

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 51 (1973)

Heft: 2

Artikel: Integrierte Schaltungen : eine Einführung = Introduction aux circuits intégrés

Autor: Hauri, Ernst R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875274>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 27.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Integrierte Schaltungen – Eine Einführung

Introduction aux circuits intégrés

Ernst R. HAURI, Bern

621.38.049.75–181.45

Zusammenfassung. Es wird eine Übersicht der integrierten Schaltungstechniken gegeben. Der Verfasser skizziert die Entwicklung, die zu diesen Verfahren führte, und erläutert die wichtigsten Begriffe. Einige Betrachtungen gelten dem Integrationsgrad und der Wahl der geeignetsten Technologie für eine bestimmte Aufgabe.

Résumé. On présente ici un aperçu général des techniques des circuits intégrés. L'auteur esquisse le développement qui a conduit à ces procédés et explique les principales notions de base. L'analyse porte aussi sur le degré d'intégration optimal et sur le choix de la technologie la plus appropriée à un problème déterminé.

Circuiti integrati – un'introduzione

Riassunto. L'autore passa in rassegna le tecniche dei circuiti integrati. Egli dà uno scorcio dello sviluppo che portò a tali procedimenti e ne spiega i concetti più importanti. Alcune considerazioni sono dedicate al grado d'integrazione e alla scelta della tecnologia appropriata per un determinato problema.

1. Einige Grundbegriffe

Eine *integrierte Schaltung* (IC = integrated circuit) kann wie folgt definiert werden [1]:

«Schaltung der Mikroelektronik mit grosser Dichte von Schaltungselementen, die als Einheit angesehen wird und bei der mehrere Schaltungselemente derart untrennbar zusammengebaut und untereinander elektrisch verbunden sind, dass die Schaltung hinsichtlich Datenblattangaben, Prüfung, Vertrieb, Anwendung und Instandhaltung als unteilbar gilt.»

Die Funktion einer integrierten Schaltung spielt sich innerhalb eines sehr kleinen Volumens ab, dessen Fläche einige mm² bis cm² beträgt, während die Dicke weniger als 1 µm bis 20 µm (0,001...0,02 mm) ausmacht. Die mechanische Festigkeit der eigentlichen Schaltung wäre also sehr gering, so dass eine Grundplatte (als Träger der Schaltung) nötig ist, die als *Substrat* bezeichnet wird.

Besteht dieses aus dem gleichen Grundmaterial wie die Schaltungselemente selber, so spricht man von *monolithischen integrierten Schaltungen*. «Monolithisch» (aus dem Griechischen) bedeutet ursprünglich etwa «aus einem einzigen Stein bestehend». Als Material kommt ausschliesslich das Halbleiterelement Silizium (Si) in Frage.

Bei den *Schicht- oder Filmschaltungen* wird ein isolierendes Substratmaterial verwendet, nämlich Glas oder Keramik. Die Schaltung wird in Form von dünnen Schichten auf dem Substrat aufgebracht. Man kann nahezu alle Schaltelemente in Form von dünnen Schichten aus Metallen, Dielektrika und Halbleitern darstellen. Es ist zu unterscheiden zwischen *Hybridschaltungen* und *Dünnschichtschaltungen*. Bei den hybriden (gemischten) Schaltungen werden passive Schaltungselemente und Verbindungsleitungen in Dick- oder Dünnschichttechnik hergestellt, während die aktiven Elemente (Transistoren, Dioden), oft auch Kondensatoren, als diskrete Komponenten in einem separaten Schritt auf der Schichtschaltung befestigt werden; hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten [2], [3]. Bei den Dünnschichtschaltungen [4] sind alle aktiven und passiven Schaltungselemente sowie die Verbindungsleitungen als dünne Filme ausgeführt.

1. Quelques définitions de base

Un *circuit intégré* (IC = integrated circuit) peut être défini de la façon suivante [1]:

«Circuit de la microélectronique à grande densité d'éléments, pouvant être considéré comme une unité, dans lequel plusieurs éléments de circuit sont groupés de façon à tel point inséparables et reliés électriquement entre eux que le circuit peut être considéré comme indivisible, tant du point de vue des feuilles de caractéristiques que des essais, des débouchés, de l'utilisation et de l'entretien.»

La fonction d'un circuit intégré se joue dans un très petit volume, les surfaces entrant en jeu pouvant varier de quelques mm² jusqu'au cm², alors que les épaisseurs rencontrées sont comprises entre moins de 1 µm et environ 20 µm (0,001...0,02 mm). La résistance mécanique du circuit proprement dit est très faible, c'est pourquoi il est nécessaire d'avoir recours à un support, que l'on désigne par *substrat*.

Lorsque le substrat est formé du même matériel de base que les éléments de circuit, on parle de *circuits intégrés monolithiques*. «Monolithique» (de racine grecque) signifie à l'origine «qui est d'un seul bloc de pierre». Le seul matériel entrant en ligne de compte pour la réalisation de circuits monolithiques est l'élément semi-conducteur silicium (Si).

Dans les *circuits à couche (ou à film)*, on utilise un substrat isolant, le verre ou la céramique. Le circuit est appliqué sur le substrat sous forme de couches. Il est possible de réaliser pratiquement tous les éléments de circuit sous forme de couches métalliques, diélectriques ou semi-conductrices. Il faut distinguer entre les *circuits hybrides* et les *circuits à couches minces*. Dans les circuits hybrides (mixtes), les éléments passifs et les interconnexions sont réalisés en technique à couche mince ou à couche épaisse alors que les éléments actifs (transistors, diodes), et souvent aussi les condensateurs, sont des composants discrets qui sont fixés sur le circuit à couches dans une étape ultérieure de fabrication; plusieurs possibilités s'offrent à cet effet [2], [3]. Dans les circuits à couches minces [4], tous les éléments actifs et passifs, ainsi que les interconnexions sont exécutés sous forme de couches.

Integrierte Schaltungen (IC) Circuits intégrés (CI)				
Dicke der Schaltung Epaisseur du circuit	monolithische IC CI monolithiques		Schichtschaltungen Circuits à couche	
	MOS (unipolar) (unipolaire)	bipolar bipolaire	Hybridschaltungen Circuits hybrides	
			Dickfilm- technik Technique des couches épaisses	Dünnschicht- technik Technique des couches minces
Fläche d. Schaltung Surface du circuit	~ 1...5 µm	~ 5...20 µm	~ 20 µm	< 1 µm
Substrat - Material Matériel du substrat	Silizium Silicium		Keramik, Glas Céramique, verre	Saphir, Spinell Saphir, spinelle

Fig. 1
Übersicht der integrierten Schaltungen

Figur 1 gibt eine Übersicht der integrierten Schaltungen.

Ein gemeinsamer Vorteil aller integrierten Schaltungen ist die Möglichkeit, fast alle Herstellungsprozesse gleichzeitig auf viele Schaltungen anzuwenden (batch processing), daher niedrigere Preise und geringeres Volumen im Vergleich zu Schaltungen mit diskreten Bauelementen. Die Herstellungsverfahren sind potentiell sehr zuverlässig. Besonders bei den monolithischen integrierten Schaltungen sind jedoch die Erwartungen bezüglich Zuverlässigkeit nicht ganz in Erfüllung gegangen. Dies mag zum Teil die Folge davon sein, dass die Halbleiterindustrie infolge der aufgebauten Überproduktionskapazität zu gedrückten Preisen fabrizieren muss. Besonders zuverlässige Schaltungen, etwa für die Raumfahrt, müssen teurer bezahlt werden. Auch die Fernmeldedienste sind speziell darauf angewiesen, dass sehr zuverlässige Schaltkreise zu vernünftigen Preisen hergestellt werden können.

2. Monolithische integrierte Schaltungen

2.1 Bipolare Schaltungen

Einige Jahre nach der Entwicklung der ersten Formen des Flächentransistors wurde die Möglichkeit erkannt, elektronische Funktionen in festen Blöcken (solid blocks) sich abspielen zu lassen. 1956 stellte Ian Ross in den Bell-Laboratorien einen integrierten Binärzähler her [5]; 1957 liess das Royal Radar Establishment «solid circuits» durch die Firma Plessey entwickeln [6], und 1958 fabrizierte J. S. Kilby (bei Texas Instruments) einen integrierten RC-Oszillator [7]. Dies waren aber alles Laboratoriumsversuche ohne vorerst grössere Folgen, da die Industrie die grossen Entwicklungskosten scheute. Der eigentliche Anstoss kam von der Luftwaffe der USA [8], die hauptsächlich durch die

Le tableau 1 donne un aperçu des différents circuits intégrés.

Un avantage commun à tous les circuits intégrés réside dans la possibilité d'appliquer presque tous les procédés de fabrication en même temps à un grand nombre de circuits (batch processing), ce qui permet d'atteindre des prix et un volume inférieurs comparativement aux circuits réalisés en éléments discrets. Les procédés de fabrication sont potentiellement très fiables. Les espérances dans ce domaine n'ont cependant pas été entièrement confirmées, en particulier pour les circuits intégrés monolithiques. Il faut peut-être en rechercher la cause dans le fait que l'industrie des semi-conducteurs doit produire à des prix bas si elle veut utiliser au mieux sa capacité de fabrication souvent gonflée au delà des besoins réels. Les circuits particulièrement fiables, pour les vols spatiaux par exemple doivent être payés plus cher. Les services des télécommunications sont également intéressés à la fabrication de circuits intégrés très fiables à des prix raisonnables.

2. Circuits intégrés monolithiques

2.1 Circuits bipolaires

La possibilité de réaliser des fonctions électroniques en «blocs solides» (solid blocks) fut reconnue quelques années après le développement des premières formes de transistors à jonction. En 1956, Ian Ross fabriquait, dans les laboratoires Bell, un compteur binaire intégré [5]; en 1957, le Royal Radar Establishment faisait développer des «solid circuits» par la maison Plessey [6], alors qu'en 1958, J. S. Kilby (Texas Instruments) réalisait un oscillateur RC intégré [7]. Ce ne furent cependant que des essais de laboratoire restant d'abord sans grande suite, l'industrie craignant les frais de développement élevés. L'impulsion finale fut donnée par l'armée de l'air des USA [8], qui fut amenée en 1959 à passer un contrat avec la maison Westinghouse pour le développement de circuits intégrés, sous le nom de «molecular electronics», principalement dans l'espoir d'obtenir une meilleure fiabilité, des frais de production et d'entretien inférieurs pour les systèmes électroniques. D'autres firmes (Fairchild, Texas Instruments) entreprirent alors des efforts plus sérieux dans ce domaine, qui bientôt se montrèrent tout aussi fructueux.

Les résultats ne se firent pas attendre. En 1961 déjà, les premiers circuits intégrés (CI) étaient disponibles sur le marché. La technique de fabrication des transistors bipolaires avait atteint un degré de développement quasi définitif. Les procédés développés se révélèrent très utiles pour la fabrication des circuits intégrés:

Épitaxie: Il est possible de faire croître épitaxialement (en continuant la structure monocristalline du silicium) sur un substrat de silicium une couche mince de silicium aux propriétés désirées.

Aussicht, dank integrierten Schaltungen bessere Zuverlässigkeit sowie niedrigere Herstellungs- und Unterhaltskosten der elektronischen Systeme zu erhalten, dazu bewogen wurde, im Jahre 1959 mit der Firma *Westinghouse* einen Vertrag für die Entwicklung von integrierten Schaltungen unter der Bezeichnung «molecular electronics» abzuschliessen. Dadurch wurden andere Firmen (*Fairchild*, *Texas Instruments*) veranlasst, grössere Anstrengungen zu unternehmen, die sich bald als mindestens so wichtig erwiesen.

Die Resultate kamen rasch, denn schon 1961 waren die ersten monolithischen IC's kommerziell erhältlich. Die Technik der Herstellung von bipolaren Transistoren hatte gerade einen gewissen Abschluss erreicht. Die entwickelten Verfahren erwiesen sich als äusserst nützlich für die Fabrikation der integrierten Schaltungen:

Epitaxie: Auf einem Si-Substrat kann man eine dünne Si-Schicht von gewünschten Eigenschaften epitaktisch (in Fortsetzung der Einkristallstruktur des Substrats) aufwachsen lassen.

Diffusion: In Gegenwart eines Dichtegradienten der Störstellenatome wandern diese in Richtung niedrigerer Konzentration. Dadurch kann die Leitfähigkeit (P oder N) im Innern eines Halbleiters bis auf eine gewisse Tiefe von der Oberfläche her mit guter Genauigkeit beherrscht werden.

Oxydation: Die Si-Oberfläche kann mit einer Schicht von SiO_2 bedeckt werden. Diese dient als Diffusionsmaske, zur Passivierung der Oberfläche, als Isolator gegenüber metallischen Verbindungen über der Oberfläche und als Dielektrikum zur Bildung von Kapazitäten. (Neuerdings haben auch andere Dielektrika, wie Aluminiumoxyd Al_2O_3 oder Siliziumnitrid Si_3N_4 , einige der Funktionen des Siliziumoxyds übernommen.)

Photolithographie: Mit Hilfe von Photomasken, lichtempfindlichen Lacken (Resist) und Ätzmitteln können Fenster in das SiO_2 geätzt werden, welche die Diffusion der Störstellenatome an den gewünschten Stellen erlauben, um zum Beispiel Basis und Emitter eines Transistors auszubilden.

Als grundlegend erwies sich die von Fairchild entwickelte Technik zur Herstellung von Planartransistoren [9]. Beim diskreten Transistor wird der Kollektoranschluss an die Emitter und Basis gegenüberliegende Oberfläche des Si-Plättchens geführt, bei der integrierten Schaltung jedoch an die gleiche Oberfläche. In [10] ist die heute übliche Technologie für bipolare IC's kurz dargestellt. (Die Versuche mit IC's vor 1960 waren mit anderen Techniken gemacht worden.) Fairchild führte auch die Dünnschichttechnik für die Herstellung der Verbindungen an der Oberfläche des IC ein, wobei photolithographische Methoden benutzt werden.

Die bipolaren IC's arbeiten mit bipolaren Transistoren, in der Regel vom NPN-Typ, seltener PNP (diese meist als

Diffusion: A partir d'un certain gradient de concentration des atomes extrinsèques, ceux-ci se déplacent en direction d'une concentration plus faible. Il est ainsi possible de déterminer la conductibilité (P ou N) à l'intérieur d'un semi-conducteur avec une bonne précision, jusqu'à une certaine profondeur à partir de la surface.

Oxydation: La surface de silicium peut être recouverte d'une couche de bioxyde de silicium (SiO_2). Celle-ci est alors utilisée en tant que masque de diffusion, pour la passivation de la surface, en tant qu'isolant à l'égard de conducteurs métalliques placés sur la surface, ou en tant que diélectrique pour la réalisation de capacités. (Plus récemment, d'autres diélectriques tels que l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 et le nitrure de silicium Si_3N_4 ont remplacé l'oxyde de silicium dans certaines de ses fonctions).

Photolithographie: A l'aide de masques photographiques, de laques photo-sensibles (resist) et de solutions corrosives, il est possible de créer des fenêtres dans l'oxyde de silicium, qui permettent la diffusion d'atomes extrinsèques, à l'endroit voulu, pour former la base et l'émetteur d'un transistor, par exemple.

La technique de fabrication de transistors planars, développée par Fairchild s'est révélée comme fondamentale [9]. Dans le transistor discret, le collecteur est connecté sur la plaquette de silicium, à l'opposé de la base et de l'émetteur, alors que, dans les circuits intégrés, ce raccordement se fait du même côté. La technologie actuelle courante des circuits intégrés bipolaires est brièvement exposée dans [10]. (Les essais réalisés avec des circuits intégrés avant 1960 faisaient appel à d'autres techniques.) Fairchild introduisit également la technique des couches minces pour la réalisation des interconnexions à la surface des CI, en utilisant des méthodes photolithographiques.

Les circuits intégrés bipolaires travaillent avec des transistors bipolaires, en règle générale de type NPN, plus rarement PNP (ces derniers le plus souvent en tant que transistors latéraux, voir [10]). Il s'est avéré que c'est le transistor qui est le meilleur marché dans les circuits intégrés; sous le rapport des frais de production viennent ensuite les résistances puis les condensateurs. Il faut en chercher la raison dans la surface nécessaire à la réalisation de ces éléments. (Dans les circuits constitués d'éléments discrets, le rapport est inverse: les résistances et condensateurs sont le meilleur marché, alors que les transistors sont le plus coûteux). Dans les circuits monolithiques, les inductivités sont irréalisables. On évite également presque totalement l'utilisation de condensateurs et très souvent celle de résistances (en remplaçant, par exemple, les résistances de charge par des transistors) [10]. Une technique des circuits appropriée permet même de renoncer, dans certains cas, à l'utilisation de transformateurs. Par rapport au circuit conventionnel, le circuit mono-

Lateraltransistoren, siehe [10]). Es hat sich gezeigt, dass der Transistor in IC's am billigsten herzustellen ist; teurer kommen Widerstände und noch teurer Kondensatoren. Der Grund hierfür ist die benötigte Fläche. (In Schaltungen mit diskreten Bauelementen sind diese Beziehungen gerade umgekehrt; Widerstände und Kondensatoren sind am billigsten, die Transistoren am teuersten). Induktivitäten sind in monolithischen Schaltungen nicht herstellbar. Man vermeidet Kondensatoren fast gänzlich, auch Widerstände häufig (zum Beispiel Transistoren als Ersatz für Lastwiderstände) [10]. Sogar Transformatoren können dank einer gewandten Schaltungstechnik ersetzt werden. Gegenüber einer konventionellen Schaltung zeichnet sich eine monolithische Schaltung durch eine sehr grosse Zahl von Transistoren aus. Diese Überlegungen gelten in erster Linie für *lineare* integrierte Schaltungen, die wegen dieser und anderer Probleme [10] einige Jahre später als die digitalen IC's auf dem Markt erschienen (der erste Operationsverstärker μA 709 kam 1965 heraus).

Digitale IC's waren einfacher herzustellen und leicht in «logischen Familien» zu standardisieren. Sie fanden sofort in grossen Stückzahlen Absatz in Computer- und Steuerungsschaltungen. Figur 2 zeigt die gebräuchlichsten Grundsaltungen von bipolaren Logikfamilien, zusammen mit der logischen Funktion (positive Logik) und der Arbeitstabelle.

Die Arbeitstabelle gibt die Beziehung zwischen den Werten der digitalen elektrischen Grössen an den Eingängen und Ausgängen an (H = hoch, high; L = tief, low). Sie ist nicht mit der Wahrheitstabelle zu verwechseln, die eine weniger eindeutige Charakterisierung der Schaltung ergibt, da den elektrischen Werten der Ein- und Ausgangsgrössen verschiedene logische Werte zugeschrieben werden können.

Fig. 2a und 2b zeigen Schaltungen, die schon in diskreter Technik üblich waren. RTL (resistor transistor logic) wird heute noch fabriziert. Bei der DTL-Schaltung (diode transistor logic) von Figur 2b ist die zusätzliche Vorspannung U_{s2} unbequem, die für eine eindeutige Sperrung des Transistors bei tiefem Eingang sorgt. Die Schaltung wurde daher modifiziert, indem die Diode D1 durch den Emitterfolger T1 ersetzt wurde; siehe Figur 2c. Dies ermöglicht einen höheren Treiberstrom für T2 und damit schnelleres Abschalten, grösseren Ausgangsfächer und geringere Verlustleistung. Diese Schaltung konnte nach Figur 2d noch schneller gemacht werden, indem die Eingangsdiode durch einen Transistor T1 mit Mehrfach-Emitter ersetzt wurden (Transistor-Transistor-Logik). Der Transistor T2 entspricht der Diode D2 (Spannungsabfall über der Basis-Emitterstrecke). Die Ausgangskonfiguration mit T4 und D ermöglicht eine niedrige Ausgangsimpedanz bei hohem und tiefem Ausgang. Die HTL-Schaltung (high level transistor logic) nach Figur 2e entspricht dem modifizierten

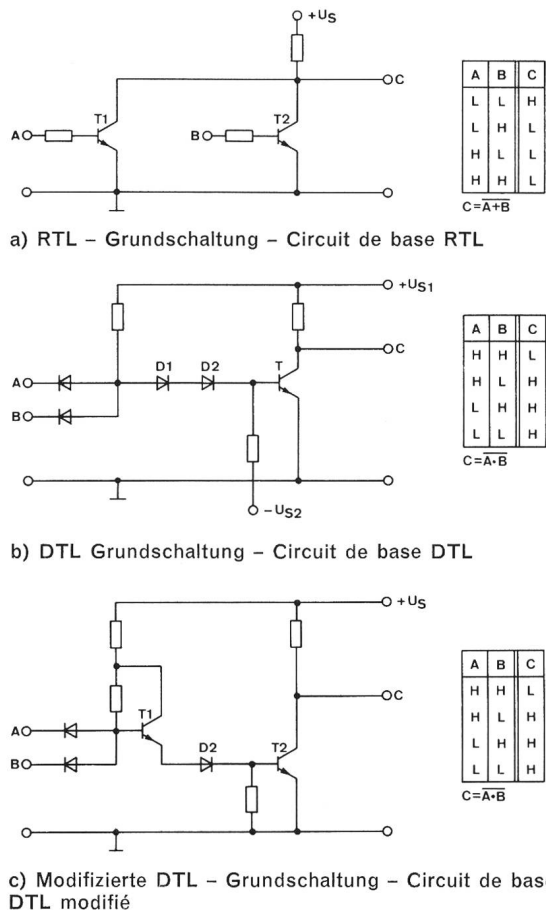
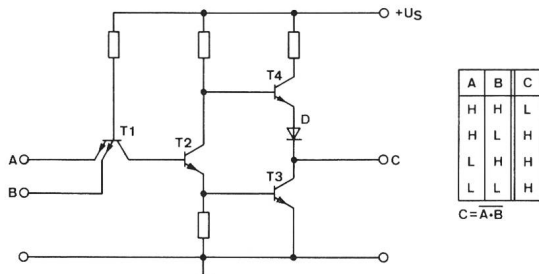


Fig. 2

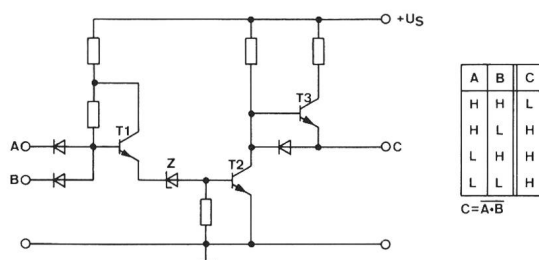
Grundsaltungen der gebräuchlichsten bipolaren Logikfamilien, logische Funktion und Arbeitstabelle (H = high, L = low)

lithique se distingue par un très grand nombre de transistors. Ces considérations sont valables avant tout pour les circuits intégrés *linéaires* qui, étant donnés les problèmes déjà cités et d'autres encore [10], n'apparurent sur le marché que quelques années après les circuits intégrés digitaux (le premier amplificateur opérationnel μA 709 date de 1965).

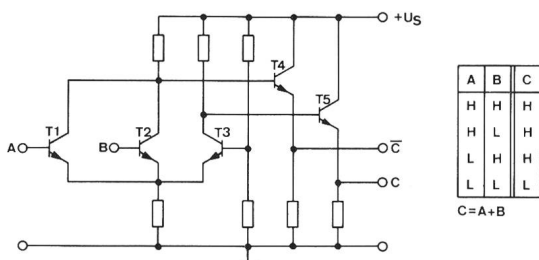
Les circuits intégrés *digitaux* étaient plus simples à réaliser et pouvaient plus facilement être groupés en «familles logiques». Ils trouvèrent immédiatement des applications importantes dans la technique des ordinateurs et des systèmes de commande. La figure 2 reproduit les circuits fondamentaux les plus utilisés pour les familles logiques bipolaires, avec leur fonction logique (logique positive) et le tableau de fonctionnement correspondant. Le tableau



d) TTL – Grundsaltung – Circuit de base TTL



e) HTL – Grundsaltung – Circuit de base HTL



f) ECTL – Grundsaltung – Circuit de base ECTL

Fig. 2

DTL, wobei die Diode D2 durch die Zener-Diode Z ersetzt wurde. Diese Schaltung wird mit höherer Speisespannung betrieben und ergibt hohen Spannungshub und damit besseren Störabstand. Die ECTL-Schaltung nach Figur 2f (emittergekoppelte Transistorlogik) war ebenfalls schon in diskreter Form üblich. Die Transistoren werden nicht in die Sättigung getrieben. Dank dem Ausbleiben der Speicherzeit handelt es sich um die schnellste Logikfamilie.

Alle diese Grundsaltungen gibt es in verschiedenen Versionen, die sich in den drei Hauptcharakteristiken Laufzeit (propagation time), Störabstand und Verlustleistung unterscheiden. Die Grundsaltungen können zu Verknüpfungsschaltungen (kombinatorischen Schaltungen) und Folgeschaltungen (sequentiellen Schaltungen), wie Kipp-

de funktionierung indique la relation entre les valeurs des grandeurs électriques digitales mesurées aux bornes d'entrée et de sortie (H = high, haut; L = low, bas). Il n'est pas à confondre avec la table de vérité qui caractérise moins bien le circuit, des valeurs logiques différentes pouvant être attribuées aux valeurs électriques d'entrée et de sortie.

Les figures 2a et 2b reproduisent des circuits qui étaient déjà courants en technique discrète. Les circuits RTL (logique résistance-transistor) sont encore fabriqués de nos jours. En ce qui concerne les circuits DTL (logique diode-transistor) de la figure 2b, la tension de polarisation U_{s2} qui assure le blocage correct du transistor lorsque le niveau à l'entrée est bas, est gênante. Le circuit fut modifié, en ce sens que la diode D1 fut remplacée par le montage à collecteur commun T1 (voir fig. 2c). Cette solution permet un plus grand courant d'attaque pour T2, donc une commutation plus rapide, une plus grande capacité de charge et une diminution sensible de la puissance dissipée. Ce circuit put être rendu encore plus rapide en remplaçant les diodes d'entrée par un transistor T1 à émetteur multiple, selon la figure 2d (logique transistor-transistor). Le transistor T2 correspond à la diode D2 (chute de tension à la jonction base-émetteur). La configuration de sortie comprenant T4 et D permet d'obtenir une impédance de sortie faible, pour des niveaux de sortie bas ou élevés. Le circuit HTL (high level transistor logic) selon figure 2e correspond au circuit DTL modifié, dans lequel la diode D2 a été remplacée par une diode Zener Z. Il est exploité sous une tension d'alimentation plus élevée et assure une plus grande excursion de tension, ayant pour conséquence un rapport signal/bruit plus favorable. Le circuit ECTL, selon figure 2f (logique transistor à émetteur couplé) était également déjà utilisé sous forme discrète. Les transistors ne sont pas exploités à saturation. Etant donnée l'absence de temps d'accumulation, il s'agit de la famille logique la plus rapide.

Tous ces circuits peuvent être obtenus en diverses versions qui se distinguent dans leurs trois caractéristiques principales, le temps de propagation (propagation time), le rapport signal/bruit et la puissance dissipée. Les circuits de base peuvent être groupés en circuits combinatoires et en circuits séquentiels (tels que bascules, registres à décalage, mémoires, etc.). Il s'en trouve un nombre important sur le marché, provenant de divers fournisseurs.

2.2 Circuits MOS

Les transistors MOS (MOS = metal-oxyde-semiconductor) ayant été développés plus tard, les circuits intégrés MOS apparurent après les bipolaires, soit en 1965. (La seconde forme du transistor unipolaire, le transistor à effet de champ à jonction, n'apparut pratiquement jamais sous forme intégrée). L'électrode de grille est souvent réalisée en silicium polycristallin plutôt qu'en métal (Al),

schaltungen, Schieberegister, Speicher, zusammengebaut werden, deren es heute von verschiedenen Herstellern eine grosse Zahl auf dem Markte hat.

2.2 MOS-Schaltungen

Entsprechend der späteren Entwicklung des MOS-Transistors (MOS = metal-oxide-semiconductor) kamen auch die integrierten MOS-Schaltungen später als die bipolaren in Erscheinung, nämlich 1965. (Die zweite Form des Unipolartransistors, der Sperrschicht-Feldeffekttransistor (junction FET), trat praktisch nie in integrierter Form auf.) Die Gate-Elektrode wird statt aus Metall (Al) auch aus polykristallinem Silizium geformt, was vor allem eine niedrigere Schwellenspannung, neben anderen Vorteilen, ergibt. Gewohnheitsmässig werden solche Schaltungen trotzdem MOS-IC's genannt. – Eine Übersicht der monolithischen MOS-Schaltungen gibt [11]. Diese Schaltungen arbeiten ziemlich langsam.

Für einen ausführlicheren Vergleich der digitalen integrierten Schaltungen, als hier möglich ist, siehe zum Beispiel [12].

2.3 Der Integrationsgrad

Die ersten IC's hatten etwa 10 Schaltungselemente auf einem Plättchen (Chip) von einigen mm² Fläche, entsprechend einer oder zwei logischen Torschaltungen. Man lernte bald, die Schaltungselemente zu verkleinern, und so konnte die Komplexität der Schaltung erhöht werden, indem viele Tore miteinander verbunden wurden. Es entstand das Schlagwort vom «computer on a slice» [13]. Etwas später begann man bescheidener von «large-scale integration» (LSI) zu reden, wohl angeregt durch *John von Neumann*, der bereits 1946 über die Grundlagen von «large-scale computing machines» nachdachte. Auf deutsch werden etwa die Bezeichnungen «Grossschaltkreis» oder «Gruppenintegration» verwendet. LSI wird als die Verbindung von 100 oder mehr logischen Torschaltungen definiert. Man führte dann auch noch die «medium-scale integration» (MSI; 12...100 Torschaltungen) und «small-scale integration» (SSI, weniger als 12 Torschaltungen) ein. In Schaltungselementen ausgedrückt bedeutet LSI über etwa 1000 Elemente je Chip, während die Grenze zwischen SSI und MSI bei etwa 100 Schaltungselementen je Plättchen liegt.

Der LSI sind jedoch Grenzen gesetzt, vorerst durch die Unvollkommenheit der Ausgangsmaterialien und der Herstellungsprozesse. Die Si-Einkristalle sind nicht ganz fehlerlos, so dass sich je Si-Scheibe immer eine gewisse Anzahl unbrauchbarer Schaltungen nur schon aus diesem Grund ergibt. Die Ausbeute (yield) sinkt um so mehr ab, je höher die Anzahl der Prozesse, die Anzahl der Defekte je Flächeneinheit, die bei jedem Prozess entstehen, und die

ce qui, entre autres avantages, permet d'atteindre des tensions de seuil plus basses. Ces circuits sont cependant, selon l'habitude, encore désignés par CI-MOS. Un aperçu des circuits monolithiques MOS est donné dans [11]. Ils sont relativement lents.

Pour une comparaison plus complète des circuits intégrés digitaux le lecteur pourra se référer, par exemple, à [12].

2.3 Le degré d'intégration

Les premiers CI comportaient environ 10 éléments de circuit sur une puce de quelques mm² de surface, correspondant à une ou deux portes logiques. On apprit bientôt à réduire l'encombrement des éléments et à augmenter la complexité des circuits en connectant plusieurs portes ensemble. L'expression «computer on a slice» (ordinateur sur puce) prit naissance [13]. Plus tard on devint plus modeste en parlant de «large scale integration» (LSI), peut être sous l'impulsion de *John von Neumann*, qui en 1946 déjà, pensait au principe des «large scale computing machines». En français on pourrait penser à l'expression «intégration à grande échelle». Les circuits LSI sont définis comme étant la connexion d'un nombre de portes logiques égal ou supérieur à 100. On introduisit également d'autres définitions telles que «medium-scale integration», intégration à moyenne échelle, (MSI, de 12 à 100 portes logiques) et «small-scale integration», intégration à petite échelle, (SSI, moins de 12 portes logiques). Si l'on veut exprimer le nombre d'éléments de circuit par puce, on peut dire que le circuit LSI en comprend plus de 1000, alors que la limite entre les circuits SSI et MSI se situe à environ 100 éléments par puce.

Certaines limites sont toutefois imposées aux circuits LSI, en premier lieu du fait de l'imperfection des matériaux de base et des procédés de fabrication. Les monocristaux de silicium ne sont pas parfaits, raison pour laquelle, sur chaque disque de silicium, un certain nombre de circuits est toujours inutilisable. Le nombre des circuits utilisables (yield) diminue avec l'augmentation du nombre des procédés de fabrication, avec celui des défauts par unité de surface, qui peuvent apparaître lors de chaque procédé de fabrication, et enfin avec la surface des puces. Il s'ensuit que pour un procédé de fabrication donné, il faudra donc rechercher une surface aussi petite que possible des puces. La tendance sera donc d'accroître la densité des éléments de circuit, bien que dans ce domaine également des limites soient fixées par les connexions nécessaires, qui doivent être établies par métallisation. Les interconnexions doivent être disposées sur plusieurs plans, séparés les uns des autres par des couches isolantes (métallisation à plusieurs couches, multilayer metallization [14]). Un autre problème est posé par l'évacuation de la chaleur dissipée. Le nombre des bornes d'entrée et de sortie augmente, comment réaliser le boîtier?

Fläche des Chips ist. So ergibt sich bei feststehenden Prozessen die Forderung, die Fläche des Chips so klein als möglich zu halten. Man wird also die Dichte der Schaltungselemente vergrößern, aber dem sind hauptsächlich Grenzen gesetzt durch die nötigen Verbindungen, die durch Metallisierung hergestellt werden. Die Verbindungsleitungen müssen in mehreren Ebenen übereinander angeordnet werden, die durch isolierende Schichten getrennt sind (Mehrschichtmetallisierung, multilayer metallization) [14]. Ein weiteres Problem ist die Ableitung der entstehenden Wärme. Die Zahl der Eingangs- und Ausgangsanschlüsse nimmt zu: Wie soll man das Gehäuse ausführen?

Alle diese Gesichtspunkte sprechen für die MOS-Schaltungen, die im Vergleich zu den bipolaren IC's kleinere Schaltungselemente haben, weniger Herstellungsprozesse erfordern und weniger Wärme erzeugen. In der Tat sind heute noch keine bipolaren IC's, wohl aber MOS-IC's auf dem Markt, die als LSI angesprochen werden können. Bevorzugt erscheinen Schaltungen, die verhältnismässig wenige Anschlüsse erfordern, wie Schieberegister und Speicher.

Die IC's müssen natürlich auch geprüft werden, nicht nur als Endprodukt, sondern auch einige Male während der Herstellung. Besonders die komplizierten MSI- und LSI-Schaltungen werfen Probleme auf. Ohne programmierte Automaten, die in einigen Sekunden Zehntausende von Tests ausführen können, wären die digitalen IC's kaum wirtschaftlich herzustellen [15]. Die Prüfung einer MSI-Schaltung macht etwa 30% der Gesamtkosten aus, gegenüber etwa 5% bei einem diskreten Transistor; bei LSI steigt der Anteil noch höher.

Es geht also darum, den optimalen Integrationsgrad (RSI = right scale of integration [5]) zu finden. Je komplexer eine integrierte Schaltung wird, desto spezieller ist ihre Anwendung, desto kleiner werden die hergestellten Serien, desto geringer die Ausbeute und desto aufwendiger die Prüfung. Gründe der technischen und wirtschaftlichen Flexibilität sprechen dafür, den Integrationsgrad nicht zu hoch zu treiben. Mehr und mehr scheint es, dass höhere Komplexität durch Einsetzen der IC's in Hybridschaltungen (Dick- oder Dünnschichttechnik) anzustreben ist.

3. Schichtschaltungen

Die Unterscheidung in Hybridschaltungen und Dünnschichtschaltungen wurde schon im Abschnitt 1 eingeführt. Hybridschaltungen können in Dickfilm- oder Dünnschichttechnik ausgeführt werden [2], [3].

Die Bezeichnungen «Dickfilm» und «Dünnschicht» haben sich eingebürgert, obwohl sie ungeschickt sind, da «dick» und «dünn» hier eher relativ gemeint sind. Fundamental ist der Unterschied der Herstellungsprozesse. Bei der Dick-

Tous ces points de vue militent en faveur des circuits intégrés MOS, qui comparés aux circuits intégrés bipolaires, sont réalisés avec des éléments de circuit plus petits, qui demandent un nombre restreint de procédés de fabrication et dissipent moins de chaleur. En effet, aucun circuit intégré bipolaire pouvant être classé dans la catégorie des LSI n'est actuellement disponible sur le marché, alors que tel n'est pas le cas pour les circuits MOS. Il apparaît que les circuits préférés en technique LSI sont ceux qui présentent un nombre restreint de bornes tels les registres à décalage et les mémoires.

Les circuits intégrés doivent être naturellement testés, non seulement en tant que produits finis, mais également quelques fois en cours de fabrication. Ce sont particulièrement les circuits compliqués MSI et LSI qui posent des problèmes. Sans le secours d'automates programmés, capables d'exécuter en quelques secondes des dizaines de milliers d'essais, il serait pratiquement impossible de fabriquer des circuits intégrés de façon rentable [15]. Le test d'un circuit MSI représente environ 30% du coût total, alors que pour un transistor discret la part des frais due aux essais n'est que de 5%. Pour les circuits LSI, cette valeur est encore beaucoup plus élevée.

Il y a donc lieu de rechercher le degré d'intégration optimum (RSI = right scale of integration) [5]. Plus un circuit intégré est complexe, plus les possibilités d'utilisation sont spécialisées. Les séries de fabrication seront donc moins importantes, les circuits utilisables moins nombreux et les essais d'autant plus compliqués. Des raisons de flexibilité technique et économique parlent en faveur d'un degré d'intégration pas trop poussé. Il apparaît de plus en plus que la complexité élevée des circuits doit être atteinte par l'utilisation de circuits intégrés hybrides (en technique à couche épaisse ou mince), les circuits monolithiques jouant le rôle d'éléments de circuit.

3. Circuits à couches

La différence entre les circuits hybrides et ceux à couches minces a déjà été mentionnée au paragraphe 1. Les circuits hybrides peuvent être réalisés en technique à couche épaisse ou mince [2], [3].

Les désignations «couche épaisse» et «couche mince» sont bien ancrées dans les habitudes. Elles ne sont pourtant pas très heureuses, les qualificatifs d'«épais» et de «mince» n'étant que relatifs. Plus importante est la différence dans les procédés de fabrication. La technique des couches épaisses fait appel à la sérigraphie et à la cuisson de pâtes, qui à l'état final ont des propriétés bonnes ou mauvaises conductrices, voire isolantes, permettant la réalisation de conducteurs, résistances et condensateurs. Les couches ainsi obtenues ont une épaisseur d'environ 20 µm. La technique des couches minces a recours à des procédés

filmtechnik handelt es sich um den Siebdruck und das Einbrennen von Pasten, die im Endzustand gut oder schlecht leiten oder auch isolieren, so dass Leiter, Widerstände und Kondensatoren entstehen. Die eingebrannten Schichten sind ungefähr $20\text{ }\mu\text{m}$ dick. Die Dünnschichttechnik verwendet hauptsächlich die Methoden des Aufdampfens oder der Kathodenzerstäubung zum Auftragen von metallischen oder isolierenden dünnen Schichten auf einem Substrat aus Glas oder Keramik. Diese dünnen Filme sind meist weniger als $1\text{ }\mu\text{m}$ dick. Bei MIC's (microwave integrated circuits = Mikrowellen-IC's in Dünnschichttechnik) müssen die dünnen Filme oft galvanisch verstärkt werden, um die Güte der Kreise zu verbessern (Skin-Effekt).

Der Aufschwung der Hybridschaltungen setzte etwa 1960 ein, wie bei den monolithischen IC's, und hatte ebenfalls stärkere Miniaturisierung und Verbesserung der Zuverlässigkeit zum Ziel. Dickfilm-RC-Netzwerke waren allerdings schon zu Ende des Zweiten Weltkrieges für Annäherungszünder (proximity fuses) verwendet worden.

Bei den eigentlichen Dünnschichtschaltungen bestehen sowohl die aktiven als auch die passiven Schaltungselemente aus dünnen Filmen, die auf einem isolierenden Substrat aufgetragen sind. Lange Zeit setzte man grosse Hoffnungen in die Idee, Dünnschichtdioden und -Transistoren (TFT = thin film transistor) aus polykristallinen Halbleiterschichten (Cadmiumsulfid, Cadmiumselenid, Tellur) mit isoliertem Gate zu fabrizieren. Es bestanden jedoch Schwierigkeiten inbezug auf die Stabilität dieser Bauelemente. Neuerdings scheint man sich auf das Material Tellur zu konzentrieren [16]; das Produktionsstadium ist jedoch nicht erreicht worden. Weitere Möglichkeiten bietet die SOS-Technik (silicon on sapphire). Dünne Siliziumschichten werden epitaktisch auf einem Saphir-Substrat aufgetragen. Es können alle passiven Schaltungselemente (R, L, C), Dioden sowie bipolare Transistoren und Feldeffekt-Transistoren mit isoliertem Silizium-Gate (SIGFET) hergestellt werden [4]; siehe auch [11]. Integrierte Schaltungen in SOS-Technik befinden sich bereits auf dem Markt, Integrationsgrad MSI (zum Beispiel 162 FET's auf einem Chip von $2,9 \times 2,6\text{ mm}$). Gegenüber der monolithischen MOS-Technik weisen die SOS-Schaltungen geringere Kapazitäten auf, so dass sie in bezug auf Geschwindigkeit an die bipolaren TTL-Schaltungen herankommen. Statt Saphir verspricht auch Spinell als Substratmaterial gute Resultate [17].

4. Vergleich der Integrationstechnologien

Will man ein Schaltungsproblem in integrierter Technik lösen und findet man keine passenden IC's auf dem Markt, so stellt sich die Frage nach der günstigsten Technologie. Einen ersten Hinweis gibt oft die benötigte Stückzahl. Monolithische IC's sind billiger als Hybridschaltungen in

de vaporisation ou de pulvérisation cathodique, qui conduisent à l'apport de couches minces, métalliques ou isolantes, sur un substrat de verre ou de céramique. L'épaisseur de ces couches est souvent inférieure à $1\text{ }\mu\text{m}$. Pour les circuits MIC, (microwave integrated circuits, circuits intégrés pour micro-ondes), il est souvent nécessaire de renforcer galvaniquement les couches, afin d'améliorer la qualité des circuits (effet de peau).

L'essor des circuits hybrides date, tout comme celui des circuits monolithiques, de 1960 environ. Il conduisit également à une plus grande miniaturisation et une amélioration de la fiabilité. Des réseaux RC à couches épaisses étaient, il est vrai, déjà utilisés à la fin de la dernière guerre dans la construction de détonateurs de proximité (proximity fuses).

Dans les circuits à couches minces proprement dits, les éléments tant passifs qu'actifs sont formés de couches minces fixées sur un substrat isolant. Pendant longtemps, on avait placé de grands espoirs dans l'idée de fabriquer des diodes et des transistors en couches minces (TFT = thin film transistor) à partir de couches semi-conductrices polycristallines (sulfure et séléniure de cadmium, tellure), avec une grille isolée. Certaines difficultés apparurent quant à la stabilité de ces éléments. Plus récemment, il semble que l'on se concentre sur le tellure [16]; le stade de production n'a cependant pas encore été atteint. La technique SOS (silicon on sapphire) offre d'autres possibilités. Des couches minces de silicium sont apportées épitaxialement sur un substrat de saphir. Tous les éléments passifs (R, L, C), les diodes ainsi que les transistors bipolaires et à effet de champ avec grille au silicium isolée (SIGFET) peuvent être réalisés [4], [11]. Des circuits en technique SOS sont déjà sur le marché, degré d'intégration MSI (par exemple 162 transistors à effet de champ sur une puce de $2,9 \times 2,6\text{ mm}$). Comparée à la technique MOS monolithique, la technique SOS permet d'obtenir des circuits de moindre capacité, qui sur le plan de la vitesse se rapprochent des circuits bipolaires TTL. L'utilisation comme substrat de spinelle au lieu de saphir promet de bons résultats [17].

4. Comparaison des technologies d'intégration

Lorsque l'on désire résoudre un problème de circuit en technique intégrée et qu'aucun circuit intégré pouvant convenir ne se trouve sur le marché, la question se pose alors de savoir quelle est la technologie la plus favorable à retenir. Le nombre de pièces nécessaires donne souvent une première indication. A partir de quelques milliers, les circuits monolithiques sont meilleur marché que les circuits hybrides. Il est vrai qu'il peut arriver que la technique monolithique soit inutilisable, en haute fréquence par exemple. Des renseignements plus détaillés touchant la comparaison des circuits monolithiques et hybrides sont donnés dans [2].

Serien von einigen tausend Stück an. Es kann allerdings vorkommen, dass die monolithische Technik nicht anwendbar ist, zum Beispiel bei hohen Frequenzen. Weitere Hinweise zum Vergleich monolithisch-hybrid gibt [2].

Die Wahl zwischen Dick- und Dünnschichttechnik kann schwerer fallen [20]. Die Dickfilmtechnik ist eher für niedrige Frequenzen geeignet. Es ist schwieriger, gut definierte Linien zu ziehen, die bei sehr kleinen Leiterabständen nötig sind, als bei der Dünnschichttechnik. Dünnschichtschaltungen haben kleinere Verluste bei Mikrowellen; immerhin wurden auch schon Mikrowellenempfänger und ähnliches in Dickfilmtechnik hergestellt. Kostenmässig bestehen keine eindeutigen Vergleichsmassstäbe. Im ganzen dürfte die Dünnschichttechnik vielseitiger verwendbar sein als die Dickfilmtechnik. Typische Anwendungen der Dünnschichttechnik sind aktive Filter (RC-Netzwerke mit Operationsverstärkern) [18], Verbindung von MSI-IC's zu komplexeren LSI-Schaltungen, Mikrowellen-IC's (MIC) [19].

Le choix entre la technique à couches épaisses et à couches minces peut être plus difficile [20]. La technique à couches épaisses convient plutôt aux basses fréquences. En technique à couches épaisses, il est plus difficile de tirer des lignes bien définies, comme il est nécessaire de le faire étant données les distances minimales séparant les conducteurs. Les circuits à couches minces ont des pertes moins importantes dans le domaine des micro-ondes; il convient de relever toutefois que des récepteurs et autres appareils pour micro-ondes ont déjà été réalisés en technique à couches épaisses. Sur le plan du coût des équipements, il n'existe pas de points de comparaison significatifs. D'une façon générale, la technique à couches minces devrait être plus universellement utilisable que celle à couches épaisses. Des exemples d'application typique sont les filtres actifs (réseaux RC avec amplificateurs opérationnels) [18], le groupement de circuits MSI en circuits LSI plus complexes et les circuits intégrés pour micro-ondes [19].

Bibliographie

- [1] Deutsche Normen. Mikroelektronik, Grundbegriffe. DIN 41857, September 1969.
- [2] F. Winiger. Hybridschaltungen in Dickfilmtechnik. In diesem Heft, S. 68...73.
- [3] H. P. Herren. Hybridschaltungen in Dünnschichttechnik. In diesem Heft, S. 74...78.
- [4] R. S. Ronen, P. H. Robinson. Recent advances in thin-film silicon devices on sapphire substrates. Proc. IEEE 59 (1971) 10, 1506...1510.
- [5] J. A. Morton. Organizing for Innovation. McGraw Hill, New York 1971.
- [6] G. W. A. Dummer. Integrated electronics development in the United Kingdom and Western Europe. Proc. IEEE 52 (1964) 12, 1412...1425.
- [7] P. E. Haggerty. Integrated electronics—a perspective. Proc. IEEE 52 (1964) 12, 1400...1405.
- [8] J. M. Bridges. Integrated electronics in defense systems. Proc. IEEE 52 (1964) 12, 1405...1411.
- [9] J. A. Hoerni. Planar silicon transistors and diodes. 1960 Electron Devices Meeting, Washington D.C., October 1960; Fairchild Technical Paper TP-14.
- [10] H. Rüegg, W. Thommen. Schaltungsprinzipien für lineare und Mikrowattschaltungen. In diesem Heft, S. 53...60.
- [11] F. Leuenberger. Circuits monolithiques intégrés MOS. In diesem Heft, S. 61...67.
- [12] L. S. Garrett. Integrated-circuit digital logic families. IEEE Spectrum 7 (1970), Heft 10, 46...58; Heft 11, 63...72; Heft 12, 30...42.
- [13] E. A. Sack, R. C. Lyman, G. Y. Chang. Evolution of the concept of a computer on a slice. Proc. IEEE 52 (1964) 12, 1713...1720.
- [14] C. J. Santoro, D. L. Tolliver. Multilayer metallization for LSI. Proc. IEEE 59 (1971) 10, 1403...1409.
- [15] F. van Veen. An introduction to IC testing. IEEE Spectrum 8 (1971) 12, 28...37.
- [16] R. W. Dutton, R. S. Muller. Electrical properties of tellurium thin films. Proc. IEEE 59 (1971) 10, 1511...1517.
- [17] R. Aeschlimann. Jahresbericht 1971 der AFIF; Silizium-Epitaxie. Mitteilungen GFF 28 (1972) 1/2, 59...61.
- [18] S. K. Mitra (ed.). Active Inductorless Filters. IEEE Press, New York 1971 (Auslieferung: Wiley).
- [19] M. Caulton. Film technology in microwave integrated circuits. Proc. IEEE 59 (1971) 10, 1481...1489.
- [20] R. E. Thun. Thick films or thin? IEEE Spectrum 6 (1969) 10, 73...79.