

1 Miniaturisierung und Integration

1.1 Die Miniaturisierung, ein stetiger Vorgang

Der räumliche und gewichtsmäßige Schrumpfungsprozeß bei elektronischen Schaltungen ist ein seit Jahren und Jahrzehnten fortschreitender Vorgang, der besonders in den letzten Jahren schnell vorangeschritten ist und der gegenwärtig mit kaum vorstellbarer Geschwindigkeit noch weiter in Richtung Mikrominiaturisierung verläuft.

Diese Mikrominiaturisierung ist daher nicht etwa eine vollkommen neue Technik, sondern das Produkt einer Summe zahlreicher Miniaturisierungsschritte auf den verschiedensten Gebieten der aktiven und passiven Bauelemente.

Diese nach eigenen Gesetzmäßigkeiten voranschreitenden Prozesse der Miniaturisierung und Mikrominiaturisierung von Bauteilen, die nicht gegenseitig abgegrenzt werden können, zumal hierzu klare Abgrenzungsmerkmale fehlen, wurden durch die Anforderungen der Raumfahrt und durch die Computertechnik noch zusätzlich beschleunigt. Unter Einwirkung dieser „Katalysatoren“ und unter dem Druck des wirtschaftlichen und technischen Wettbewerbes sowie in Anbetracht des Auftretens neuer Bedarfsträger der Elektronik schreitet die Miniaturisierungswelle auch zukünftig mit einem schnellen Tempo fort.

1.2 Praktische Vorteile der Miniaturisierung

Raum- und Gewichtersparnis

Daß die erfolgreiche Verringerung des Raumbedarfs für Elektronikschaltungen und die damit meist verbundene Gewichtsersparnis nicht allein der Grund für die Anwendung der Miniaturtechnik ist, liegt auf der Hand. Sicher ist sie aber für viele Anwender von ausschlaggebender Bedeutung (z. B. bei Hörhilfen, Luft- und Raumfahrzeugen).

Elektrische Zuverlässigkeit und Leistungssteigerung

Neben der Raum- und Gewichtersparnis sind jedoch die Zuverlässigkeit und die elektrische Leistungsfähigkeit zwei entscheidende Voraussetzungen für die Anwendung dieser Technologien. Die Verbesserung der elektrischen Leistungsfähigkeit elektronischer Schaltungen bei gleichzeitiger Raum- und Gewichtersparnis ist ein weiteres Hauptziel der Miniaturisierung der Bauelemente.

Geringerer Energieaufwand bei größerer Nutzleistung und größtmögliche Zuverlässigkeit sind praktische Anforderungen der Anwender, ohne deren Erfüllung die neue technologische Phase ihre heutige Bedeutung nicht erlangt hätte.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit spielt auch hier, insbesondere bei der Konsumelektronik, in den verschiedenen Aussageformen – wie Preisvorteile, Fertigungsvorteile, Kostensenkung bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung der Geräte – als Kompaß in der freien Marktwirtschaft eine entscheidende Rolle.

Mehr „Schaltung“ auf weniger Raum mit einem Mehr an Leistungsvermögen, größere Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit, höhere Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit, das sind Gründe, warum die Miniaturisierung unter Anwendung von integrierten Schaltungen besonders voranschreitet.

1.3 Miniaturisierungs- und Integrationsschritte

Die Begriffe *Miniaturisierung* als „Verkleinerung“ und *Integration*, was soviel wie Miteinbeziehung, Zusammenschluß oder Vereinigung bedeutet, stehen in enger Verbindung miteinander. Beide Begriffe sind voneinander gegenseitig abhängig. Im Zusammenhang betrachtet, ist die Miniaturisierung nach dem heutigen Stand eine Folge der Integration.

Für den Praktiker ist es jedoch unwesentlich, wo die Integration nach akademischer Vorstellung anfängt. Vielmehr ist es von Bedeutung zu wissen, welche Miniaturisierungsausmaße und welche Arten der Verbindung und Zusammenfassung von Bauteilen zur Miniaturisierung der Geräte beitragen.

1.3.1 Miniaturisierung konventioneller (diskreter) Bauteile

Erst durch die technischen Fortschritte bei der Entwicklung und Herstellung aktiver und passiver Bauelemente, wie z. B. durch die Einführung von Ferriten bei magnetischen Bauteilen, zusammen mit der Einführung der Transistortechnik konnte das Gerätevolumen stark „verkleinert“ werden. Dazu gehören auch die erheblichen Verkleinerungen der Abmessungen und Volumen von passiven, konventionellen Bauteilen, wie z. B. von Widerständen und Kondensatoren.

Widerstände mit einem Durchmesser von ca. 1 mm und mit einer Länge von 2,5 mm sowie Tantal-Elektrolytkondensatoren mit verhältnismäßig hohen Kapazitätswerten für die Transistortechnik und mit kleinen Rastermaßen sind heute genauso „handelsüblich“ wie Miniaturinduktivitäten in der Größe eines 1/10-W-Widerstandes. Ein eindrucksvolles Bild von der erfolgreichen Miniaturisierung verschiedener konventioneller Bauteile, auch elektromechanischer Art, vermittelt der Vergleich von „heutigen“ und ein paar Jahre alten Bauteilen derselben Art und Leistungsklasse.

1.3.2 Die gedruckte Schaltung

Die Art und Weise, wie die elektronischen Bauteile miteinander verbunden oder zusammengefaßt werden, ist für die Miniaturisierung genauso wesentlich wie die Größe der Bauteile selbst. Es muß daher in diesem Zusammenhang die uns allen bekannte gedruckte Schaltung erwähnt werden, die zur integrierten Verdrahtung von Bauteilen, speziell der hierfür gefertigten diskreten Bauelemente, verwendet wird. Die Integration der Verbindungsleitungen ist besonders bei den doppelt beschichteten Printplatten beachtlich, die zukünftig sicher noch mehr Verwendung finden.

1.3.3 Baugruppen und Modultechnik

Die laufende Verkleinerung diskreter elektronischer Bauteile ermöglichte es nun, die schon früher in der Fertigung elektronischer Geräte praktizierte *Baugruppentchnik*, bei der immer wiederkehrende Bauteilekombinationen vorgefertigt und ge-

prüft zu einer Baugruppe zusammengefaßt werden, noch weiter voranzutreiben.

Die so verkleinerte Baugruppe, mit gedruckter Schaltung und modernen konventionellen Bauteilen bestückt, dürfte z. Zt. wohl die weitverbreitetste Fertigungstechnik in der Konsumelektronik sein.

Als weitere Vorstufe der Integration kann die sogenannte *Modultechnik* betrachtet werden. Bei ihr werden die vorgefertigten Einzelelemente unter räumlichen Gesichtspunkten individuell ausgesucht, oder es werden eigens hierfür Spezialbauteile angefertigt und zu Baugruppen hoher Packungsdichte gestapelt und zusammenverbunden. Der so entstandene uniformierte „Schaltungsblock“ läßt einen späteren Austausch von Einzelteilen, z. B. für Reparaturzwecke, kaum mehr zu. Es ist dadurch ein neues Bauelement mit einer neuen Funktion durch diese Art der Integration entstanden.

Bei den sogenannten „Cordwood-Blöcken“ werden die miniaturisierten konventionellen Bauteile mit beidseitig herausgeführten Anschlußdrähten zwischen zwei gegenüberstehenden gedruckten Leiterplättchen angeordnet und mit den außenliegenden kupferkaschierten Leiterbahnen verlötet.

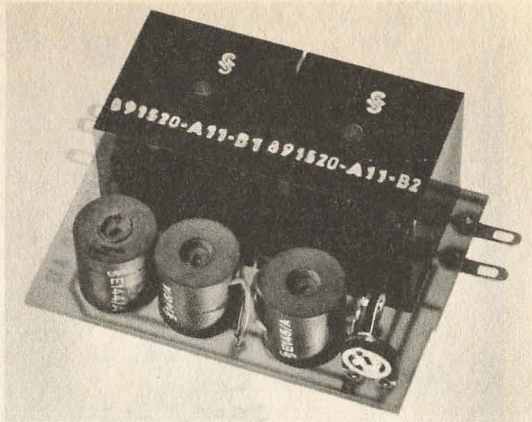
Bei den „geschweißten Blöcken“ werden die Drahtverbindungsleitungen mit den Anschlußdrähten der Bauteile innerhalb des Moduls verschweißt.

Hierzu gehört auch der „Kunsthartzblock“, bei dem die räumlich optimal angeordneten Bauteile mit Kunsthartz umgossen werden. Danach wird der so hergestellte Kunsthartzblock abgefräst, wobei dann die Querschnittsflächen der Anschlußdrähte zum Vorschein kommen.

Die Oberfläche wird dann mit einer Kupferschicht überzogen, die an den herausragenden Anschlüssen des Blockes durch Ätzung entfernt wird. Die so gefertigten Blöcke werden auch „*plattierte Blöcke*“ genannt und sind in der Praxis durch die Bezeichnung „Simi-Block“ bekannt. **Bild 1.3.3.1** zeigt einen mit Simi-Blöcken aufgebauten Stereodecoder.

Bei der Mikromodultechnik werden bereits vollständige Bauteile, wie z. B. Widerstände und Kondensatoren, auf gleich großen Grundplättchen (z. B. quadratischen Keramikplättchen)

Bild 1.3.3.1
Stereo-
decoder, mit
Simiblöcken
aufgebaut
(Siemens)



befestigt und teilweise sogar aufgedampft. Nach Stapelung dieser Bauteile- und Leiterbahnenplättchen werden deren an den Kanten liegende Anschlüsse miteinander durch dünne Drähte verbunden.

1.3.4 Integrierte Schaltungen

Mit der Miniaturisierung der diskreten Bauteile wie auch der Zusammenfassung der Bauelemente unter elektro- und fertigungstechnischen Gesichtspunkten zu Baugruppen, Bausteinen und Modulen wurden zweifellos beachtliche Fortschritte in Richtung auf Miniaturisierung und Integration erzielt.

Mit dem erstmaligen Erscheinen integrierter Schaltungen im Jahre 1960 auf dem amerikanischen Markt wurde jedoch eine neue Phase der Integration eingeleitet. Diese zunächst nur für die Raumfahrt und Computertechnik interessanten integrierten Schaltungen enthielten bereits eine Reihe von aktiven und passiven Schaltelementen, wie Transistoren, Dioden, Widerstände, Kondensatoren, d. h. teilweise sogar eine komplette Schaltung mit unterschiedlichen Schaltelementen, in einem einzigen Halbleiterkristall (Silizium) hergestellt.

Die damit erreichte Raum- und Gewichtsersparnis ist revolutionär. Integrierte Halbleiterschaltungen mit einem Volumen von

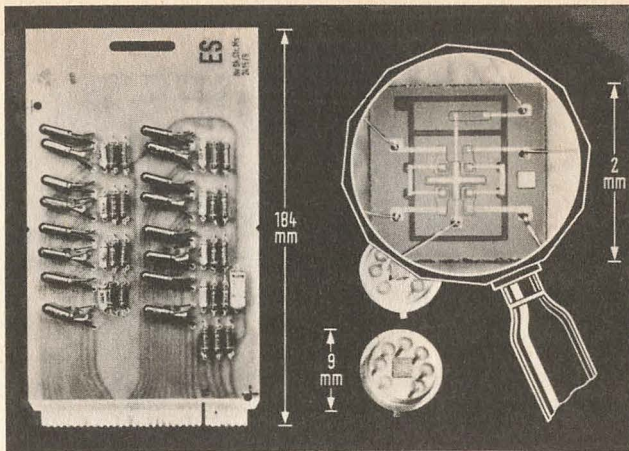


Bild 1.3.4.1 Größenvergleich einer Flachbaugruppe (links) mit zwei modernen Halbleiterschaltkreisen (rechts; Siemens)

ca. 1 cm^3 können 100 bis 1000 elektronische Bauteile beinhalten (Bild 1.3.4.1 und 1.3.4.2).

Der heutige Stand der IC-Technik ermöglicht die gleichzeitige Herstellung von integrierten Schaltungen mit zahlreichen Transistoren und Widerständen in einer in elektrischer Hinsicht erstaunlich hohen und gleichmäßigen Qualität.

Nachdem die Anordnung von mehr oder weniger Transistoren auf einem gemeinsamen Chip fertigungstechnisch durchaus ohne großen Aufwand durchführbar ist, hat sich für die Anwendung des Differenzverstärkerprinzips bei IC's ein neuer Auftrieb ergeben. – Das elektrisch günstige Temperaturverhalten der IC's ist einleuchtend, wenn man bedenkt, daß alle aktiven und passiven Elemente der integrierten Schaltung auf ein und demselben Plättchen, dem Siliziumchip, angeordnet sind. Daraus resultieren ferner die äußerst kurzen und zahlenmäßig geringen elektrischen Verbindungswege zwischen den Bauelementen. Der Strom hat kleinere Wege zurückzulegen, so daß sich äußerst kurze Zeiten zwischen „Befehl“ und „Ausführung“ ergeben.

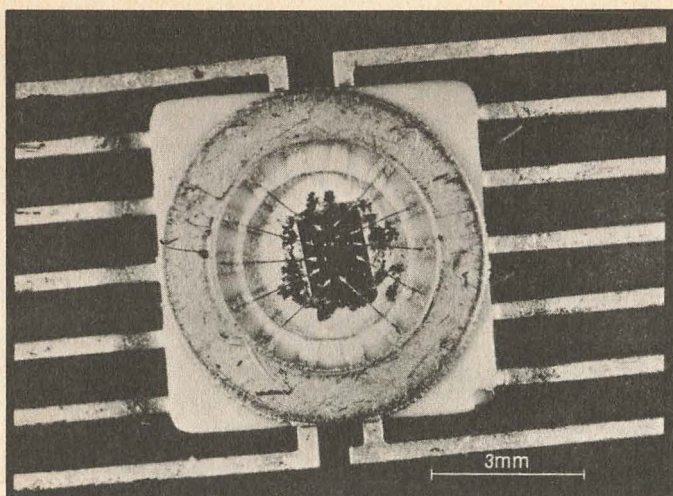


Bild 1.3.4.2 Integrierte Schaltung (Siemens)

Diese Verkleinerung der Ansprechzeit ist insbesondere für die Anwendung von computergesteuerten Geräten von entscheidender Bedeutung. Es verwundert nicht, daß – allgemein betrachtet – kürzere Leitungen soviel wie kleinere Schaltungsinduktivitäten bedeuten und daher weniger Trimmprobleme und Prüffeldarbeiten anfallen.

Die räumlich enge Anordnung der Bauteile auf einem Chip in ein und demselben abgeschlossenen Gehäuse geringer Abmessung und „Masse“ ist daher auch weitgehend immun gegen Schmutz und Staub, gegen mechanische Stoßwirkungen und Vibrationserscheinungen.

Ein weiteres, wesentliches Merkmal der integrierten Schaltung ist ihre hohe Zuverlässigkeit. Bekanntlich wird die Zuverlässigkeit eines Gerätes durch die Zahl und Qualität der Bauteile und Lötstellen entscheidend mitbestimmt. So wie die Anforderungen an die Elektronik immer größer werden, sind immer mehr elektronische Funktionen und Schaltkreise erforderlich. Das bedeutet generell ein „Mehr“ an aktiven und passiven diskreten Bauteilen, an leitenden Verbindungen und Lötstellen.

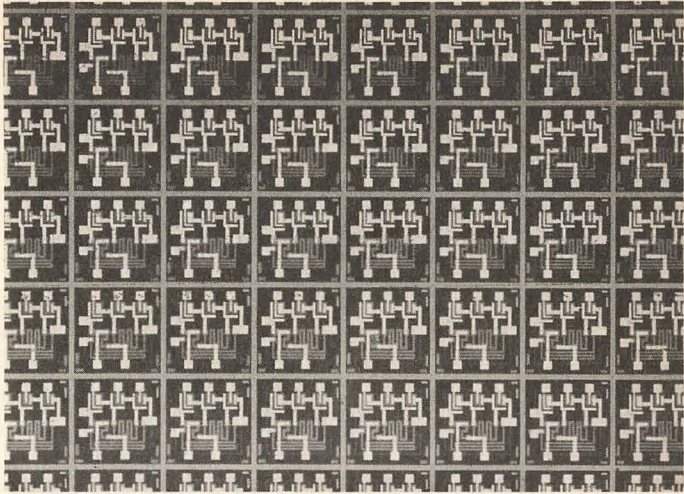


Bild 1.3.4.3 Ausschnitt aus einem Verfahrenszyklus, nach dem Hunderte integrierter Schaltungen gleichzeitig hergestellt werden können (Siemens)

So kann man durch die Anwendung von integrierten Schaltungen die Zahl der Bauelemente, der Verbindungen und vor allem der Lötstellen stark reduzieren. Diese Beschränkung hat eine beachtliche Zunahme der Zuverlässigkeit elektronischer Schaltungen zur Folge.

Die Gesamtzuverlässigkeit einer vollständigen Festkörperschaltung wird sogar mit der Zuverlässigkeit eines einzigen Transistors verglichen. In der Tat ist der Herstellungsprozeß eines IC praktisch derselbe wie der des Transistors, zumal kaum andersartige Verfahren zusätzlich erforderlich sind; es sind lediglich mehr Herstellungsschritte erforderlich.

Wie wir bereits in den Ausführungen über die Anforderungen an die Miniaturtechnik vermerkten, ist die Wirtschaftlichkeit eines Bauteiles insbesondere in der Konsumelektronik besonders wichtig. Die modernen Integrationstechniken ermöglichen die Herstellung von Hunderten von Schaltungen in einem Verfahrenszyklus (Bild 1.3.4.2). Bemerkenswert ist dabei, daß durch die

Zunahme des Integrationsgrades, d. h. also wenn mehr Bauteile integriert werden, die Kosten nicht wesentlich steigen. Mit den Worten der Praxis ausgedrückt: Die Anzahl der Transistoren, die man mehr oder weniger auf dem Siliziumscheibchen herstellt, verteuert die Schaltung nicht wesentlich. Verstärkung kostet wenig. Diese Herstellungsvorteile sind elementare Voraussetzungen für die Großserienfertigung, die dem Anwender in mehrfacher Weise indirekt entgegenkommt.

Der günstige Preis bei Massenproduktion, die leichte Austauschbarkeit der IC's, die Bewältigung des Services bei komplizierten Großgeräten, die Herabsetzung der Reklamationsquoten bei Konsumergeräten und schließlich die leichtere Automatisierung bei der Geräteproduktion sind wirtschaftliche, bedeutungsvolle Vorteile bei der Verwendung von IC's.

Bei der Herstellung von Fernsehgeräten eines bestimmten Typs können durch IC's beispielsweise 50 % mehr an Sicherheit erreicht werden; 60 % weniger sind an Bauteilen erforderlich, und 30 % können an Baukosten eingespart werden.

1.4 Gegenwarts- und Zukunftsaussichten

Der Übergang auf diese Technik ist voll im Fluß. Auf dem Gebiet der HF-Rundfunkempfangsschaltungen gibt es eine Reihe von AM und FM Empfängerschaltungen mit Mischer-Oszillator IC, ZF-Verstärker mit Ratiodektor, Stereodecoder und Abstimmuschaltungen.

Für Fernsehanwendungen sind Videokombinationen, Decoder-schaltungen für PAL, Horizontalsynchronehaltungen erhältlich. Zur Signalverarbeitung bei Bildaufzeichnungsgeräten – beispielsweise für die Luminanzsignalaufbereitung – stehen ebenfalls IC's zur Verfügung. Weitere Schwerpunkte von Entwicklungsaktivitäten sind die hochwertige Tonwiedergabe – insbesondere der Zweikanalton –, Übertragung bei Fernsehgeräten und Sonder-schaltungen, die zur Erhöhung des Bedienungskomforts bei RF-FS- und Hi-Fi-Anlagen dienen wie mikrocomputergesteuerte Abstimm- und Speicherkonzepte, PLL-Abstimmungen, zur direkten Anzeige der Frequenz, Video-Textdecoder.

Bei Tonbandgeräten werden sie als Vorverstärker und Kleinsignalendstufen verwendet. In der Ela- und Hi-Fi-Technik ist, wie wir noch ausführlich sehen werden, ihre praktische Anwendung ebenfalls sehr umfangreich.

Der Trend zeigt dies deutlich. Die Entwicklung führt bereits vom einfachen integrierten Schaltkreis mit bescheidenem Integrationsgrad zur integrierten Großschaltung (LSI)¹ mit über hundert aktiven und passiven Bauelementen in einem Kristall. Aus einem einzigen Halbleiterplättchen werden sogar funktionell verschiedene Schaltkreise zu einem Großschaltkreis oder einer vollständigen elektronischen Schaltung zusammengefaßt.

Man rechnet damit, daß man in einigen Jahren auf bestimmten Sektoren die Geräte ganz in integrierter Technik herstellen wird. Das „Rad der Zeit“ läßt sich nicht mehr zurückdrehen. Die Preise werden weiter fallen, und der Anwendungsbereich der IC's wird ständig zunehmen. Man muß sich daher mit dieser Technik beschäftigen.

1.5 Neue Wege der Schaltungstechnologie

Die integrierte Schaltungstechnik ist nicht allein eine Technik der Integration durch die Addition von Einzelementen. Sie erschöpft sich nicht in einer bloßen Umsetzung und Zusammenfassung von konventionellen Schaltungen zu einem „IC“. Wenn dadurch auch manches bewährte, alte Schaltungskonzept durch Integration miniaturisiert und noch zuverlässiger, wartungsfreier gemacht werden konnte, so mag das sicher in vielen Fällen der Startschuß zur Integration gewesen sein.

Das Charakteristische und Wesensneue daran sind jedoch die mit der IC-Technik gegebenen spezifischen Notwendigkeiten des Systemdenkens, des Analysierens und Neuüberdenkens eines bestehenden Schaltungskonzeptes in IC-Kategorien. Was wir unter IC-Kategorien verstehen, wird sicher nach der Lektüre der nächsten Kapitel noch besser verständlich.

¹ LSI = Long Scale Integration = Integrierte Großschaltungen

Die Hersteller von IC's müssen nach statistischen Erfassungsverfahren und im unmittelbaren Kontakt mit den Anwendern sowie unter Zuhilfenahme von Computern bei der Auswertung diese „komplexen Schaltkreise“ entwickeln.

Eine Durchleuchtung, d. h. eine systematische Analyse aller z. Zt. aktuellen konventionellen Schaltungstechniken in den verschiedenen Anwendungsbereichen, verbunden mit einem schöpferischen Neuüberdenken des Häufigkeitskonzeptes, gehört zu den Voraussetzungen für eine technisch optimale Gestaltung eines IC's und für einen entsprechenden wirtschaftlichen Erfolg.

Die aus den Eigenschaften der IC-Technik sich ergebenden Vorteile und auch Begrenzungen zwingen den Anwender geradezu zu einem Neuüberdenken „seiner Schaltung“, animieren ihn zur Verwirklichung neuer Schaltungskonzepte, zumal sich ihm insbesondere aktive Bauteile, wie Transistoren und Dioden, in gros äusserst preiswert anbieten. Es stehen einfach mehr Bauelemente und mehr Möglichkeiten der Verwirklichung komplizierter, umfangreicher Schaltungstechniken – trotz des Zwanges in IC-Möglichkeiten zu denken, – zur Verfügung.

1.6 Integrationstechniken

Die verschiedenen Integrationstechniken sollen hier zum allgemeinen Überblick und zum Verständnis der Besonderheiten nur kurz beleuchtet werden. Es gibt eine umfangreiche Fachliteratur, die sich mit den Einzelheiten dieser Techniken befaßt. Die hierbei angewendeten Verfahren werden ständig ergänzt, verbessert und verfeinert.

Grundsätzlich kann man z. Zt. folgende Verfahren unterscheiden:

die Schichtschaltungen, wozu die Dünn- und Dickfilmschaltungen zählen, sowie die monolithisch integrierten Schaltungen.

In der Praxis werden alle Verfahren auch kombiniert angewandt. Da sie sich gegenseitig ergänzen, wird die Wahl des Verfahrens in entscheidendem Maße von dem zu bewältigenden Schaltungskonzept bestimmt.

1.6.1 Schichtschaltungen – Dick- und Dünnschichttechnik

Die *Dickschichttechnik* hat viele Parallelen mit der Herstellung von gedruckten Schaltungen und mit der Siebdrucktechnik. Hierbei werden auf einem Plättchen, das aus einem keramikähnlichen Material besteht – dem „Substrat“ (Grundlage, Basis) –, mit Hilfe von leitenden oder isolierenden Pasten und Tinten im Siebdruckverfahren Widerstände, Kapazitäten und kleine Induktivitäten sowie Verbindungsleitungen aufgebracht. Vorlage hierfür ist eine Schaltungsmaske, die auf fotografischem Wege verkleinert ist. Danach wird ein Sieb angefertigt. Mit Hilfe einer Siebdruckeinrichtung wird dann das entsprechende Material für Leiterbahnen, Widerstände, Kondensatoren auf das Substrat gedruckt. Der so im Siebdruck auf dem Trägerplättchen oder Substrat aufgebrachte Film wird dann eingebrannt, die Dickfilmschaltung glasiert und mit Epoxydharz vergossen. Dabei werden aktive Halbleiterelemente als nackte Chips auf das Keramik-Substrat montiert und kontaktiert. Aktive und passive Komponenten, wie Dioden, Zenerdioden, npn, pnp, Transistoren, monolithisch integrierte Schaltungen, Thyristoren und Induktivitäten, Quarze, Trimmerkondensatoren, das heißt Schaltungsbauteile mit unterschiedlichem technologischen Aufbau können dadurch in einem Modul vereinigt werden.

Weitere Vorteile der Dickschicht-Hybridschaltungen

Hohe Packungsdichte, geringes Gewicht, weitgehend universell integrationsfreundlich, dadurch geringe Entwicklungskosten und -Zeiten, große Freiheit für Schaltungsentwickler und günstiges HF-Verhalten. Die Umsetzung großer elektrischer Leistungen ist in Hybridtechnik realisierbar. Das Keramiksubstrat gestattet eine gute Wärmeableitung, hohe Temperaturkonstanz, ist schock- und vibrationsfest. Verringerung der Lötstellen im Vergleich zur Printplattentechnik, daher große Zuverlässigkeit.

Wirtschaftlich

Schichtschaltungen füllen die Lücke zwischen konventioneller Technik, Printplattentechnik und der monolithisch integrierten Technik. Schichtschaltungen sind vor allem dort wirtschaftlich, wo monolithisch integrierte Schaltungen aus physikalischen

Gründen wie aber auch wegen der kleinen bis mittleren Stückzahl nicht infrage kommen, keine allzu hohe Integrationsstufe verlangt wird und die Vorteile der Miniaturisierung und Modultechnik ausgenutzt werden sollen.

Realisierungsmöglichkeiten

Leiterbahnen mit Breiten von ca. $75 \mu\text{m}$,
spezifischer Widerstand von ca. $0,04 - 0,005 \Omega/25 \mu\text{m}$
Schichtwiderstände von $1 \Omega - 100 \text{M}$ mit Toleranzen von $\pm 20 \%$
ohne Abgleich und mit Abgleich besser als $\pm 1 \%$
Belastbarkeit ca. $15 \text{W} / \text{cm}^2$ bei $T = 25^\circ\text{C}$.
Schichtkondensatoren mit Flächenkapazitäten von $2000 \text{pf}/\text{cm}^2$
bis ca. $50 \text{nf}/\text{cm}^2$. Toleranzen von $\pm 2 \%$ ohne Abgleich.
Spannungsfestigkeit ca. 500V .

Praktische Anwendungen

In der Konsumelektronik werden kundenspezifische Schichtschaltungen nach diesen Verfahren für Leistungsschaltungen aller Art wie NF-Leistungsverstärker von $20 - 100 \text{Watt}$, stabilisierte Netzgeräte, zur Zusammenfassung von Einzelwiderständen, Klangsteller- und Filterschaltungen, Antennenverstärker verwendet. In der professionellen Elektronik werden Leistungsschalter, Digital-Analogwandler, Relais-Treiberstufen, Breitbandverstärker und zahlreiche Sonderschaltungen in Dickschichttechnik ausgeführt.

Bei der *Dünnschichttechnik* ist das Substrat ein Glasplättchen oder Film, auf das verschiedene leitende oder dielektrische Schichten durch Aufdampfen im Vakuum oder durch Katodenzerstäubung, durch Plattieren oder chemisch aufgebracht werden. Da die Schichtdicken in der Größenordnung um $1 \mu\text{m}$ und dünner sind, haften sie fest auf dem verwendeten Substrat. Auch bei diesem Verfahren müssen z. Zt. noch aktive Bauteile nachträglich eingesetzt werden. Es wird jedoch daran gearbeitet, bei der Dünnschichttechnik einmolekulare Schichten z. B. durch Diffusion herzustellen.

Die Dünnschichttechnik ermöglicht eine hohe Reproduzierbarkeit der Schaltungsstrukturen. Die von der zu realisierenden

Schaltung angefertigte Maske wird meist erst stark vergrößert und dann wieder verkleinert auf fotografischem Wege auf das Substrat übertragen. Die Maske enthält sämtliche aus dem Schaltbild resultierenden Verbindungsbahnen, Widerstände und Kontaktpunkte, auf die dann nachträglich die aktiven Bauteile montiert werden.

Bild 1.6.1.1 zeigt eine maßgeschneiderte Dünnschichtschaltung. Die Firma Valvo entwickelte unter den Typenbezeichnungen OM 193 und OM 194 zwei Impedanzwandler für Elektret-Mikrofone, die in Dünnschichttechnik hergestellt werden. Als Basismaterial wird ein Keramik-Substrat mit den Abmessungen $5,4 \times 4,5$ mm verwendet, das auf der Bauelemente-Seite mit Kunststoff vergossen wird. Die Eingänge der Impedanzwandler sind durch antiparallelgeschaltete Dioden gegen Überspannung geschützt. Die Dioden und Fets werden nachträglich eingesetzt und 4 Anschlußfahnen herausgeführt.

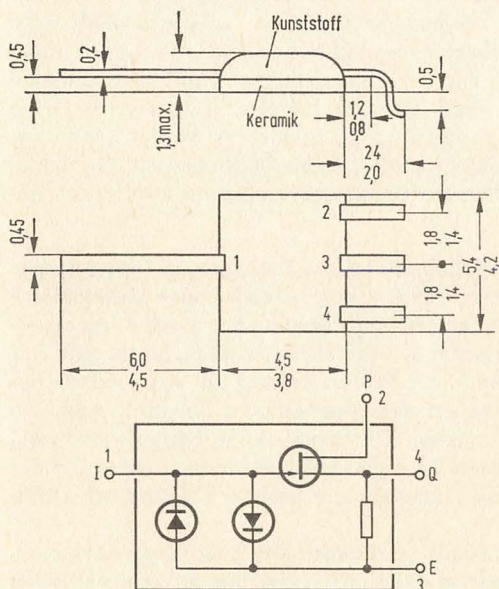


Bild 1.6.1.1 Schaltung, Abmessungen und Anschlüsse der Impedanzwandler OM 193 / OM 194 (Valvo)

Weitere Anwendungen von Hybridschaltungen in Dünnschichttechnik sind: rauscharme Breitband-Antennen-Verstärker bis zu ca. 1 GHz, Leitungsverstärker in Trägerfrequenzsystemen mit harten Toleranzanforderungen und sehr hoher Langzeitkonstanz. Diese harten Anforderungen sind mit Dünnschichtschaltungen technisch und wirtschaftlich realisierbar.

1.6.2 Monolithisch integrierte Technik

Die Feststellung, daß man durch unterschiedliche Bearbeitung eines Halbleiter-Kristalls aktive und passive Bauteile z. B. auf oder in einem mikroskopisch kleinen einkristallinen Siliziumplättchen herstellen kann, ist der Ausgangspunkt der stürmischen Entwicklung von integrierten Halbleiterschaltungen. – So können Transistoren, Dioden, Kondensatoren, Widerstände und Verbindungsleitungen durch die verschiedenartigen Verfahren, wie Aufdampfungs-, Legierungs-, Ätzverfahren, durch Dotierungs- und verschiedene Diffusionsprozesse in oder auf diesem winzigen Siliziumplättchen hergestellt werden. Dabei spielt die sogenannte Planartechnik eine entscheidende Rolle. Mit ihrer Hilfe lassen sich Halbleiterstrukturen mit völlig ebener Oberfläche herstellen.

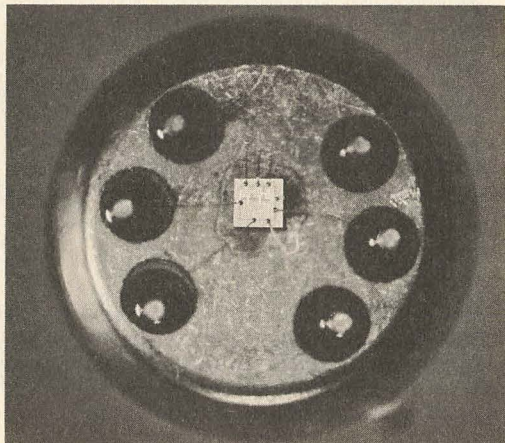
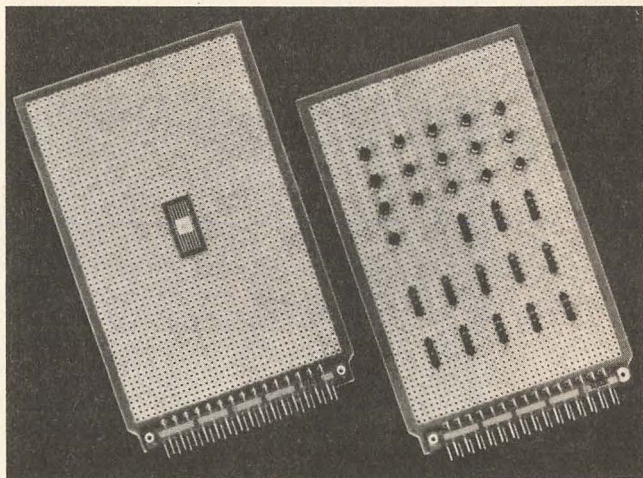


Bild 1.6.2.1
Integrierte
Schaltung
TAA 861
(Siemens)

Das Siliziumplättchen (Chip) kann somit eine ganze integrierte Schaltung, die aus zahlreichen aktiven und passiven Bauteilen besteht, enthalten. Die Anschlüsse des Chips sind meist mit hauchdünnen Drähten (Stärke ca. 0,05 mm), z. B. Golddrähtchen, mit den Gehäuseanschlüssen (Pads) verbunden und in einer Schutzpackung hermetisch versiegelt (siehe **Bild 1.6.2.1**).

Die Kontaktierung erfolgt durch spezielle Kontaktierungstechniken, wie beispielsweise die Ultraschall-Scherenkontaktierung. Der Größenvergleich zwischen bereits schon miniaturisierten Schaltkreisen, die mit diskreten Bauelementen aufgebaut wurden, und IC's welche dieselbe elektrische Funktion erfüllen, zeigt **Bild 1.6.2.2** in eindrucksvoller Weise.

Für unsere Anwendungsfälle stehen insbesondere die monolithischen und integrierten Schaltungen in Hybridtechnik im Vordergrund, bei denen aktive und passive Bauteile mikrominiaturisiert und integriert als komplexes Funktionsgebilde für den Anwender zur Verfügung stehen.



*Bild 1.6.2.2 Integrierter Schaltkreis und diskrete Bauelemente
(Größenvergleich; Siemens)*

In den sogenannten monolithischen (einstofflich) integrierten Schaltungen werden aktive Bauteile, wie z. B. Transistoren, Dioden, gemeinsam mit passiven Bauelementen und Verbindungsleitungen auf demselben Kristallplättchen untergebracht.

Die Herstellung der aktiven und passiven Bauelemente auf diesem winzigen Chip wird durch chemische Diffusionsprozesse erreicht. Die Herstellung einer Schaltung auf einem Monolithen – auf einem Stein – kann gleichzeitig bei einer ganzen Charge von integrierten Schaltungen und in demselben Arbeitsablauf vorgenommen werden (siehe Abb. 1.3.4.3). Das n- oder p-dotierte Kristallplättchen hat einen Durchmesser von etwa 3 mm und eine Stärke von 0.25 mm.

Im Gegensatz hierzu enthält die Multichip-Hybride mehrere Halbleiterchips, die auf einem Träger angeordnet sind. Mit dieser lassen sich viele Kombinationen von aktiven und passiven Bauteilen herstellen. Sie können auch aus mehreren monolithischen IC's bestehen, welche zusammen mit den erforderlichen Verbindungsleitungen und den passiven Bauelementen in ein und demselben Gehäuse untergebracht sind.

Für die Massenherstellung von IC's ist die monolithische Technik wirtschaftlich günstiger. Auf Grund ihrer Flexibilität eignet sich die Hybridtechnik insbesondere für spezielle Anwendungsbereiche in kleinen und mittleren Serien.

Die Automatisierung, der Entwurf und das Herstellungsverfahren vorgefertigter Einzelchips nach dem Baukastenprinzip ermöglichen die Herstellung von „maßgeschneiderten Schaltungen“ mit Hilfe der Hybridtechnik. So werden z. Zt. in Hybridtechnik Referenzelemente, Darlington-Verstärkerstufen und ähnliches hergestellt. Die erläuterten Grundverfahren lassen so eine Reihe von Kombinationsmöglichkeiten (Mischtechniken) zu.

1.7 Bauelemente in integrierten Schaltungen

Der Schaltungsentwickler muß die Besonderheiten und Grenzen der integrierten Schaltungen mit ihren Bauteilen kennen.

Nur dadurch ist er in der Lage, IC's bei seinem Schaltungsentwurf vorteilhaft anzuwenden.

1.7.1 Passive Bauteile

Widerstände

Der Widerstandswert ist von der Bahnlänge des Widerstandsmaterials, dem Bahnquerschnitt, dem verwendeten Material bzw. von der Dotierungskonzentration abhängig. Es können Widerstände bis zu einer Bahnbreite von ca. 10 μm noch mit einer Genauigkeit von rund 20 % hergestellt werden. Einer weiteren Reduzierung der Bahnbreite sind Grenzen durch Maskenungenauigkeiten und Anfälligkeiten aller Art gesetzt.

Hochohmige Widerstände sind daher schwierig herzustellen. Die Erzeugung von Widerständen mit hohen Widerstandswerten würde lange Bahnen auf Kosten der Kristallfläche und damit des erzielbaren Integrationsgrades erforderlich machen. – Die z. Zt. auf dem Markt vorhandenen und für unsere Anwendungen geeigneten integrierten Schaltungen haben Widerstände in der Größenordnung von ca. 50 Ohm bis 50 k Ω .

Kondensatoren

Bei der Herstellung von IC's, insbesondere bei monolithischen integrierten Schaltungen, wird der „Einbau“ von Kondensatoren möglichst vermieden. Der Aufbau eines Sperrschicht-Kondensators, bei dem die Kristalloberfläche als Dielektrikum benützt wird, nimmt zu große Flächen ein. Ein Kondensator von 100 pF würde beispielsweise eine Fläche in Anspruch nehmen, auf der mehr als 12 Transistoren untergebracht werden können. Pro Transistor rechnet man mit einem Flächenaufwand von ca. 0,05 mm². Allgemein findet man bei den IC's Kapazitätswerte bis ca. 50 pF, die meist für interne Kompensationszwecke, zur Vermeidung einer Schwingneigung bei verstärkungsreichen Linear- und Operationsverstärkern verwendet werden.

Mit Hilfe der galvanischen Kopplung der Verstärkerstufen in einem IC läßt sich die Verwendung von unwirtschaftlich hohen Kapazitätswerten umgehen.

Bild 1.7.1.1 Aktives Tiefpaßfilter

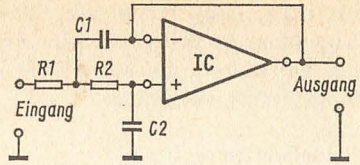
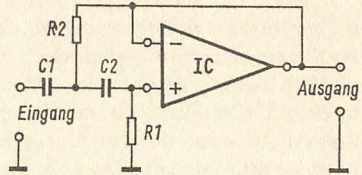


Bild 1.7.1.2 Aktives Hochpaßfilter



Induktivitäten

Die Integrierung von Induktivitäten ist mit großen Schwierigkeiten verbunden, und hohe Induktivitätswerte sind praktisch nicht realisierbar. Schaltungen mit Induktivitäten werden daher bei der Verwendung von IC's auf Ersatzschaltungen, z. B. aktive Filterschaltungen, umgestellt (**Bild 1.7.1.1 und 1.7.1.2**).

1.7.2 Aktive Bauteile

Transistoren

Die Herstellung von Transistoren in integrierten Halbleiterschaltungen ist besonders wirtschaftlich, und diese nehmen wenig Fläche ein.

Aktive Bauelemente stehen daher dem Entwickler bei der Verwendung von IC's großzügig zur Verfügung. Das erfordert für den Schaltungsentwickler ein Umdenken von der bisherigen konventionellen Methode, bei der mit aktiven Bauelementen möglichst sparsam umzugehen war.

Diese starke Konzentration an aktiven Bauteilen ermöglicht die wirtschaftliche Verwendung von IC's als Spannungsverstärker mit sehr hohen Spannungsverstärkungen bis ca. 90 dB, als Differenzverstärker und Operationsverstärker. Die galvanische

Stufenkopplung finden wir daher bei den IC's als häufigste Kopplungsart vor. Gleichfalls werden bei gleichstromgekoppelten Verstärkern die Vorteile der kombinierten NPN-PNP-Schaltungstechnik ausgenutzt.

Feldeffekttransistoren

Integrierte Schaltungen mit Feldeffekttransistoren nehmen immer mehr an Bedeutung zu, zumal der Feldeffekttransistor im Gegensatz zum bipolaren Transistor „spannungsgesteuert“ werden kann. Hier steuert eine Elektrode (Gate), die an dem in der Leitfähigkeit veränderlichen „Kanal“ angeordnet ist, den Stromfluß über die Anschlüsse S (Source, Quelle) und Drain, (Abfluß) die miteinander über den „Kanal“ verbunden sind.

Der geringe Leistungsverbrauch wie auch der geringe Platzbedarf des Feldeffekttransistors, die infolge seiner Eigenarten erforderlichen kleinen Kapazitätswerte in den Schaltungen, seine Selbstisolation – was eine hohe Packungsdichte bedeutet – machen ihn für die Verwendung in IC's besonders interessant.

Dioden

Die Herstellung von N- und P-Zonen von Dioden in integrierten Schaltungen erfolgt wie bei den Transistoren, wobei die Emitter-Basis- oder Kollektor-Basis-Übergänge der Transistoren als Dioden verwendet werden.

1.7.3 Mikroelektronik

Die Mikroelektronik befaßt sich daher mit all diesen Herstellungstechniken, die zu stark miniaturisierten Schaltungen mit großer Dichte der Schaltelemente führen. Eine Mikroschaltung kann daher eine integrierte Mikroschaltung (z. B. monolithisch integrierte Schaltung, integrierte Multichipschaltung, integrierte Dünn- und Dickfilmschaltung) wie auch jedes Hybrid-Modul sein, in dem verschiedene miniaturisierte Bauteile mit hoher Packungsdichte zu einer Einheit miteinander elektrisch verbunden sind.

Die kleinsten Abmessungen bzw. Strukturen, die man z. Zt. mit den mikroelektronischen Techniken herstellen kann, betra-

gen bei den gedruckten Leiterplatten ca. 400 bis 2000 μm , bei integrierten Dickfilmschaltungen rd. 100 bis 550 μm , bei integrierten Dünnschichtschaltungen ca. 10 bis 100 μm und bei integrierten Halbleiterschaltungen ca. 1 bis 30 μm .

1.8 Schaltungstechnische Auswirkungen

Auf Grund dieser Besonderheiten der integrierten Schaltungstechnik ergeben sich für den Schaltungsentwickler neue Gesichtspunkte hinsichtlich der Konzipierung von elektronischen Schaltungen, insbesondere auch in der Verstärkertechnik.

Im wesentlichen werden diese Änderungen durch folgende Tatbestände hervorgerufen:

1. Durch die Verwendung von integrierten Schaltungen werden die meist räumlich größeren passiven Bauteile einer Schaltung durch aktive Bauteile entweder ersetzt, oder die Zahl der erforderlichen passiven Bauteile wird stark reduziert.

Im Gegensatz zur bisherigen Schaltungsauslegung, die unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt wurde, kostet plötzlich das Verstärkerelement, die Verstärkung, weniger als bisher. Dem Konstrukteur stehen daher mehr aktive Bauelemente zur Verfügung als früher. Daraus ergeben sich neben wirtschaftlichen Vorteilen folgende technische:

a) starke Verkleinerung der für die Schaltung erforderlichen Mindestvolumen,

b) Schaltungsvereinfachung bei größerer Verstärkung,

c) größere Betriebssicherheit durch den Wegfall weiterer Bauteile mit unterschiedlichen Ausfallzeiten und Verbindungsleitungen. Die Gesamtschaltung reagiert auf Wärme gleich und ist daher verhältnismäßig temperaturunempfindlich. Ein gegenseitiges thermisches Auseinanderlaufen der aktiven Bauteile – was zu einer Zerstörung der Schaltung führen kann – ist dadurch weitestgehend unterbunden.

2. Nachdem bei integrierten Schaltungen aus den bereits erwähnten Gründen die Verstärkungsstufen meist galvanisch gekoppelt sind, reicht der Arbeits-Frequenzbereich eines der-

artigen Verstärkers von den tiefsten Frequenzen bis zur Hochfrequenz bei linearen Anwendungen. Parasitäre Effekte beachten!

3. Die Vorteile der Darlingtonschaltung und des Differenzverstärkers können schaltungstechnisch ausgenutzt werden.

4. Nachdem die verschiedenen Transistoren im IC meist emitttergekoppelt sind, ist das Gesamtphasenverhalten im Nf-Bereich so, wie es nur ein einzelner Transistor wäre. Die somit erzielbare, außerordentlich hohe Stromverstärkung ist beachtlich.

5. Mit Hilfe einer Gegenkopplung kann der Konstrukteur in einem sehr weiten Bereich „seiner“ erforderliche Verstärkung, Bandbreite, Ein- u. Ausgangs-Widerstände, usw. bestimmen.

6. Durch das häufig angewandte Prinzip der Gleichstromkopplung bei IC's können durch eine Gegenkopplung vom Ausgang auf den Eingang Störungen von Einzeltransistoren vermieden werden. Ähnliches gilt für die bei Gleichstromverstärkern auftretende „Drifterscheinung“.

7. Passive Bauteile, wie z. B. Induktivitäten, sollten als extern angeordnetes Bauelement möglichst vermieden werden. Hier bietet sich beispielsweise bei Filterschaltungen, Netzwerken usw. eine Schaltungslösung mit aktiven Bauteilen geradezu an.

1.9 Bauelementeintegration auf Kunststofffolien

Fortschritte bei der Integration passiver Bauelemente auf der Basis von preisgünstigen Kunststoffen ergänzen fast im Gleichschritt den hohen Integrationsstatus bei Halbleitern. So ist es mit CrNi Widerstandsschichten auf Kunststoff-Folien möglich, Widerstände von ca. 10 Ohm – 500 KOhm / 0,5 W / cm² herzustellen. Der Kunststoffträger ermöglicht ferner die Herstellung von Kondensatoren durch entsprechende Leiterbahnstruktur auf beiden Folienseiten. Durch die Lötbarkeit und zusätzliche Versteifung der Folienschaltung ist es möglich, die bisherigen in der Leiterplattentechnik verwendeten Bauelemente auch hier zu verwenden. Die SicuFOL = Siemens-Kupfer-Folien-Technik macht's möglich.