

Technik und Schaltungslehre

Paul · Mikroelektronik

2011

TN4  
P2

8263715

# Mikroelektronik

Technologie- und Schaltungstechnik

---

Prof. Dr.-Ing. habil. Reinhold Paul



E8263715



Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg

**CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

Paul, Reinhold:

Mikroelektronik: Technologie und Schaltungstechnik / Reinhold Paul. –  
Heidelberg: Hüthig, 1981.

ISBN 3-7785-0730-3

Ausgabe des Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1981

© VEB Verlag Technik, Berlin, 1981

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: Offizin Andersen Nexö, Graphischer Großbetrieb, Leipzig III/18/38

# Vorwort



Seit nahezu zwei Jahrzehnten wird die Entwicklung der Elektronik von der ständigen Miniaturisierung durch Integration der Schaltung auf engstem Raum bestimmt. Wesentliche Voraussetzungen dafür waren die Erfindung des Transistors und später die Silizium-Epitaxie-Planartechnik, mit der erstmals mehrere Transistoren zusammen mit Dioden und Widerständen auf einem Silizium-Chip integriert werden konnten. Seither sank der von einer Halbleiterschaltung für eine bestimmte Funktion erforderliche Platz ständig, d. h., es konnten immer mehr elektronische Funktionen auf einem Chip von wenigen Quadratmillimetern integriert werden.

Ein entscheidender Fortschritt gelang vor einigen Jahren mit der Integration ganzer Systeme, wie etwa der Mikroprozessoren, Halbleiterspeicher u. a. m. Solche Mikroprozessoren sind die ersten Bauelemente mit universellem Charakter, denn ihre Funktionen sind von einem Programm abhängig. Im Unterschied zur bisherigen Schaltungsrealisierung mittels Verdrahtung ergibt diese Programmierbarkeit ein sehr komfortables, leistungsfähiges System, das eben durch Programmänderung den unterschiedlichsten Anwendungen angepaßt werden kann. Damit können trotz steigenden Integrationsgrades und wachsender Schaltungsspezifität die aus ökonomischen Gründen notwendigen hohen Stückzahlen gefertigt werden. Diese „Zentraleinheit eines Rechners auf einem Chip“ mit mehreren 10000 Transistoren auf einer Fläche von 20 bis 30 mm<sup>2</sup> stellt einen wichtigen Ausgangspunkt für noch größere integrierte Systeme dar, erwartet man doch für die nächsten Jahre bereits Silizium-Chips gleicher Größe mit rund 1 Million Transistorfunktionen.

Ganz fraglos hat die Mikroelektronik mit derartigen potentiellen Möglichkeiten nicht nur die Elektronik tiefgreifend geändert, sondern sie hat auch ihre Einsatzfälle in den verschiedensten Bereichen enorm vergrößert, wie etwa in der Steuerungs- und Regelungstechnik, der Nachrichten- und Meßtechnik, Datenverarbeitung, Medizin, Unterhaltungselektronik, Kraftfahrzeugtechnik und vielem mehr. Die Zahl möglicher Anwendungsfälle der Mikroelektronik wird heute mit mehr als 25000 angegeben.

Dieses so beträchtlich angewachsene Gebiet der Technik übersichtlich darzustellen ist der Zweck des vorliegenden Buches. Es behandelt sowohl die technischen Grundlagen der Mikroelektronik (Herstellungsverfahren, Realisierungstechniken, Funktionselemente, Schaltungs- und Systemtechniken, Entwurfsbesonderheiten) als auch technisch-ökonomische Aspekte. Auf tiefere Einzelheiten mußte dabei zur Wahrung des Übersichtscharakters bewußt verzichtet werden.

Das Buch wendet sich an den großen Kreis derjenigen, die in dieser oder jener Form mit der Mikroelektronik in Aus- und Weiterbildung, Lehre oder Beruf in Berührung kommen. So dürfte es mit dazu beitragen, die weitere Entwicklung der Mikroelektronik und ihre Anwendung zu beschleunigen.

Mein Dank gilt dem VEB Verlag Technik, besonders dem Lektor Herrn O. Orlik, für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit während der sehr kurzfristigen Realisierung.

Reinhold Paul

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Die Mikroelektronik und ihre Entwicklung</b> .....	9
1.1. Allgemeine Entwicklung .....	9
1.2. Miniaturisierungstechniken .....	15
1.3. Auswirkung der Mikroelektronik auf die Elektronik .....	22
<b>2. Mikroelektronische Technologien und Funktionselemente</b> .....	24
2.1. Filmtechniken .....	24
2.1.1. Technologie der Dickschichtschaltungen .....	24
2.1.2. Technologie der Dünnschichtschaltungen .....	27
2.1.3. Funktionselemente .....	30
2.1.4. Hybridschaltungen .....	36
2.1.5. Anwendungen von Filmschaltungen .....	38
2.2. Technologie der Halbleiterblocktechnik .....	42
2.2.1. Substratherstellung .....	44
2.2.2. Scheibenprozesse der LSI-Technik (Zyklus I) .....	45
2.2.2.1. Epitaxie .....	47
2.2.2.2. Dotierungstechnik .....	49
2.2.2.3. Isolatorschichtherstellung; Schichterzeugung unter Einbezug des Si-Substrates – Schichterzeugung durch Ablagerung .....	56
2.2.2.4. Maskierung und Strukturierung (Fotolithografie) .....	61
2.2.2.5. Metallisierung .....	68
2.2.3. Scheibenprozesse der VLSI-Technik (Zyklus I) .....	68
2.2.3.1. Schichterzeugung .....	70
2.2.3.2. Implantation .....	71
2.2.3.3. Strukturierung .....	76
2.2.3.4. Reinigungs- und Abtragsverfahren .....	80
2.2.4. Montagetechnik (Zyklus II) .....	82
2.3. Funktionselemente der Halbleiterschaltungen .....	88
2.3.1. Bipolartransistor .....	88
2.3.2. Verbundbauelemente .....	95
2.3.3. Vierschichtstrukturen. Integrierter Thyristor .....	97
2.3.4. Metall-Isolator-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MISFET) .....	97
2.3.5. Sperrschicht-Feldeffekttransistor .....	101
2.3.6. Statischer Influenz-Transistor .....	102
2.3.7. Metall-Halbleiter-Feldeffekttransistor .....	103
2.3.8. Dioden .....	105
2.3.9. Widerstände .....	107
2.3.10. Kondensatoren .....	114
2.3.11. Leiterkreuzungen .....	117
2.4. Realisierungstechniken .....	118
2.4.1. Isolationsverfahren .....	118
2.4.1.1. Widerstands isolation .....	119

2.4.1.2. Elektronische Isolation mit Verarmungszonen .....	119
2.4.1.3. Dielektrische Isolation .....	120
2.4.2. Realisierungstechniken für bipolare integrierte Schaltungen .....	123
2.4.3. Realisierungsverfahren für integrierte MIS-Schaltungen .....	128
2.4.3.1. Metallgate-Techniken .....	129
2.4.3.2. Selbstjustierende Techniken .....	131
2.4.3.3. Si-Gate-Techniken (SGT) .....	132
2.4.3.4. Kurzkanaltechniken .....	135
2.4.3.5. CMOS-Technik .....	137
2.4.3.6. SOS-(ESFI-)Technik .....	140
2.4.4. Bipolar-Unipolar-Mischtechniken .....	141
2.4.5. GaAs-Hochgeschwindigkeitstechnologie .....	143
<b>3. Integrierte Analogschaltungen .....</b>	<b>145</b>
3.1. Grundstrukturen integrierter Analogschaltungen .....	147
3.1.1. Konstantspannungsquellen .....	147
3.1.2. Konstantstromquellen .....	150
3.1.3. Differenzverstärkerstufe .....	152
3.1.4. Koppelschaltungen. Potentialverschiebungen .....	155
3.1.5. Ausgangsstufen .....	157
3.2. Integrierte Operationsverstärker .....	158
3.2.1. Eigenschaften .....	159
3.2.2. Aufbau .....	162
3.2.3. Anwendungen .....	166
3.3. Weitere integrierte Analogschaltungen .....	170
3.3.1. Schaltkreise der Heimelektronik .....	170
3.3.2. Komparatoren .....	172
3.3.3. Reglerschaltkreise .....	173
3.3.4. Phasenregelschaltkreise (PLL-Schaltungen) .....	174
3.3.5. Analogfilter .....	175
3.3.6. Analogschalter (Analogmultiplexer) .....	179
<b>4. Integrierte Digitalschaltungen .....</b>	<b>181</b>
4.1. Grundsaltungstechniken .....	185
4.1.1. Kennwerte .....	187
4.1.2. Bipolarschaltungen .....	190
4.1.2.1. Übersteuerungstechniken .....	191
4.1.2.2. Stromschalttechnik .....	203
4.1.3. MIS-Schaltungen .....	207
4.1.3.1. Statische Einkanaltechnik .....	207
4.1.3.2. Statische Komplementärtechnik .....	211
4.1.3.3. Dynamische Schaltungen .....	215
4.1.4. Ladungsverschiebeschaltungen .....	217
4.1.4.1. Eimerkettenschaltung (BBD) .....	218
4.1.4.2. Ladungsgekoppelte Schaltungen (CCD) .....	218
4.1.4.3. Anwendungen .....	221
4.1.5. GaAs-MESFET-Schaltungen .....	223
4.1.6. Vergleich der Eigenschaften digitaler Schaltungstechniken .....	225
4.2. Digitalschaltungen kleineren und mittleren Integrationsgrades .....	229
4.2.1. Kombinatorische integrierte Schaltungen .....	229
4.2.1.1. Multiplexer, Demultiplexer .....	229

4.2.1.2. Kodeumsetzer, Dekodierer .....	231
4.2.1.3. Arithmetikschaltungen .....	233
4.2.2. Sequentielle (speicherhaltige) integrierte Schaltungen .....	235
4.2.2.1. Flipflops .....	235
4.2.2.2. Register .....	238
4.2.2.3. Teiler, Zähler .....	242
4.3. Hochintegrierte Digitalschaltungen und ihre Anwendung .....	245
4.3.1. Probleme aus der Integrationsgraderhöhung. Standard-Kundenschaltkreis ...	245
4.3.2. Halbleiterspeicher .....	249
4.3.2.1. Einteilung der Halbleiterspeicher .....	249
4.3.2.2. Schreib-Lese-Matrix-Speicher (RAM) .....	251
4.3.2.3. Festwertspeicher (ROM, PROM) .....	263
4.3.2.4. Speicher mit seriellem Zugriff (SAM) .....	269
4.3.3. Problemanpaßbare logische Schaltungen .....	272
4.3.3.1. Universalschaltkreise .....	272
4.3.3.2. Programmierbare logische Felder .....	273
4.3.3.3. Festwertspeicher (ROM) .....	275
4.3.4. A/D-D/A-Wandlerschaltkreise .....	275
4.3.4.1. A/D-Wandler .....	276
4.3.4.2. D/A-Wandler .....	281
4.3.5. Mikrorechnerschaltkreise .....	285
4.3.5.1. Mikroprozessoren .....	288
4.3.5.2. Speichereinheit .....	289
4.3.5.3. Eingabe-Ausgabeeinheiten (E/A-Einheiten) .....	290
4.3.5.4. Übersicht der Mikrorechner .....	291
4.3.5.5. Mikrorechneranwendungen .....	297
<b>5. Ökonomisch-technische Kriterien der Mikroelektronik und ihre Entwicklung .....</b>	<b>300</b>
5.1. Wechselwirkung Bauelementehersteller/-anwender .....	300
5.1.1. Aufgabenteilung .....	300
5.1.2. Schaltungsentwurf (Zyklus 0) .....	302
5.1.3. Künftige Entwicklungen .....	306
5.2. Ökonomisch-technische Kriterien der Mikroelektronik .....	308
5.2.1. Scheibengröße, Chipfläche, Ausbeute .....	308
5.2.2. Kosten, Ausbeute, Integrationsgrad .....	310
5.3. Entwicklung und Grenzen der Mikroelektronik .....	316
5.3.1. Entwicklung und Grenzen der technologisch-konstruktiven Parameter .....	317
5.3.2. Systementwicklung der VLSI-Technik .....	323
<b>Literatur .....</b>	<b>326</b>
<b>Sachwörterverzeichnis .....</b>	<b>329</b>

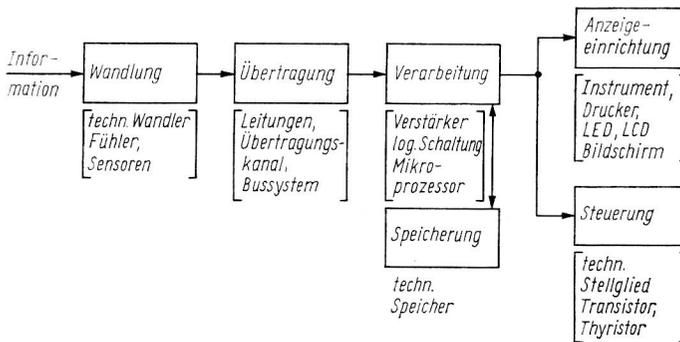
# 1. Die Mikroelektronik und ihre Entwicklung

## 1.1. Allgemeine Entwicklung

Von alters her spielen die Gewinnung, Weitergabe und Verarbeitung von Informationen im täglichen Leben eine entscheidende Rolle.

Historisch bediente man sich dabei verschiedenster physikalischer Medien (z. B. optischer und akustischer Signale, wie etwa Licht, Rauch, Trommel, Ruf). In den letzten 100 Jahren übernahm die *elektrische Übertragung* immer mehr diese Aufgabe. Sie wird heute und in Zukunft zunehmend wieder von optischen und akustischen Methoden flankiert (Laser-, Lichtleiter-, Infrarot-, Ultraschalltechnik, Ortungsverfahren auf dieser Basis u. a. m.).

Eine Informationsübertragung läßt sich als *Informationskette* nach Bild 1.1 darstellen. Sie besteht z. B. in der Elektronik aus einem technischen Wandler, Übertragungs- und Verarbeitungsgliedern, Speichern, Anzeigeeinrichtungen und Stellgliedern. Mit Hilfe der Elektronik selbst werden aber wiederum die technischen Glieder dieser Kette gestaltet und weiterentwickelt. Die technischen Glieder bestehen aus *Bauelementen, Schaltungen*,



**Bild 1.1**  
*Informationskette*  
(in Klammern stehen Elemente,  
die durch die Halbleitertechnik/  
Mikroelektronik realisierbar sind)

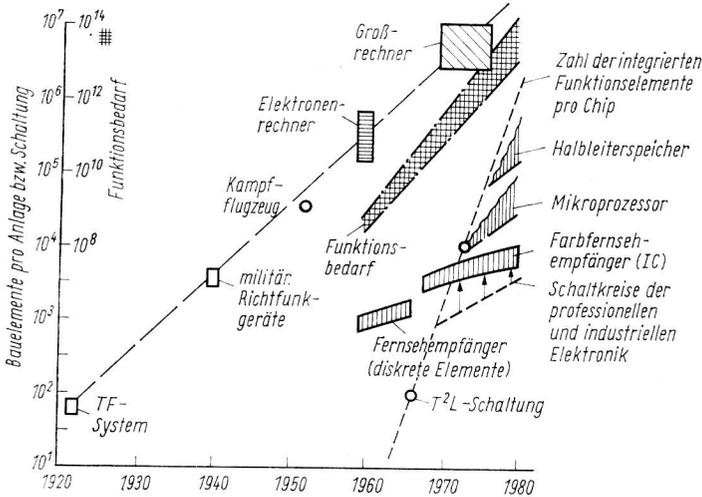
Geräten (bzw. Subsystemen) und ganzen Systemen. Die Entwicklung der Einzelglieder verlief historisch in engster Wechselwirkung zwischen der *Entwicklung elektronischer Bauelementengenerationen* und ihrer Zusammenschaltung zu elektronischen Einrichtungen (Tafel 1.1). Im Gegensatz zur ersten und zweiten Generation elektronischer Bauelemente – der Röhren- und Transistortechnik mit der zugehörigen Schaltungstechnik aus diskreten Bauelementen – leitete die dritte Bauelementengeneration – die Integration von Halbleiterbauelementen und (kleiner) Schaltung – einen tiefgreifenden strukturellen Wandel in der Elektronik ein: *Bauelement und Schaltung bilden eine Einheit, die zerstörungslos nicht mehr getrennt werden kann*. Dies ist das Grundprinzip der Integration. Durch Integration von immer mehr Einzelbauelementen, z. B. für einen Taschenrechner, eine elektronische Uhr u. a. m., bildete sich im Verlaufe von rd. 10 Jahren die *Großintegrationstechnik* heraus. Sie wird heute als vierte Bauelementengeneration angesehen.

Tafel 1.1. Entwicklung der Bauelementengenerationen und Techniken elektronischer Geräte

Gene-ration	Bauelement	Schaltung	Geräte	System	Bezeichnung	Packungsdichte je cm <sup>3</sup>	Merkmal
1.	Elektronenröhre	diskret, dreidimensionale Verdrahtung	Chassisbauweise	Einzelgeräte	klassische Gerätetechnik (Röhrentechnik)	10 <sup>-4</sup> ... 10 <sup>-2</sup>	diskrete Bauelemente Schaltung trennbar
2.	Halbleiterbauelemente	diskret, zweidimensionale Verdrahtung	Leiterplatte	Einzelgeräte	klassische Gerätetechnik (Transistor-technik) → Miniaturtechnik	10 <sup>-2</sup> ... 10 <sup>0</sup> 10 <sup>0</sup> ... 10	
3.	Integrierte Schaltung – Funktionselement	Verschmelzung – kleine Schaltung	Leiterplatte	Einzelgeräte	Mikroelektronik (Kleinintegration)	1 ... 10 <sup>6</sup>	Integrations-technik Einheit von Bauelement, Schaltung (System)
4.	Hochintegrierte Schaltung – Funktionselement	Verschmelzung; Funktionselement, Schaltung, kleines System			Mikroelektronik (Mittel- und Hochintegration)		
5.	Höchstintegrierte Schaltung – Funktionselemente; schaltungsorientierte Realisierungstechnik	Verschmelzung; Funktionselement, Schaltung, große Systeme; schaltungsorientierte Realisierungstechnik			Mikroelektronik (Höchstintegration)	10 <sup>5</sup> ... 10 <sup>8</sup>	
	Funktionsorientierte Realisierungstechnik				Funktionalelektronik		

Die treibenden Ursachen dieser Entwicklung waren:

1. die stetig *wachsende Informationsmenge* und damit der Zwang, Volumen und Masse der Geräte ständig zu vergrößern. Umgekehrt resultierte daraus die Notwendigkeit zur *Miniaturisierung* der Bauelemente und Schaltungen. Die wachsende Informationsmenge verlangte immer größere Bauelementezahlen, wie einige ausgewählte Beispiele beweisen (Bild 1.2).



**Bild 1.2**  
Zeitliche Entwicklung  
des Bauelementeumfangs  
und jährlichen weltweiten  
Funktionsverbrauchs  
(Transistorfunktion)

(nach Noyce, R. N., 6. AIEE Res. Konf. Palo Alto, März 1979)

2. die ansteigenden Gerätekosten und damit die notwendige *Verbilligung* durch Realisierung aus möglichst gleichartigen, standardisierten Schaltungen, die billig und in großer Stückzahl hergestellt werden konnten.
3. der Zwang nach drastischer Verringerung der *Ausfallrate*  $\lambda$  (Tafel 1.2). Eine Ausfallrate  $\lambda = 10^{-7}$  h bedeutet, daß im Durchschnitt von  $10^7$  Bauelementen nur eines pro Stunde ausfällt. Mit steigender Bauelementezahl muß damit die Ausfallrate herabgesetzt werden, wenn ein elektronisches System nur einigermaßen betriebssicher sein

**Tafel 1.2.** Ausfallraten typischer Bauelemente und Einfluß der Umgebungsbedingungen (durch Multiplikationsfaktor von  $\lambda$ )

Ausfallraten typischer Bauelemente		Multiplikationsfaktoren der Ausfallrate	
Bauelemente	Ausfallrate $\lambda/10^6$ h		Faktor
Widerstände	0,001 ... 1	klimatisierte Umwelt	0,1 ... 0,5
Kondensatoren	0,01 ... 0,1	Normalbedingung (Labor und normaler Betrieb)	1 ... 5
Spulen	0,05 ... 1		
Elektronenröhre	10 ... 50	mobiler Einsatz	2 ... 15
Halbleiterdioden	0,05 ... 0,5	Verkehrswesen (Eisenbahn, Kraftverkehr, Schifffahrt)	3 ... 30
Lumineszenzdioden	1		
Transistoren	0,01 ... 0,05	Flugzeug	5 ... 100
Integrierte Schaltung	$10^{-3}$ ... $10^0$	Raumfahrt	> 50
Relais	0,1 ... 10		
Kontakt	0,1 ... 0,5		
Lötverbindung	0,1 ... 5		
Glühlampe	4 ... 50		

soll. Da Ausfälle hauptsächlich bei Kontakten und Verbindungen entstehen, erwächst daraus die *Forderung nach sinkender Zahl der Kontaktverbindungen* besonders bei sehr komplexen Schaltungen mit vielen Elementen. Gerade dieses Problem löst die Mikroelektronik.

4. der Zwang, die Betriebsleistung je Bauelement mit steigender Bauelementezahl herabzusetzen. Benötigt beispielsweise ein Gerät mit 100 elektronischen Bauelementen eine Betriebsleistung von 100 W, also im Mittel 1 W je Bauelement, so würde eine elektronische Einrichtung mit  $10^6$  Elementen bei gleicher Leistungsbeanspruchung  $10^6$  W benötigen. Sollen insgesamt nur 100 W verbraucht werden, so bedeutet das im Mittel  $10^{-4}$  W je Element.

Die Tendenz, die Verlustleistung eines elektronischen Systems herabzusetzen, bedingt mit steigender Integration immer kleinere Signalpegel. Damit wächst andererseits die Störanfälligkeit gegenüber Fremdsignalen.

Die genannten Forderungen wurden erst mit der Erfindung des Transistors, der Entwicklung der Halbleitertechnik und dem Konzept der Integration erfüllbar. Das Ergebnis ist die *Mikroelektronik*:

Die Mikroelektronik umfaßt die innige (nicht zerstörlos trennbare) Verbindung von Bauelementen und Schaltung (mit zunehmend immer mehr Bauelementen) zu einer funktionellen Einheit. Die Schaltung wird durch weitgehend simultane (gleichartige) Bearbeitung vieler Einzelelemente hergestellt. Im Ergebnis entsteht eine *integrierte Schaltung* oder gleichwertig das *integrierte Bauelement*.

Das Besondere dieser Technik besteht im folgenden (Tafel 1.3):

- Die *Herstellungskosten* einer integrierten Schaltung hängen kaum von der Schaltungsfunktion und ihrer Anzahl von Bauelementen ab, sondern wesentlich nur von der verarbeiteten Fläche (Bild 1.3.a). Deshalb sanken die Kosten je Transistorfunktion in der Vergangenheit ständig.
- Mit der weiteren Verkleinerung der Elemente sinken die Herstellungskosten und *Betriebskosten*, und die *Zuverlässigkeit steigt*. Die Ausfallrate  $\lambda$  sinkt also. Grundtendenz: je mehr, um so billiger (Bild 1.3.b).
- Neuartige, bisher nicht realisierbare Schaltungs- und Systemfunktionen mit vertretbarem Aufwand lassen sich realisieren.

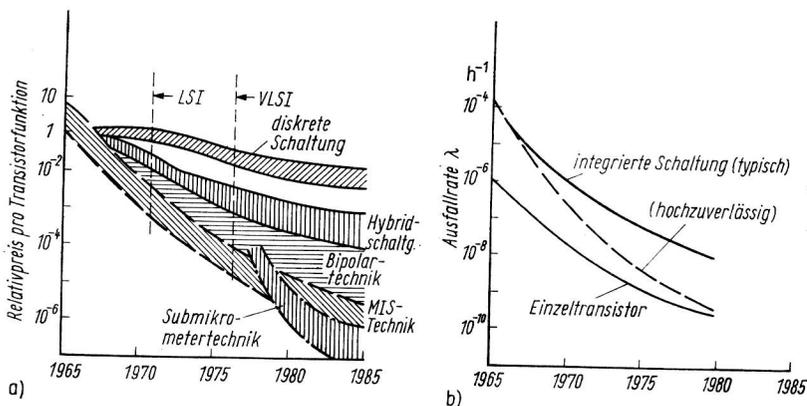


Bild 1.3. Kosten- und Ausfallentwicklung

a) Relativkosten einer Transistorfunktion in verschiedenen Techniken; b) Ausfallrate (mittlerer Integrationsgrad, MSI)

Tafel 1.3. Vorteile der Mikroelektronik

Zielstellung der Elektronik	Begünstigende Eigenschaften der Mikroelektronik
<b>Reduzierung von Gewicht und Volumen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realisierung von Strukturabmessungen im <math>\mu\text{m}</math>-Bereich</li> <li>- Ausnutzung volumensparender Isolationstechniken</li> <li>- flächenhafte Schaltungsauslegung auf dünnem Substrat</li> <li>- volumensparende Verdrahtungstechnik</li> <li>- Wegfall der Einzelverkappung des Funktionselementes</li> </ul>
<b>Senkung der Verlustleistung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Übergang zu kleinen Leistungspegeln möglich und erforderlich</li> </ul>
<b>Steigerung der Zuverlässigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Senkung der Fehlerquellen durch weitgehend automatische Fertigung</li> <li>- Senkung der Zahl innerer Kontaktstellen durch Integration der Verbindungsleitungen</li> <li>- redundante Schaltungen möglich</li> <li>- hohe Beschleunigungsfestigkeit durch geringe Masse</li> </ul>
<b>Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Senkung der Lateralabmessungen verkürzt Verbindungsleitungen und verkleinert parasitäre Elemente</li> </ul>
<b>Kostensenkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- durch kollektive Fertigungsprozesse bei der Schaltkreis-herstellung</li> <li>- Vereinfachung und Automatisierung der Montage</li> <li>- Senkung des Aufwandes der Geräteentwicklung</li> <li>- vereinfachte Wartung durch Wechsel von Funktionsgruppen</li> </ul>

Die Mikroelektronik ist gegenwärtig das entscheidende Gebiet des wissenschaftlich-technischen Fortschritts. Sie hat mit ihren jüngsten Erzeugnissen, den Mikroprozessoren, Halbleiterspeichern und Mikrorechnern, ähnlich tiefgreifende Auswirkungen auf die gesamte Volkswirtschaft wie vielleicht die Erfindung des Elektromotors. So wie er den Übergang vom Transmissionsgesamtantrieb einer größeren Maschinenzahl zum flexiblen Einzelantrieb ermöglichte, erlauben moderne Schaltkreise z. B. den Übergang vom Zentralrechner zum problemangepaßten Kleinrechner, der an jeder Stelle nutzbar ist. Darüber hinaus lassen sich mit der Mikroelektronik Energiebedarf, Volumen und der gesellschaftlich notwendige Arbeitsaufwand senken und Zuverlässigkeit und Gebrauchswert der Erzeugnisse erhöhen. Man rechnet beispielsweise bei Anwendung hochintegrierter Schaltungen grob mit Einsparungen an Entwicklungszeit bis zu 80% und des Fertigungsaufwandes bis zu 70%. Auf dem Gebiet der Arbeitskräfte setzt ein neuer Arbeitsplatz in der Mikroelektronik etwa vier Arbeitsplätze in der Anwenderindustrie frei.

### Begriffsfestlegungen

Da eine mit Gehäuse versehene integrierte Schaltung als Bauelement aufgefaßt wird, die integrierte Schaltung andererseits aus Einzelelementen im bisherigen Sinn besteht, machen sich verschiedene Begriffsvereinbarungen erforderlich:

Ein *physikalisch-elektronisches Funktionselement* (FE) realisiert eine elektronische Funktion (z. B. Energiesteuerung, -umwandlung, -speicherung, -fortleitung oder temporäre Unterbrechung) in einem *Steuerraum* (z. B. Vakuum, Festkörper) unter Einwirkung elektromagnetischer Felder, der Energiewandlung und der Materialeigenschaften. (Beispiele: Widerstand eines Leiters, Kondensatorwirkung, pn-Übergang [Halbleiterdiode], pnp-Struktur [Bipolartransistor]). Das Funktionselement kann Bestandteil einer integrierten Schaltung sein, dann heißt es *integriertes Funktionselement* (Bild 1.4).

Die technische Realisierung des FE dagegen einschließlich seiner Montage in einem Gehäuse heißt:

- *diskretes Bauelement*, wenn im Gehäuse nur ein FE enthalten ist (z. B. Diode, Transistor),
- *integriertes Bauelement* oder auch *integrierte Schaltung*, wenn im Gehäuse zwei oder mehrere integrierte FE enthalten sind (z. B. Mehrfachtransistor, Operationsverstärker, Gatterschaltung).

Werden mehrere FE zusammengeschaltet, so entsteht von der Funktionsaufgabe her gesehen eine *physikalisch-elektronische Funktionsgruppe*, Sub- oder Grundstruktur.

Sie ist entweder in jedem integrierten Bauelement ein- oder mehrfach enthalten oder wird durch Zusammenschalten diskreter Bauelemente realisiert. Das konstruktive technologische Ergebnis heißt *Baustein*, in unserem Falle aber *integriertes Bauelement*. Beispiel: Operationsverstärker in einem Gehäuse. Er besteht aus einer Reihe von Substrukturen (s. Abschn. 3.1.).

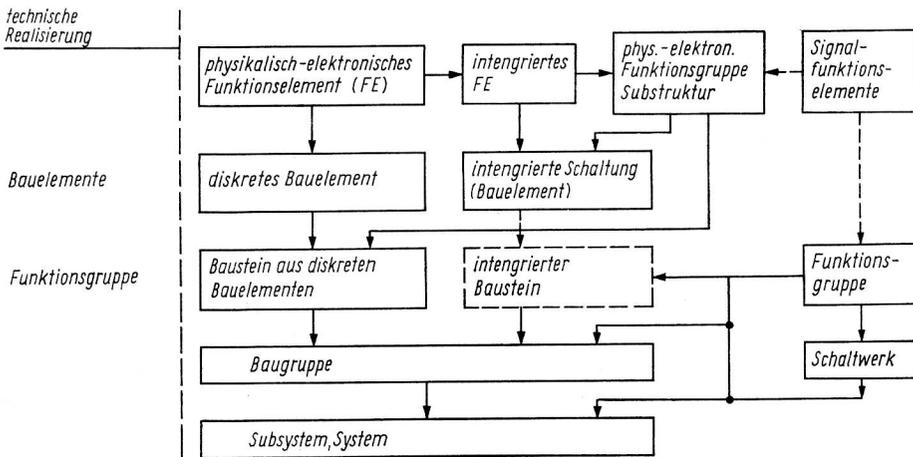


Bild 1.4. Begriffsfestlegungen

Mehrere konstruktiv zusammengefügte integrierte und/oder diskrete Bauelemente ergeben die *Baugruppe*, mehrere Baugruppen ein *Subsystem* oder *Gerät*.

Aus der Sicht der *Signalverarbeitung* und *-verknüpfung* ist es häufig unwichtig, durch welche Funktionselemente eine Verarbeitungsaufgabe, z. B. die Ein-/Ausschaltfunktion, realisiert wird. So treten zu den physikalisch-elektronischen Funktionselementen noch *signalverarbeitende* bzw. *verknüpfende* Funktionselemente, kurz *Signalfunktionselemente*, im weitesten Sinne hinzu. Sie gehorchen eigenen Gesetzen, die mit den physikalischen Funktionselementen nicht oder nur lose zusammenhängen. Dazu gehören z. B.:

- *analoge Funktionselemente* (Verstärker, Addierer, Integrierer, Multiplizierer, Funktionsgeber)
- *logische Funktionselemente*, im besonderen *binäre Funktionselemente*.  
*Verknüpfungen*: Negator, UND-, ODER-Verknüpfungen, Äquivalenz-, Antivalenzglieder, binäre *Speicher-* und *Zeitelemente* (Flipflop, Monoflop).

*Logische Funktionsgruppen* z. B. sind

- *digitale Funktionselemente*: Register, Zähler, Rechenwerke, Speicherwerke
- *Umsetzer*: Analog-, Digitalumsetzer.

Die logische Funktionsgruppe umfaßt mehrere logische Funktionselemente zu einer komplexen logischen Funktion.

Das *Schaltwerk* schließlich ist eine Gruppe binärer Funktionselemente mit mehreren Ein- und Ausgängen.

Mit fortschreitender Integration wurde das Zusammenwirken der physikalisch-elektronischen Funktionselemente mit den signalverarbeitenden bzw. logischen Funktionselementen enger, flossen also Bauelemente- und Schaltungstechnik immer mehr zusammen. Dies verlangt ein *neuartiges Zusammenwirken zwischen Schaltungskonzeption, Entwurf, Bauelementeherstellung und ihrer Anwendung*. Darin liegt die qualitativ neue Aufgabe, die die Mikroelektronik der gesamten Elektronik stellt und die tiefgreifende industrielle, wissenschaftskooperative und ausbildungsbezogene Konsequenzen nach sich zieht (Abschn. 1.3).

## 1.2. Miniaturisierungstechniken

Die Miniaturisierungstendenz elektronischer Geräte führte zunächst über die Leiterplattentechnik zur *Miniaturelektronik* (Tafel 1.4).

Typisch für diese Technik sind diskrete, stark verkleinerte (kurzlebige) *Miniaturbauelemente* auf selbständigen Trägerkörpern. Die Verbindung der einzelnen Funktionselemente erfolgte z. B. durch miniaturisierte Leiterplatten, durch Stapel- und Cordwood-technik. Bekannteste Spielarten waren die *Mikromodultechnik* und *Subminiaturtechnik*. Die Dichte der Funktionselemente betrug  $1 \dots 10 \text{ cm}^{-3}$  (Tafel 1.1).

In der Mikroelektronik werden die einzelnen Funktionselemente dagegen untrennbar miteinander in oder auf einem gemeinsamen Feststoffkörper – dem Substrat (Chip) – verbunden. Eine integrierte Schaltung gilt für Herstellung, Prüfung und Anwendung als Einheit.

Schaltungstechnisch gesehen können die einzelnen Funktionselemente lokal noch vollständig erkannt werden. Deshalb heißt diese Entwicklung *schaltungsorientierte Mikroelektronik*. Gegenwärtig gibt es Ansätze, z. B. bei der sog. I<sup>2</sup>L-Technik (Abschn. 4.1.2.), mehrere Funktionselemente teilweise miteinander zu verschmelzen. Dieser Vorgang heißt *Funktionsintegration* oder *funktionelle Integration*. Er spielt eine wesentliche Rolle für die Steigerung des Integrationsgrades.

Künftig ist die Realisierung komplexer Schaltungsfunktionen durch Ausnutzung bestimmter physikalischer Effekte im Festkörper, z. B. unter Beteiligung einer abzählbaren Atomzahl, denkbar. Diese Entwicklung versteht man heute als *funktionsorientierte* Mikroelektronik, mitunter auch als *Molekular- oder Funktionselektronik*. Sie könnte zu einer weiteren Generation elektronischer Bauelemente (s. Tafel 1.1) führen und sich auf Ergebnisse der Quantenelektronik, Isolatorelektronik u. a. m. stützen (s. Tafel 1.4).

Zur Mikroelektronik zählen heute:

- a) *Film- oder Schichtschaltungen* als *Dick-* und *Dünnsfilmschaltungen*. Dabei werden vorrangig die Funktionselemente Widerstand und Kondensator in Form von ein- oder mehrlagigen dicken ( $\geq 1 \mu\text{m}$  Dicke) oder dünnen ( $< 1 \mu\text{m}$  Dicke) Metall-, Isolator- oder Halbleiterschichten auf einem plättchenförmigen Glas- oder Keramikträger hergestellt. Oft setzt man Dioden, Transistoren und integrierte Halbleiterblockschaltungen nachträglich ein. Dann liegt eine *Dickfilm-* bzw. *Dünnsfilmhybridschaltung* vor. Die *Dickfilm-* oder *Dickschichttechnik* (auch Siebdrucktechnik) ist eine Form der Mikroelektronik, bei der die Funktionselemente durch Auftragen eines pastenförmigen

Tafel 1.4. Miniaturisierungstechniken (dick: hauptsächlichliche Entwicklungen)

