und damit vereinbarungsgemäß dem Eingangssignal proportional sind, ist die mittlere Impulsrate am Torausgang proportional dem Produkt der drei Eingangsgrößen. Durch eine einfache Rückkoppelschaltung und einen weiteren A/D-Wandler läßt sich diese Multiplikationsschaltung leicht in eine Divisionsschaltung verwandeln. Durch genügend kurze Im-

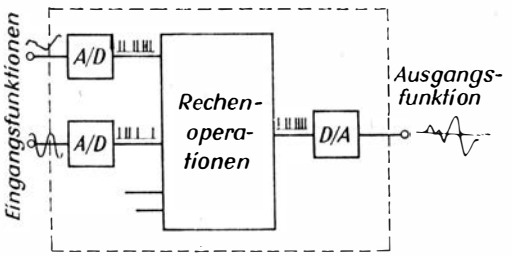


Bild 122. Variante eines Analogrechners auf digitaler Basis; in A/D wird das anliegende Analogsignal in eine Zufallsfolge binärer Impulse verwandelt, dessen mittlere Häufigkeit in jedem Moment der anliegenden analogen Amplitude proportional ist

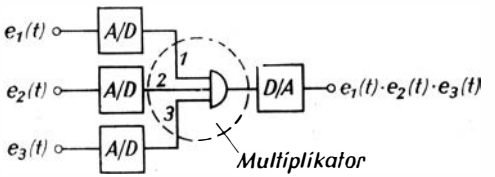


Bild 123. Verwirklichung des Multiplikationsvorgangs in dem in Bild 122 gezeigten System durch ein Und-Gatter

pulse und hohe mittlere Impulsraten wird es für möglich erachtet, Analogsignale mit Bandbreiten bis zu 500 MHz auf diese Weise im Rechner zu verarbeiten.

5

Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung der integrierten Schaltungstechnik

Der Übergang zur integrierten Schaltungstechnik und eine Konsolidierung der Herstellungstechnologien erfolgen beim gegenwärtigen Entwicklungsstand zwangsläufig, weil Probleme, wie sie in modernen elektronischen Geräten auftreten, mit den bisherigen Mitteln und Möglichkeiten sowohl technisch als auch ökonomisch nicht mehr sinnvoll lösbar sind. Sowohl die modernen Datenverarbeitungsanlagen, welche in räumlich konzentrierter Form einen beträchtlichen Umfang aufweisen, als auch Nachrichtenanlagen, die den gleichen Umfang im Rahmen komplexer Nachrichtennetze erreichen, erfordern bei einem Aufbau mit diskreten Elementen eine derartige Vielzahl einzelner Bauelemente und Verbindungen, daß die resultierende Zuverlässigkeit, die entstehenden Kosten und die sich ergebenden Abmessungen eine praktische Realisierung unmöglich machen würden. Die weitere Entwicklung der Elektronik wird deshalb in den nächsten Jahren durch einen zunehmenden Übergang zur integrierten Schaltungstechnik und eine stürmische Weiterentwicklung der Herstellungstechnologien für integrierte Schaltkreise gekennzeichnet sein. Bild 124 veranschaulicht den zunehmenden Einsatz integrierter Schaltkreise am wachsenden Produktionsvolumen an Festkörperschaltkreisen im Zeitraum von 1965 bis 1970.

Für die Verbesserung der Herstellungstechnologien bieten sich auch bei dem erreichten hohen Stand noch einige Ansatzpunkte. Nach einer Entwicklungszeit von etwa einem Jahrzehnt ist dies trotz der bereits erreichten und sicher bewundernswerten Perfektion, die zu einem wesentlichen Teil auf Arbeiten im Zusammen-

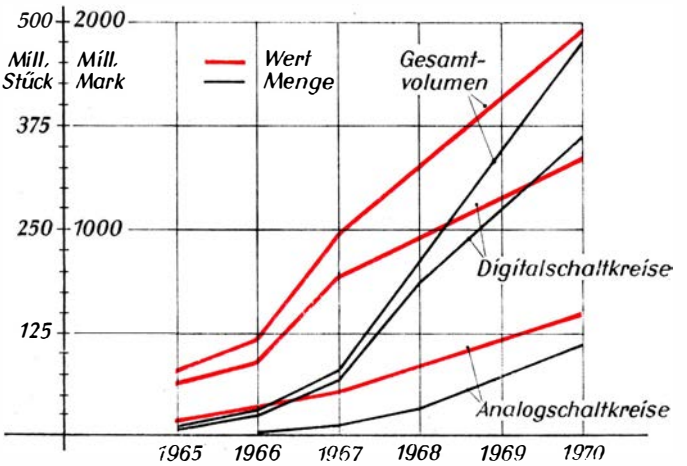


Bild 124. Entwicklung des Produktionsvolumens der USA an Festkörperschaltkreisen im Zeitraum von 1965 bis 1970

hang mit diskreten Planarbauelementen zurückgeht, durchaus verständlich. Probleme, die auf die technischen und ökonomischen Schaltkreisparameter entscheidenden Einfluß haben können, sind die Verbesserung der Transistoren hinsichtlich ihres Schalt- und Frequenzverhaltens, die Verwirklichung von Transistoren hoher Leistungsfähigkeit bei niedrigem Arbeitspunkt und die Signalverarbeitung bei verringerten Pegeln sowie die Schaffung der technologischen Voraussetzungen für die Integration von Elementen mit speziellen pn-Übergängen, die Anwendung der gleichzeitigen Mehrfachkontaktierung der Schaltkreise anstelle der bisher vorwiegend angewandten Thermokompression, die Senkung der Verkappungskosten und die wirtschaftliche Herstellung einer dielektrischen Isolation u. a.

Ein wesentlicher Punkt bei der weiteren Entwicklung ist die Erhöhung des Integrationsgrades. Aus den Forderungen nach einer ökonomischen und zuverlässigen Gerätetechnik hervorgehend, zwingt die zunehmende Komplexität der Schaltkreise zu einem hohen Grad der Automatisierung des Entwurfs und der Herstellung integrierter Schaltkreise. Da die integrierte Technik als aus-

gesprochen automatisierungsfreundlich anzusprechen ist, bereits heute LSI-Schaltkreise verfügbar sind und MSI-Schaltkreise eine bestimmende Rolle spielen, läßt sich der Trend in diesem Punkt leicht einschätzen. Die im vorangegangenen Abschnitt angesprochenen Detailprobleme werden jedoch dafür sorgen, daß Sprünge und Abweichungen vom voraussichtlichen Weg nicht ausbleiben. Insgesamt wird diese Entwicklung zu einer Konzentration auf wenige Schaltkreishersteller führen. Bereits 1967 entfielen etwa 70 % des Produktionsvolumens der USA auf vier führende Unternehmen.

Neben der eigentlichen Zielstellung im Zusammenhang mit der Erhöhung der Komplexität vor allem der digitalen Schaltkreise finden die Arbeiten in Richtung auf einen automatisierten Schaltkreisentwurf auch in der flexibleren Fertigung linearer Schaltkreise ihren Niederschlag.

Die in den letzten Jahren erzielten technologischen Verbesserungen schlagen sich in der in Bild 125 dargestellten Preisentwicklung nieder. Die besonders frappierenden Preissenkungen bei den linearen Schaltkreisen sind, ebenso wie der in Bild 124 zum Ausdruck kommende wachsende Anteil am Produktionsvolumen,

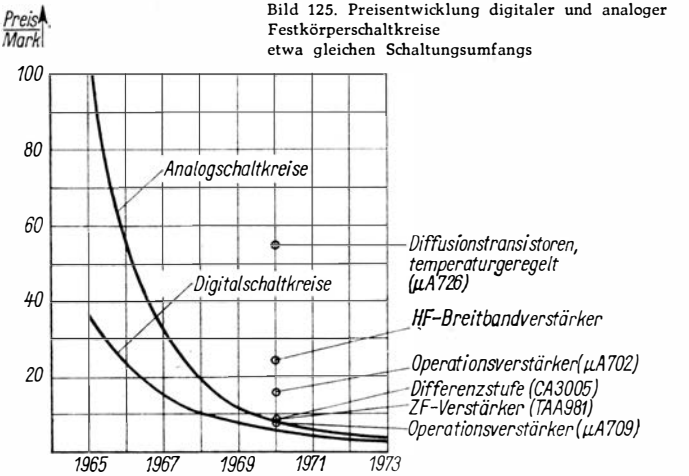


Bild 125. Preisentwicklung digitaler und analoger Festkörperschaltkreise etwa gleichen Schaltungsumfangs

sicher am engsten mit der technologischen Entwicklung verknüpft. Nicht unerwähnt darf allerdings bleiben, daß sich die Analogkurve auf Schaltkreise bezieht, die in relativ großen Serien hergestellt werden. Richtwerte für speziellere oder erst im Anlauf befindliche Typen geben die direkt eingetragenen Punkte.

Auf die Struktur der elektronischen Industrie gewinnt der zunehmende Einsatz integrierter Schaltkreise einen bestimmenden Einfluß. Die Entwicklung und Fertigung der Geräte wird mit fortschreitender Zeit im steigenden Maße aus dem Zusammenfügen bzw. Verarbeiten separat hergestellter Schaltkreise bestehen. Diese Tendenz wird verstärkt durch die Tatsache, daß mechanische und elektromechanische Lösungen bestimmter Probleme, wie die Abstimmung von Resonanzkreisen, in steigendem Umfang durch elektronische Lösungen, und bewickelte Bauelemente (Übertrager und Selektionsmittel) durch Anpassungsnetzwerke bzw. aktive RC-Schaltungen oder mechanische Resonatoren ersetzt werden. Dadurch verschiebt sich das Verhältnis zwischen den im Gerätewerk selbst hergestellten Teilen eines Gerätes und den für das Gerät bezogenen Fremdteilen entsprechend Bild 126. Gleichzeitig bewirkt eine sinnvolle Ausdehnung der sich in der Schaltkreisfertigung durchsetzenden Automatisierung (Nutzung von Rechnern für die Vorbereitung der Fertigungsunterlagen und Steuerung von Fertigungs- und Prüfungsprozessen) auf die Geräteentwicklung und -fertigung eine Senkung des für ein bestimmtes Gerät aufzuwendenden Arbeitsumfanges, was im Bild durch ein Absinken des Lohnanteils zum Ausdruck kommt.

Der wachsende Kostenanteil für »Fremdmaterial« bringt für die Geräteherstellung eine Verringerung der Fertigungstiefe. Darüber hinaus geht die Führung in den meisten Fällen vom Geräte- auf den Bauelemente- bzw. Schaltkreishersteller über, weil letzterer in steigendem Umfang den technischen Fortschritt bestimmen wird. Ein Betrieb, der sich bisher ausschließlich mit der Fertigung von Geräten beschäftigte, muß deshalb offensichtlich entweder selbst Schaltkreise in sein Fertigungsprogramm aufnehmen oder sich eng mit einem einschlägigen Betrieb zusammenschließen, wenn er Bedeutung und Gewinn behalten will. Umgekehrt steht zu erwarten, daß Hersteller von Festkörperschaltkreisen ihrerseits vollen Gewinn aus den Schaltkreisen ziehen möchten und

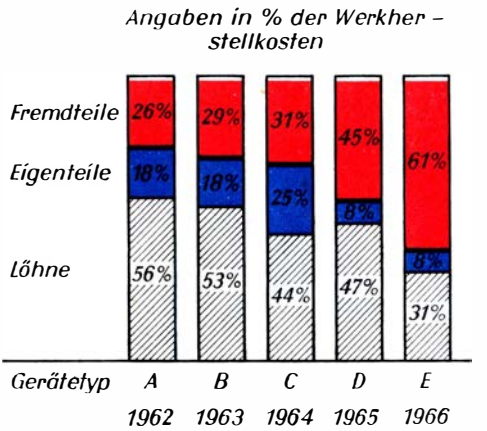


Bild 126. Verschiebung in der Zusammensetzung der Herstellungskosten für eine bestimmte Geräteart, für die alljährlich ein neuentwickelter Typ angeboten wurde

bemüht sein werden, diese zum Gerät zu komplettieren. Im Endeffekt wird diese Entwicklung zu einer zunehmenden Verflechtung von Schaltkreis- und Geräteherstellung führen.

Sowohl in der Geräte- als auch in der Bauelementetechnik treten herkömmliche Entwicklungs- und Fertigungsmethoden mehr und mehr in den Hindergrund. Dafür gewinnen rationellere Entwurfsmethoden auf der Basis von Computern und physikalisch-chemische Prozesse in der Fertigung wachsende Bedeutung. Es darf in diesem Zusammenhang nicht übersehen werden, daß die komplizierteren Arbeitsprozesse und die beträchtliche Problembreite, die von der Festkörperphysik über die Technologie und Ökonomie bis zur Schaltungstheorie reicht, von den in allen Bereichen der Forschung, Entwicklung und Fertigung Tätigen ein breites Wissen verlangen. Die zweckentsprechende Ausbildung des Nachwuchses ist deshalb im Rahmen der integrierten Technik eine nicht zu unterschätzende Aufgabe.

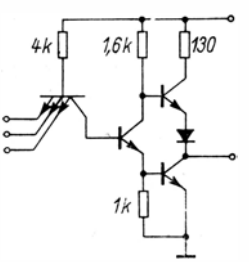
6

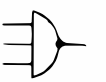
Anhang

Digitalschaltkreise

In der Digitaltechnik nimmt, wie bereits zum Ausdruck kam, die TT-Logik eine Spitzenstellung ein. Auf Grund der außerordentlich vorteilhaften Eigenschaften entwickelte sich binnen kurzer Zeit aus der Standardreihe ein sehr umfangreiches Sortiment. Neben flexiblen Typen großer Anwendungsbreite enthält es auch zahlreiche Schaltkreise, die über spezielle Kundenentwicklungen Eingang in eine der verschiedenen Reihen fanden. Die nachstehenden Zusammenstellungen sollen an Hand der Struktur und der typischen Kennwerte den Umfang und die Einsatzmöglichkeiten veranschaulichen.

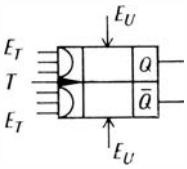
Grundelemente der TTL-Reihen





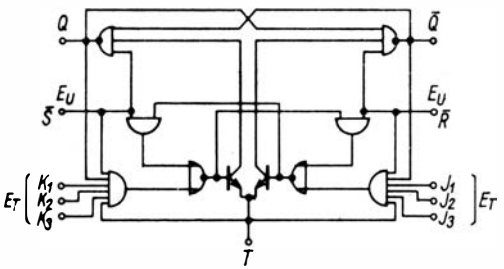
Gatter

Die eingetragenen Widerstandswerte gelten für die Standardreihe.
Der Eingangstransistor wird üblicherweise mit 2 . . . 8 Emittern realisiert.



Flip-Flop

T Takteingang
E_T taktabhängiger Eingang
E_U taktunabhängiger Eingang



Der Flip-Flop setzt sich aus Gattern zusammen. Obwohl er damit unmittelbar kein Grundelement ist, erscheint es, weil er in geschlossener Form sehr häufig in Schaltkreise eingeht, jedoch zweckmäßig, ihn als solches aufzufassen. Nach der logischen Verknüpfung wird zwischen dem J-K-, R-S- und D-Flip-Flop unterschieden, wobei im allgemeinen noch eine zusätzliche Aussage über die Wirkung des Steuertaktes notwendig ist. Das Beispiel zeigt einen J-K-Master-Slave-Flip-Flop.

Die L- und die H-Reihe entstehen hinsichtlich der Schaltungstechnik aus den Elementen der Standardreihe im wesentlichen durch eine Erhöhung bzw. Verringerung der in der Schaltung enthaltenen Widerstände. Die Schottky-clamped-Reihe enthält im Eingang sogenannte Clamping-Dioden, die eine Sättigung verhindern und damit über kleinere Erhol- und Speicherzeiten bei relativ geringer Leistungsaufnahme sehr kurze Schaltverzögerungszeiten ermöglichen.

Alle Reihen sind untereinander kompatibel.

Typische Kennwerte der TTL-Grundelemente

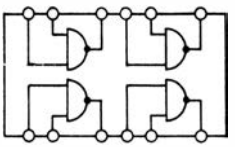
	Standard-reihe	Klein-leistungs-reihe (Low Power) L	Reihe f. hohe Schaltge-schwindigkeit (High speed) H	Schottky - clamped - Reihe S	
Schaltverzögerungszeit					
Gatter	10	33	6	3	ns
Flip-Flop	30	47	19	<8	ns
Leistungsaufnahme					
Gatter	10	1	22	20	mW
Flip-Flop	60	4	80	80	mW
Betriebsspannung	5	5	5	5	V
Stat. Störabstand	1	1	1		V
Ausgangslastfaktor					
Belastg. m. Elementen					
d. Standardreihe	10	1,25	12,5	12	
L-Reihe	40	10	50		
H-Reihe	8	1	10	10	
S-Reihe					

SSI-Schaltkreise

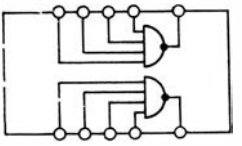
SSI-Schaltkreise sind Schaltkreise verhältnismäßig geringen Umfangs, die sich aus Grundelementen der jeweiligen Reihe zusammensetzen. Hinsichtlich ihrer Schaltung sind diese Grundelemente dabei mehr oder weniger modifiziert, beispielsweise durch ein zusätzliches Eingangsglied zur Realisierung der ODER-Funktion, eine spezielle Gestaltung des Ausgangs oder eine zusätzliche Inversion u. a. Typische Schaltkreise dieser Art, die auch in der DDR und in der ČSSR produziert werden, sind die nachstehend beispielshalber skizzierten Typen. In der angegebenen Typenbezeichnung des VEB Kombinat Halbleiterwerk Frankfurt/Oder ent-

sprechen die beiden letzten Ziffern denen der auch international üblichen Bezeichnungen. Neben diesen Typen sind derzeit etwa 40 in der gleichen Weise verwirklichte, auf speziellere Anwendungsfälle zugeschnittene Varianten bekannt.

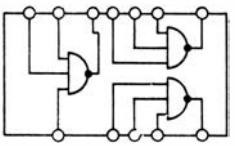
Auf dem internationalen Markt sind alle Typen in dual-inline-, Flach- und Rundgehäusen für die Temperaturbereiche 0 . . . 70 °C, —25 . . . 85 °C und —55 . . . 125 °C verfügbar.



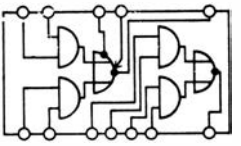
D 100
4 NAND-Gatter mit je 2 Eingängen



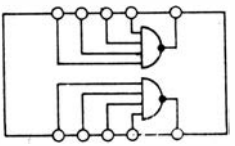
D 140
2 NAND-Leistungsgatter mit je 4 Eingängen (Ausgangslastfaktor je Gatter: 30)



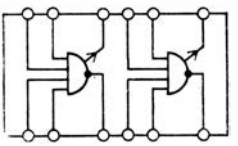
D 110
3 NAND-Gatter mit je 3 Eingängen



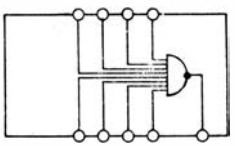
D 150
2 invertierte AND-OR-Gatter mit je 2 × 2 Eingängen und Erweiterungseingang



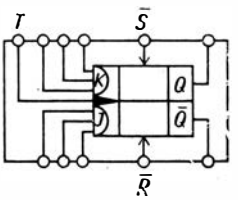
D 120
2 NAND-Gatter mit je 4 Eingängen



D 160
2 Erweiterungsgatter für D 150 mit je 4 Eingängen



D 130
NAND-Gatter mit 8 Eingängen



D 172
J-K-Master-Slave-Flip-Flop

6

MSI- bzw. LSI-Schaltkreise

Die TTL-MSI- bzw. -LSI-Schaltkreise sind umfangreiche Anordnungen, die auf erprobten SSI-Schaltungen basieren und jeweils eine Vielzahl derartiger Schaltungen beinhalten. Beispielsweise sind in einem bekannten MSI-Schaltkreis 8 Flip-Flops, 1 Gatter und 2 invertierende Stufen zu einem 8-Bit-Schieberegister zusammengefaßt. Bei der MSI sind die einzelnen Schaltungselemente und -gruppen in einer gemeinsamen Leitungsebene kontaktiert, während die LSI, wie dies bereits allgemein beschrieben wurde, für die Kontaktierung der Elemente und Gruppen jeweils getrennte, übereinanderliegende Leitungsebenen verwendet. Die verschiedenen Teilschaltungen sind dem Einsatz in der höheren Integrationsebene ebenso angepaßt wie die Grundelemente dem speziellen SSI-Schaltkreis. Anpassungen erfolgen sowohl hinsichtlich der Schaltung als auch der Leistungsaufnahme und der geometrischen Abmessungen, wenn sich innerhalb der Schaltkreise an Verzweigungspunkten, die von außen nicht zugänglich sind, nur geringere Ausgangslastfaktoren notwendig machen.
MSI-Schaltkreise sind gegenwärtig in etwa 100 Typen als Schieberegister, Speicher, Zähler, Dekoder u. a. verfügbar. Über die »Kundenschaltung« erhöht sich diese Zahl ständig. Dem TTL-LSI-Schaltkreis kommt demgegenüber nur eine untergeordnete Bedeutung zu, weil bei geringerem Schaltungsumfang der MSI-Schaltkreis und bei sehr großem Umfang der MOS-LSI-Schaltkreis dominiert.
Die Verwendung von MSI-Schaltkreisen bringt, verglichen mit dem Einsatz einer entsprechenden Anzahl von SSI-Schaltkreisen, neben der leicht zu überblickenden Einsparung an Leiterplattenfläche, beispielsweise beim bereits erwähnten 8-Bit-Schieberegister, eine Kostenreduzierung auf etwa ein Drittel allein durch die Preisdifferenz der Schaltkreise.

Analogschaltkreise

Bereits mehrfach wurde auf den Rahmen, der die Möglichkeiten der Hersteller von Analogschaltkreisen abgrenzt, hingewiesen. Die Kennwerte verbreitet eingeführter Typen sollen einen Eindruck vom Leistungsvermögen solcher Schaltkreise vermitteln.

Differenzstufe großer Anwendungsbreite

entsprechend CA 3005 (RCA) bzw. MA 3005 (Tesla)

Die Schaltung veranschaulicht Bild 106a, die charakteristischen Kennwerte die nachstehende Zusammenstellung:

Betriebsspannung	+ 6 V, — 6 V
Kollektor-Ruhestrom (je Differenztransistor)	
Anschluß 4 und 5 offen	1 mA
Anschluß 5 offen/4 an 8	0,45 mA
Anschluß 5 an 8/4 offen	2,7 mA
Anschluß 4 und 5 an 8	1,25 mA
Eingangs-Offsetspannung	2,6 mV
Eingangs-Ruhestrom	19 µA
Differenzspannungsverstärkung $f_M = 10$ MHz, $R_L = 1$ kΩ	25 dB
Leistungsverstärkung $f_M = 100$ MHz, $R_G = R_L = 50$ Ω	16 . . . 20 dB
Rauschzahl $f_M = 100$ MHz, $R_G = R_L = 50$ Ω	8 dB
Regelumfang	60 dB
Begrenzereinsatz	300 mV_{ss}
Gleichtaktunterdrückung $f_M = 1$ kHz	100 dB
Frequenzbereich	DC . . . 120 MHz

Operationsverstärker

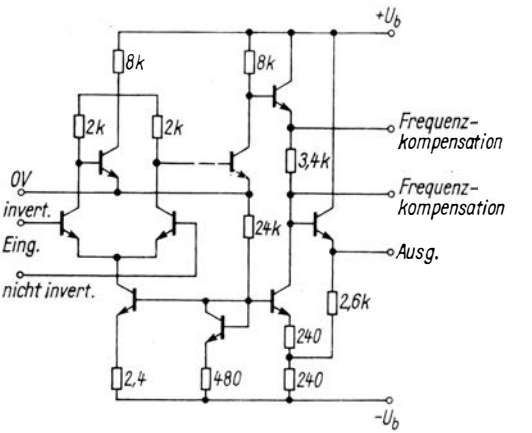
entsprechend A 109 bzw. B 109 (VEB Kombinat Halbleiterwerk Frankfurt/O.) bzw. µA 709 (Fairchild)

Den im Bild 103a gezeigten Schaltkreis veranschaulichen die folgenden Kennwerte:

Betriebsspannung	± 15 V
Verlustleistung	80 mW
Eingangs-Offsetspannung	2 mV
Eingangsstrom	2 µA

Eingangswiderstand		250 kΩ
Ausgangswiderstand		150 Ω
Ausgangsspannung	$R_L \geqq 2\,k\Omega$	max. ± 13 V_s
Spannungsverstärkung		93 dB
Frequenzbereich		DC . . . etwa 500 kHz
Ausnutzung bedingt gegebenenfalls relativ aufwendige äußere Beschaltung		
Gleichtaktunterdrückung		90 dB

Operationsverstärker mit hoher Grenzfrequenz
entsprechend μA 702 (Fairchild)

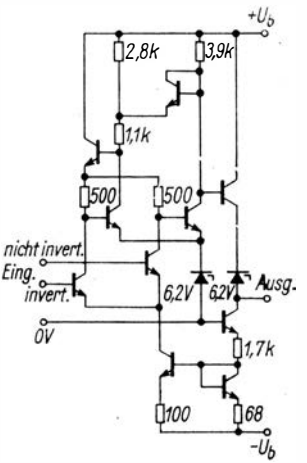


Betriebsspannung		+ 12 V, — 6 V
Verlustleistung		90 mW
Eingangs-Offsetspannung		1,5 mW
TK der Offsetspannung		5 μV/°C
Eingangsstrom		2,5 μA
Eingangswiderstand		32 kΩ
Ausgangswiderstand		200 Ω
Ausgangsspannung	$R_L \geqq 100\,k\Omega$	max. ± 5 V_s
Spannungsverstärkung		70 dB

Frequenzbereich	**DC . . . 30 MHz**
Ausnutzung bedingt äußere Beschaltung	
Gleichtaktunterdrückung	92 dB

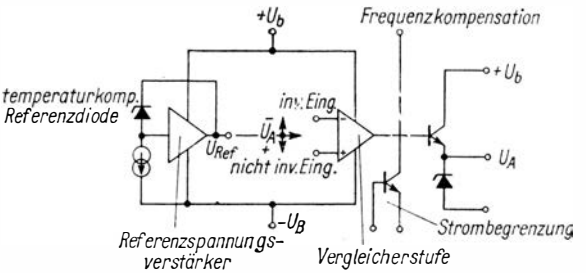
Komparator

entsprechend A 110 bzw. B 110 (VEB Kombinat Halbleiterwerk Frankfurt/O.) bzw μA 710 (Fairchild)



Betriebsspannung	+ 12 V, — 6 V
Verlustleistung	90 mW
Eingangs-Offsetspannung	1,6 mV
TK der Offsetspannung	5 μV/°C
Eingangsstrom	16 μA
Spannungsverstärkung	63 dB
Ausgangswiderstand	200 Ω
Ausgangsstrombelastung	2,5 mA
Ausgangsspannung für logische 1	3,2 V
Ausgangsspannung für logische 0	— 0,5 V
Gleichtaktunterdrückung	98 dB

Spannungsregelschaltung
entsprechend μA 723 (Fairchild)



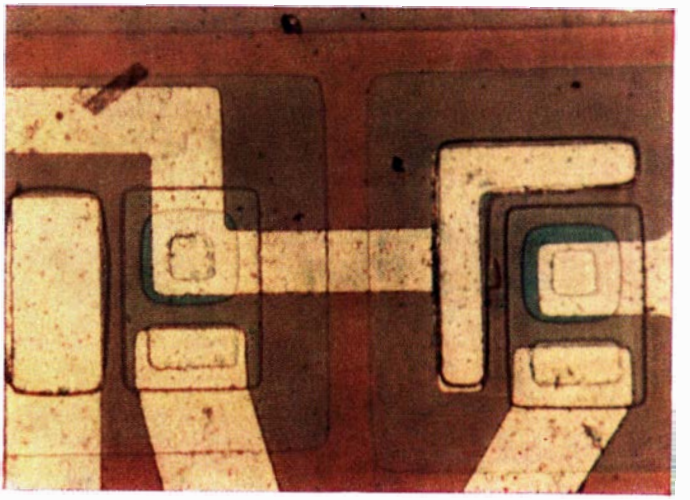
Eingangsspannungsbereich	± (9,5 . . . 40 V)
Ausgangsspannungsbereich	± (2 . . . 37 V)
Ausgangsstrom	150 mA
Leerlaufstrom	2,3 mA
Welligkeitsunterdrückung	80 dB
Regelfaktor der Eingangsspannung	0,1 % U_A
12 V ≦ U_E ≦ 15 V	0,01 % U_A
Regelfaktor des Ausgangsstroms	0,03 % U_A
TK der Ausgangsspannung	0,003 %/°C
Langzeitstabilität	0,1 %/1 000 h

NF-Verstärker mittlerer Ausgangsleistung
entsprechend TAA 611 (Siemens)

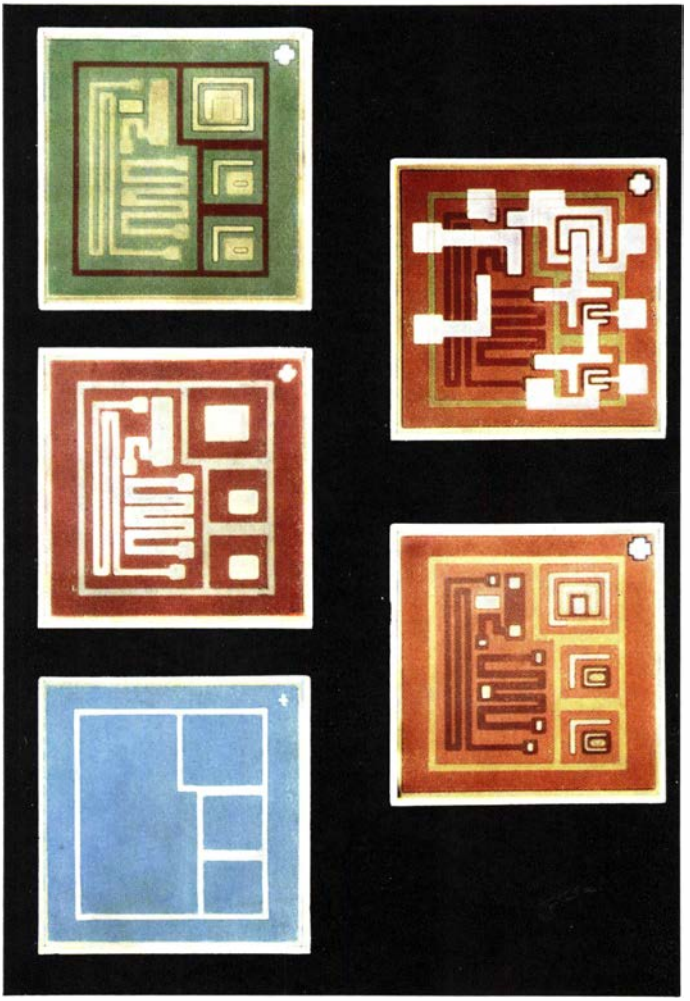
Der im Bild 107a gezeigte Schaltkreis, der dem Rundfunk- und Fernsehsektor zuzuordnen ist, weist die folgenden Kennwerte auf:

Betriebsspannung	3,5 . . . 15 V
Stromaufnahme bei Leerlauf	4 mA
Stromaufnahme bei $N_a = 1$ W	160 mA
Frequenzbereich	50 Hz . . . 20 kHz
Verstärkung	48 dB
Empfindlichkeit	1,2 mV für 50 mW
Ausgangsleistung	1 W bei $k = 10$ %
Klirrfaktor	1,5 % bei ≦ 500 mW

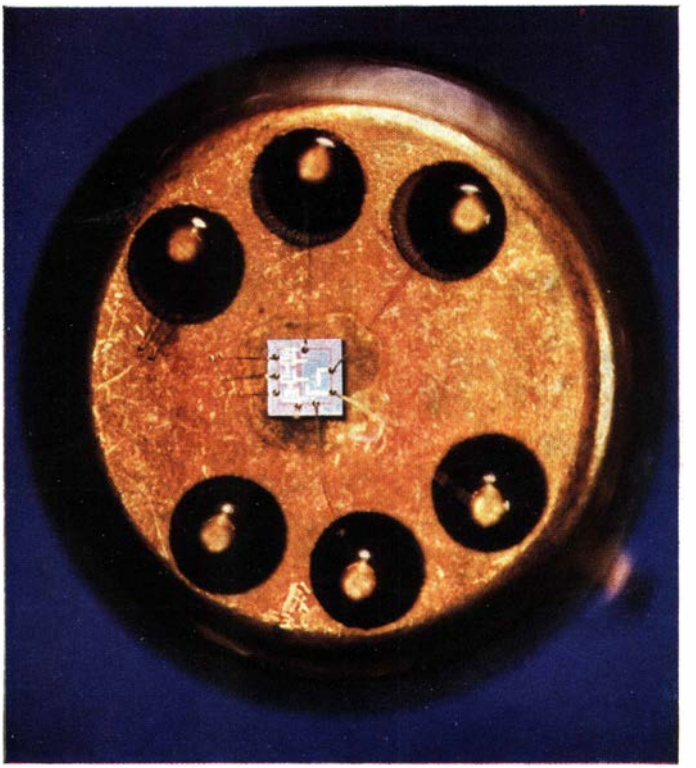
Farbtafeln



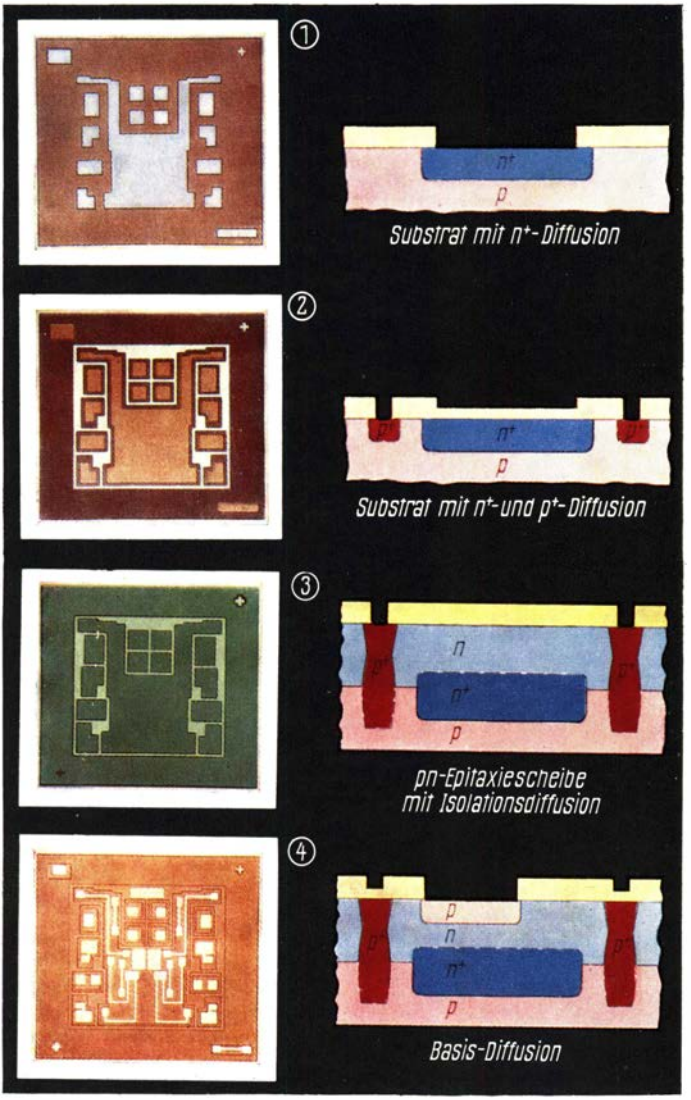
A 1 Gegeneinander isolierte Transistorstrukturen mit aufgedampften Zwischenverbindungen



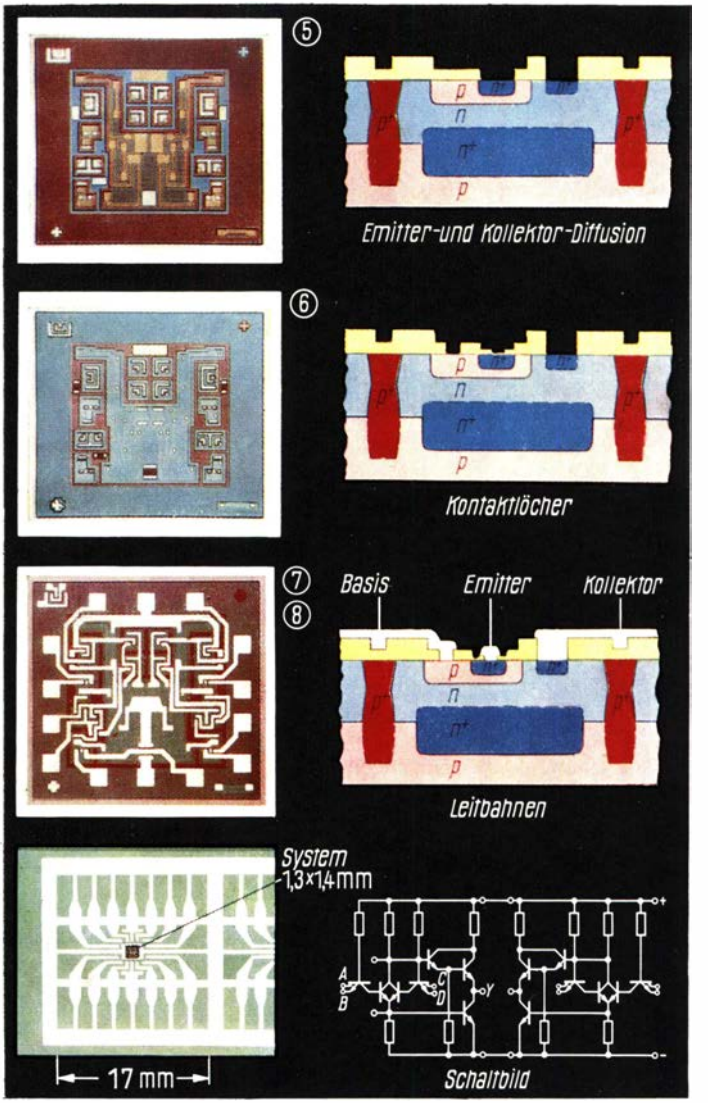
A 2 Herstellungsschritte eines auf einem gemeinsamen Träger integrierten, sperrschichtisolierten dreistufigen Verstärkers
(links: unten a, Mitte b, oben c; rechts: unten d, oben e)

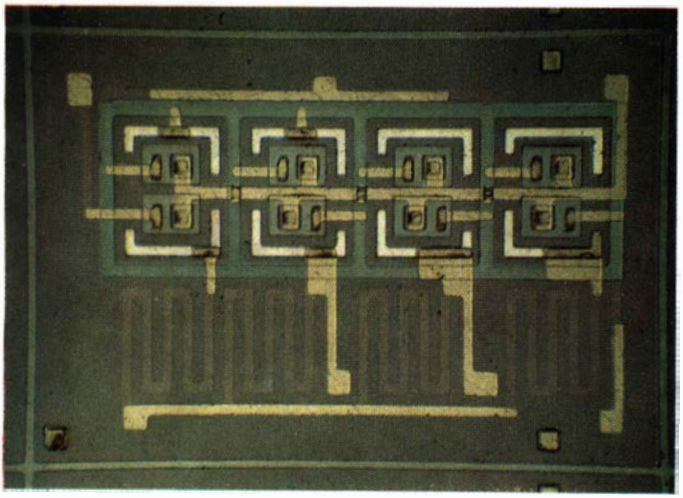


A 3 Auf den Gehäuseboden auflegierter und kontaktierter Festkörperschaltkreis



A 4 Struktur des U N D / O D E R-Gatters F L H 151 in den einzelnen Phasen der Herstellung


⑤
p
n
n+
p+
p
Emitter-und Kollektor-Diffusion
⑥
Kontaktlöcher
⑦
⑧
Basis
Emitter
Kollektor
Leitbahnen
System
1,3×1,4mm
17 mm
A
B
C
D
Y
+
-
Schaltbild



A 5 Festkörper-Hybrid-Schaltkreis

Erklärung von Fachausdrücken

Bauelemente, konventionelle

In der herkömmlichen Schaltungstechnik diskret eingesetzte Einzelelemente mit jeweils eigenem mechanischem Träger.

bonden

Herstellung einer elektrischen Verbindung zwischen zwei leitenden Materialien mittels Thermokompression bzw. Ultraschallschweißung.

Chip-Transistoren (Flip-Chip-Transistoren)

Gehäuselose Planartransistoren mit Anschlußarmaturen, die eine zweckmäßige Kontaktierung in Filmschaltkreisen ermöglichen.

Defektelektron

Bewegliche Elektronenfehlstelle in einem Halbleitergitter. Das Defektelektron wird üblicherweise auch als »Loch« bezeichnet.

Dotierung

Gezielter Einbau von Fremdatomen in ein Halbleitermaterial.

Dünnfilmtransistoren

In allen Teilen aufdampfbare Feldeffekttransistoren.

Eigenleitung

Durch die Temperaturbewegung verursachte Leitfähigkeit eines nicht dotierten, reinen Halbleitermaterials.

Energieband

In Kristallen wird die Energie der Elektronen durch verschiedene Wechselwirkungen beeinflußt, so daß anstelle einzelner, diskreter

Energiestufen ein Band möglicher Energiestufen in Erscheinung tritt.

Filmstruktur, amorphe

Amorphe Filme zeigen eine unregelmäßige Zusammenlagerung regelloser Teilchen.

Filmstruktur, polykristalline

Polykristalline Filme bestehen aus einer unregelmäßigen Zusammenlagerung regelmäßig geformter, durch ebene Flächen begrenzter Kristallteilchen (Kristallite, Elementarzellen).

Flip-Flop

Schaltungsanordnung, die durch äußere Ansteuerung zwei bestimmte stabile Zustände annehmen kann (andere übliche Bezeichnungen: bistabiler Multivibrator, bistabile Schaltung).

Fremdatome

Spurenweise in das Halbleitergitter eingebaute Atome eines anderen chemischen Elements.

Hybrid-Schaltkreis

Schaltkreis, dessen Elemente unter Anwendung von zwei oder mehr verschiedenen Technologien hergestellt wurden, bzw. eine in einer gemeinsamen Umhüllung untergebrachte Kombination eines integrierten Schaltkreises mit diskreten Elementen.

KME 3-Technik

KME (Komplex-Mikroelektronik)-Schaltkreissystem des VEB Keramische Werke Hermsdorf.

Kristallgitter

Mit einem regelmäßigen räumlichen Gitter vergleichbare innere Struktur eines Kristalls.

Large-scale integration (LSI) — Großintegrationstechnik

Technik der integrierten Schaltungen, die mehr als etwa 100 Gatter bzw. 1000 Bauelemente enthalten.

LC-Filter

Unter Verwendung der Schaltelemente Induktivität (L) und Kapazität (C) verwirklichtes Frequenzfilter.

Lebensdauer von Ladungsträgern

Mittlere Zeitspanne zwischen der Entstehung und Rekombination von Ladungsträgern.

Medium-scale integration (MSI) — Mittelintegrationstechnik

Technik der integrierten Schaltungen, die mehr als etwa 12 Gatter bzw. 100 Bauelemente enthalten.

Nand/Nor-Schaltungen

Und- bzw. Oder-Gatter mit anschließender Negation des Ausgangswertes.

Sandwich-Platten

Substrate, die entweder über die gesamte Fläche mit übereinanderliegenden Schichten aus Widerstands- und Leitermaterial bedeckt sind oder darüber hinaus bereits ein grobes, standardisiertes Grundmuster aufweisen.

Segregation

Vorgang, der bei einem teilweise schmelzflüssigen Zustand des Grundmaterials eine gezielte Verlagerung von Fremdstoffen bewirkt. Er beruht auf der unterschiedlichen Löslichkeit von Fremdstoffen in der festen und flüssigen Phase des Grundmaterials.

Small-scale integration (SSI) — Kleinintegrationstechnik

Technik der integrierten Schaltungen, die weniger als etwa 12 Gatter bzw. 100 Bauelemente enthalten.

Störstelle

Störung des regelmäßigen Gitteraufbaus der Halbleiteratome durch unbesetzte oder mit Fremdatomen besetzte Gitterfehlstellen.

Störstellenleitung

Stromleitung, die auf dem Vorhandensein von Störstellen im Halbleiter beruht.

Valenzelektronen

Valenzelektronen sind die äußeren Elektronen der Atomhülle. Sie bestimmen die chemischen Eigenschaften eines Elements.

Zur Kennzeichnung der Parameter von integrierten digitalen Schaltkreisen sind dieselben Bezeichnungen üblich, wie sie auch in der diskreten Schaltungstechnik verwendet werden. In der analogen Schaltkreistechnik werden daneben jedoch, bedingt durch die bevorzugte Anwendung von Differenz-Eingangsstufen, einige spezielle Begriffe verwendet, bzw. bekannte Begriffe gelten unter speziellen Nebenbedingungen. Im folgenden werden die Definitionen einiger dieser Kennwerte gegeben:

Ausgangsspannungshub

Spitzenwert der Ausgangsspannung, die ohne Amplitudenbegrenzung erreicht werden kann.

Ausgangswiderstand

Widerstand des Ausgangs gegen Masse, wobei die Ausgangsspannung den Wert 0 V hat. Dieser Parameter wird nur definiert unter Kleinsignalbedingungen und bei Frequenzen über einige hundert Hertz.

Differenz-Eingangsspannung

Spannung zwischen beiden Eingängen.

Drift der Offset-Spannung oder des Offset-Stroms

Änderung der Offsetspannung oder des Offsetstroms mit der Temperatur.

Eingangsstrom

Mittelwert der in beide Eingänge fließenden Ströme.

Eingangswiderstand

Widerstand jedes der beiden Eingänge gegen Masse, wobei jeweils der andere Eingang mit Masse verbunden wird.

Gleichtakt-Eingangsspannung

Spannung der zusammengeschalteten Eingänge gegen Masse.

Gleichtaktunterdrückung

Verhältnis der Differenz- zur Gleichtaktverstärkung.

Offset-Spannung

Spannung, die zwischen die beiden Differenz-Eingänge gelegt

werden muß, um am Ausgang des Schaltkreises die Spannung O V zu erreichen.

Offset-Strom

Differenz der in die beiden Eingänge fließenden Ströme.

Spannungsverstärkung

Differenzverstärkung: Verhältnis der Ausgangsspannung zur Differenz-Eingangsspannung;
Gleichtaktverstärkung: Verhältnis der Ausgangsspannung zur Gleichtakt-Eingangsspannung.

Übergangsspannung

Differenz der Spannungen an den beiden Eingängen, die bei Schaltung des Verstärkers als Komparator erforderlich ist, um ausgangsseitig aus dem unteren in den oberen Begrenzungspegel zu fahren.

Verlustleistung

Gleichstromleistung, die der unbelastete Verstärker bei der Ausgangsspannung 0 V aufnimmt.

Literaturhinweise

Bücher

Khambata, A. J.: Einführung in die Mikroelektronik. Berlin: VEB Verlag Technik 1967

Lewicki, A.: Einführung in die Mikroelektronik. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1966

Reiner, H., H. Lauckner und *H. Renner:* Die Miniaturisierung in der elektrischen Schaltkreistechnik und ihr künftiger Einfluß auf das kommerzielle Fernmeldewesen. Jahrbuch des elektrischen Fernmeldewesens 1964, S. 9 bis 61

Steinbuch, K.: Taschenbuch der Nachrichtenverarbeitung. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer Verlag 1962

Zeitschriften

Anderson, G. C.: Pseudo-Random and Random Test Signals.— Hewlett Packard Journal (1967), Sept., S. 2 ff.

Bobenrieth, A.: Evolution des Microcircuits à Substrat isolant.— Revue Technique C.F.T.H. (1966), Nr. 43, S. 13 bis 51

Boswell, D., und *D. W. Giles:* Dünnfilmschaltkreise — ein Überblick. — Elektr. Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 405 bis 419

Cook, C. R.: Integrierte Siliziumschaltkreise. — Elektr. Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 469 bis 481

Dahlberg, R.: Neue Entwicklungen auf dem Halbleitergebiet — eine Halbleiterphilosophie. — Internat. Elektron. Rundschau (1965), Nr. 3, S. 147 ff.

Dorendorf, H.: Integrierte Halbleiterschaltungen für Hörgeräteverstärker. — Hörgeräte-Akustik (1966), Nr. 4, S. 140 bis 149

Forster, J. H., und *J. B. Singleton:* Beam-lead sealed-junction inte-

grated circuits. — Bell Laboratories Record (1966), Oct./Nov., S. 313 ff.
Forte, S. S.: Microelectronics in Equipment Design. — Electronic Engineering (1964), Oct., S. 696 ff.
Forte, S.: Die Technik der integrierten Schaltungen. — Radio mentor (1965), Nr. 4, S. 282 bis 285
Gassmann, G. G.: Ein neues FM-Empfangsverfahren für die Anwendung integrierter Schaltungen. — radio und fernsehen (1966), Nr. 15, S. 454 ff.
Gassmann, G. G.: Selektive Verstärkung in integrierter Technik. — radio und fernsehen (1966), Nr. 19, S. 582 ff.
Harden, W. R.: Digital Filters with ICs boost Q without inductors. — Electronics (1967), July, S. 91 ff.
Henneberger, J., und *S. Schiller:* Technologische Ausrüstungen zur Herstellung von Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreisen. — Nachrichtentechnik (1968), Nr. 3, S. 84 bis 87
King, D., und *L. Stern:* Entwurf von monolithischen integrierten Schaltungen. — Internat. Elektron. Rundschau (1966), Nr. 11 u. 12, S. 623 bis 627, 700 bis 706
Köhler, E.: Die Dünnfilmtechnik, ein Weg zur Realisierung elektronischer Mikrosysteme. — Nachrichtentechnik (1964), Nr. 11, S. 401 bis 406
Köhler, E.: Die Planar-Epitaxie-Technik — Stand und Fortschritt. — Nachrichtentechnik, (1968), Nr. 7, S. 241 bis 248
Köhler, E.: Die Halbleiterblocktechnik, ein Weg zur Realisierung elektronischer Mikrosysteme. — Nachrichtentechnik (1964), Nr. 12, S. 441 bis 446
Lacker, H.: Halbleiterschaltkreise, Stand und Richtung der Entwicklung. — Elektronik (1965), Nr. 5, S. 135 bis 138
Lancaster, D. E.: Linear integrated circuits: What's available? — Electronics World (1966), Nov., S. 38 ff.
Lepselter, M. P.: Beam-lead sealed-junction technology. — Bell Laboratories Record (1966), Oct./Nov., S. 299 ff.
Markert, C., und *H. Tieze:* Konstruktive Ausführung von Schaltkreisen der Dünnfilm-Hybrid-Technik. — Nachrichtentechnik (1968), Nr. 3, S. 112 bis 115
Matthews, K. A., und *H. T. Prior:* Verbindungsverfahren bei hoher Packungsdichte. — Elektrisches Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 437 bis 445

Mäusl, R.: Der Feldeffekt-Transistor — Theorie und Eigenschaften. — Elektronik (1965), Nr. 5, S. 139 bis 142

McKeown, P. J. A., und *R. D. Peacock:* Technologie von Flip-Chip-Halbleitern. – Elektrisches Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 463 bis 468

Monolithische Schaltkreise. Datenheft des VEB Kombinat Halbleiterwerk Frankfurt/O.

O'Conell, J. A., und *E. A. Zaratkiewicz:* Dickfilmtechnologie. — Elektr. Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 421 bis 435

Riddle, G. C.: Neuartige Widerstandsanordnungen durch »Sandwich«-Aufbau. — Elektr. Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 483 bis 493

Rottgardt, K. H.: Die Bedeutung neuer Technologien für die zukünftige Struktur nachrichtentechnischer Produktionsstätten. — NTZ (1967), Nr. 1, S. 33 bis 35

Röttgers, H.: Feldeffekt-Transistoren. — Internat. Elektron. Rundschau (1964), Nr. 3 u. 4, S. 125 bis 128, 210 bis 215

Sandbank, C. P., T. M. Jackson und *A. W. Horsley:* Neue Verfahren zur rationellen Herstellung von Dünnfilm- und integrierten Halbleiterschaltkreisen. — Elektr. Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 447 bis 462

Schuegraf, K. K.: Integrierte mikroelektronische Schaltungen. — Internat. Elektron. Rundschau (1964), Nr. 4 u. 5, S. 189 bis 192, 277 bis 284

Stoller, A. I., J. A. Anrick und *N. E. Wolff:* Getting the most out of circuits with dielectric isolation. Electronics (1967), March, S. 97 bis 105

Thorkelson, T. R.: Entwicklung und Anwendung integrierter Schaltkreise der TTL. — Internat. Elektron. Rundschau (1967), Nr. 4, S. 81 ff.

Ullrich, H., und *H. Dorendorf:* Integrierte Halbleiterschaltungen — Anwendungsmöglichkeiten und Entwicklungstendenzen. — Elektronik (1964), Nr. 11, S. 329 bis 332

Weber, S.: LSI, the technologies converge. – Electronics (1967), Febr., S. 124 bis 127

Weygang, A.: Zur Auswahl digitaler, integrierter Halbleiterschaltungen. — Elektr. Nachrichtenwesen (1966), Nr. 4, S. 495 bis 500

Widlar, R. J., und *J. N. Giles:* Optimale Verwendung von analogen

integrierten Schaltungen. — Internat. Elektron. Rundschau (1967), Nr. 10, S. 249 bis 253

Bildnachweis

VEB Keramische Werke Hermsdorf: 20, 21, 26, 29, 40, 41
VEB Keramische Werke Hermsdorf und Forschungsinstitut Manfred von Ardenne, Dresden: 22, 23
Electronics, New York: 124, 125
International Telephon and Telegraph Corporation: 5, 6, 7, 8, 10, 24, 25, 81, 82
SGS-Fairchild Gesellschaft für Halbleiter-Bauelemente m. b. H., Stuttgart: 52, 67, 76, 77, 78, 83, 84, 89, 92
Siemens AG, Berlin: 53, 88, 91b, A 2, A 3, A 4
Telefunken AG, Berlin: A 5
Texas Instruments: 64

Sachwortverzeichnis

Alterung dünner Schichten 49
Analog/technik 245
—-verstärker als universelle Funktionsgruppen 247
— —, Schaltkreisarten der 253
AND-Gatter 236
Ätzung, selektive 84
Aufdampfverfahren 75
— über Wechselmasken 88

Basisdiffussion 155, 175
Bauelementedichte 30
Beam-lead/-Schaltkreise 191
—-Technologie 163
—-Transistoren 111
Belastbarkeit von Widerständen in DüSS 101
— — — — FKS 179
Breitbandverstärker 247, 250

Cermet 97
Chip-Transistoren 109
CML-Technik 245

Dickschichtschaltkreis 54
Dielektrische Isolation 160
Differenzverstärker 253
Diffusion 144
Diffusionsmasken 147, 155
Digitale Filter 264
Digitalisierung analoger Systeme 271
Digitaltechnik 235
Dioden im Festkörperschaltkreis 173
—-Transistor-Logik 244
Disjunktion 238
Druckpasten 58, 65
dual-inline-Gehäuse 214
Dünnschicht-Hybrid-Schaltkreise 109
—-schaltkreise 72, 83, 92
—-technik 42, 45
—-transistoren 114

ECL-Technik 244
Emitterdiffusion 155, 175
Epitaxie 143
fan-in, fan-out 240

Feldeffekttransistoren 167
Festkörper/-Hybrid-Schaltkreise 112
—-schaltkreise 128, 219
—-technik 42, 125
flat-pack-Gehäuse 213, 215
Flächenbedarf von diffundierten Widerständen 179
— — — Schichtkondensatoren 68, 104
— — — Schichtwiderständen 65, 101
— — — MOS-Kondensatoren 182
— — — Sperrschichtkondensatoren 181
— — — Transistoren 163
— widerstand 97, 175
Fliegenaugenoptik 153
Fotoätzverfahren 84, 150
Frequenzselektion 258

Gehäuse für FKS 209

Hybrid-Schaltkreise 46, 70, 108

Induktive Elemente in DiSS 69
— — — DüSS 105
— — — FKS 184, 258
Isolationstechnologien 156
—, dielektrische 160

Kapselung, Festkörperschaltkreise 209
Katodenzerstäubung 80
Kondensatoren in DiSS 67
— — DüSS 103
— — FKS 179
Konjunktion 236
Kontaktierung von DiSS 70
— — DüSS 116
— — FKS 187
Koordinatograf 59, 85, 151
Korngrenzen 49
large-scale integration (LSI) 127, 206

Leiterbahnen in DiSS 70
— — DüSS 116
— — FKS 185
Leitungskreuzungen in DiSS 71

— — DüSS 116
— — FKS 184
Leitungsmechanismus in Halbleitern 131

Masken für DiSS 59
— — DüSS 84, 88
— — FKS 147, 151
—, optische 84
Matrix-Schaltkreise 203
Mechanische Filter 261
Metallbasistransistor 116
Mikrogravierung 94
—-manipulator 88
Modul- und Mikromodultechnik 41
Monolithische Schaltkreise 125
— — mit SiO_2-Isolation 202
— — — Sperrschichtisolation 199
MOSFET 171
MOS/-Kondensatoren 181
—-Schaltkreise 202
Multichip-Hybrid-Schaltkreis 114

Negation 238
NOR-Gatter 212

Oberflächenleitung 133
—-passivierung 139
—-rauhigkeit von Filmschaltkreissubstraten 52, 75
Oberflächenschutz von Festkörperschaltkreisen 133, 157, 209
— — — Schichtschaltkreisen 67, 120
Oder-Tor, Oder-Gatter 238
Operationsverstärker 250
OR-Gatter 238
Oxidmasken 147, 154
Oxydation von Siliziumsubstraten 148

Piezoelektrische Filter 261
Planartechnologie 125

Quarzwabenisolation 161

Reduzierkamera 60, 85, 154
RLT-Technik 242

Sandwich-Platten 87
Segregation 138
Sperrschicht/-Feldeffekttransistor 170
—-isolation 157
—-kondensatoren 179
Störfestigkeit digitaler Funktionsgruppen 240
Subminiaturtechnik 38
Substrate für DiSS 51, 58
— — DüSS 51, 74
— — FKS 136, 141
Systemintegration 206

Tantal-Schaltkreise 86
Thermokompression 187
TO-Rundgehäuse 211
TTL-Technik 244

Wärmeleitfähigkeit von Trägermaterialien 51, 54
Wechselmasken 88
Widerstände in DiSS 65
— — DüSS 97
— — FKS 174, 179
— — Sandwich-Bauform 102
—, diffundierte 179
—, Temperaturkoeffizient 179
Widerstands/formen 100, 177
—-Transistorlogik 242

Ziehen von Einkristallen 138
Zonenschmelzverfahren 136

Die Reihe ist durch den Buchhandel zu beziehen

Polytechnische Bibliothek

unterrichtet allgemeinverständlich über den Weltstand in allen Zweigen der Technik

Ackermann

Fernsehen in Farben
Über die Technik des Farbfernsehens

Becker

Polyurethane
Einführung in ein neues Teilgebiet der Kunststoffe

Conrad

Elektrotechnik – kurz und einprägsam
Wissenswertes vom elektrischen Strom

Conrad/Bolha

Elektronenröhren
Aufbau – Technologie – Einsatz

Herrmann

Sicher im Straßenverkehr
Populäre Verkehrskunde in Wort und Bild

Naumann

Energie ohne Umwege
Methoden, Anwendung, Eigenschaften und Verfahren der Direktumwandlung von Energie

Pietzsch/Hülm

Datenverarbeitung in der Industrie
Elektronenrechner helfen rationalisieren

fv

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Die Reihe ist durch den Buchhandel zu beziehen

Polytechnische Bibliothek

unterrichtet allgemeinverständlich über den Weltstand in allen Zweigen der Technik

Pikowski
Textilien der Zukunft
Aspekte der Textiltechnik und -technologie

Rätzsch/Arnold
Hochpolymere und ihre Herstellung
Chemie und Technologie der Kunststoffe

Reinke
Lüftung – Klimatisierung – Entstaubung
Grundlagen, Verfahren und Geräte

Sander
Laser – allgemeinverständlich
Arbeitsweise und Anwendung einer neuen Energiequelle

Schmiedel/Schiefer
Hochpolymere und ihre Prüfung
Werkstoffkunde und -prüfung von Plasten

Smers
Datenerfassung
Einführung in ein wichtiges Gebiet der EDV

Zimmer
Korrosion der Metalle
Ursachen und Verhütung

fv
VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Im gleichen Verlag erscheinen:

Forscher – Funker – Ingenieure · *Von Walter Conrad · 2. Auflage · 179 Seiten mit 100 Bildern · 16,7 cm × 24 cm · Ganzgewebeeinband 10,80 M · Bestell-Nr. 545 183 3* · Dieser Band bringt dem Leser in erzählender Form die wesentlichen Schritte aus acht Jahrzehnten drahtloser Nachrichtentechnik nahe. Er zeigt, daß die großen wissenschaftlich-technischen Entdeckungen von Faraday, Maxwell, Hertz, Nipkow und Hülsmeyer, um nur einige zu nennen, entscheidend von ihrer jeweiligen gesellschaftlichen Umwelt beeinflußt werden und nicht Zufallsergebnisse oder geniale Eingebungen, sonder Resultate harter und zielstrebiger Arbeit sind.

Zukunft Weltmeer · *Von Dipl.-Ing. Gottfried Kurze · Bestell-Nr. 545 960 8* · In Unterwasserlaboratorien, Tauchbooten und mit künstlichen Kiemen oder Lungen versehen, mit Bohrschiffen, Hubinseln sowie Meeresbodenfahrzeugen ausgerüstet, beginnt der Mensch die natürlichen Reichtümer der Ozeane zu erkunden und zu nutzen. Technisch kompliziert wie die Experimente der Weltraumforschung ist das Vordringen des Menschen in die Tiefen des Weltmeers. Ein Teil der verwirklichten Projekte und die mit der wirtschaftlichen Erschließung der Weltmeere zusammenhängenden Fragen und Probleme sowie der erreichte Stand in der Meerestechnik werden in diesem populärwissenschaftlichen Buch vorgestellt.

fv

Zu beziehen durch den Buchhandel

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Die neue Generation elektronischer Geräte wird geprägt durch die Mikroelektronik. Die Elektrode darin – ein technisches Wunderwerk! Und das in Kleinstformat! Aber nicht nur Masse und Größe, vor allem auch ihre Zuverlässigkeit, ihre technische Einsetzbarkeit und die wirtschaftliche Herstellbarkeit sind von Bedeutung. – Dieses Buch gibt eine anschauliche Übersicht über die Technologien, über den Einsatz, die Anwendung und ihre Beschaffenheit. Im Mittelpunkt stehen die Einflüsse dieser Technik auf die Schaltungskonzeption, und im Buchanhang werden charakteristische Festkörperschaltkreise für digitale und analoge Anwendungen vorgestellt.

VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG