

2.1 Optionen der Halbleitertechnologie für Produktionssysteme

2.1.1 Einleitung

Die Halbleitertechnik hat unsere Umwelt durch ihre zahlreichen Anwendungen in revolutionärem Umfang verändert. Beginnend mit bloßer Substitution von Elektronenröhren durch Transistoren steht die Integrierte Schaltung für eine Ära, in der durch die Halbleitertechnik zahlreiche neuartige Anwendungen entstanden sind. Darüber hinaus stellt ihre Entwicklung einen tiefgreifenden Einschnitt in die Produktionstechnik und -organisation dar. Automatisierung, Informationstechnik, Telekommunikation sind Schlagwörter, die die Wirkung der Halbleitertechnik auf die Welt der industriellen Produktion markieren.

Bei der Weiterentwicklung von industriellen Produktionsanlagen spielt die mikroelektronische Revolution in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts die maßgebliche Rolle. Die elektronische Datenverarbeitung löste mit der Entstehung der numerischen Steuerungen den Übergang von der starren zur flexiblen Automatisierung aus. Sie bewirkte damit den größten Rationalisierungsschub in der Geschichte der industriellen Produktion. Im Zuge der Durchdringung mit Informationstechnik ergaben sich weitreichende Veränderungen in der Struktur von Produktionssystemen.¹

Die Halbleitertechnologie steht indirekt durch ihre Anwendung Mikroelektronik im Zentrum der heutigen technologischen Entwicklung; bestimmt durch den Einsatz in Fertigungsgeräten, deren Leistungsfähigkeit in großem Maße vom Einsatz der Halbleiterbauelemente oder durch den Einsatz von Rechnern in der Wissenschaft, die

¹ Spur, G.: Wandel der industriellen Produktion. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Zwischenbericht der Arbeitsgruppe „Optionen künftiger industrieller Produktionssysteme“. Berlin 1995, S. 8ff.

durch ihre enormen Rechenkapazitäten neue Bereiche wissenschaftlicher Forschung erst erschließen konnten.

Bei der Entwicklung der Halbleitertechnik handelt es sich um einen sehr dynamischen wirtschaftlichen Wachstumsprozeß. Seit den fünfziger Jahren existieren elektronische Bauelemente aus Halbleitermaterial, die innerhalb weniger Jahre die damalige Vormachtstellung der Elektronenröhren gebrochen haben. Mit anfänglich staatlicher Unterstützung der amerikanischen Regierung entwickelte sich eine Industrie, die sich kurze Zeit später eigenständig auf dem Markt behaupten konnte.

Die Attraktivität des Marktes und die niedrigen Eintrittsbarrieren zogen viele junge Unternehmen vor allem in den USA in dieses vielversprechende Marktsegment. Der starke Konkurrenzdruck zwang sie, mit großen Forschungsanstrengungen technologische Vorsprünge zu sichern und auszubauen. Die Entwicklung der Siliziumplanartechnologie 1960 verstärkte diesen Prozeß. Aus den Technologien der Halbleitertechnik entstanden stark spezialisierte Bearbeitungsverfahren, die ausschließlich zum Bau von Halbleiterbauelementen Verwendung fanden.

Seit etwa 10 Jahren sind grundsätzliche Veränderungen erkennbar. In technologischer Hinsicht hat die Siliziumtechnologie direkt Einfluß auf Fertigungsverfahren und ersetzt herkömmliche Produktionstechniken zugunsten modifizierter Methoden aus der Halbleitertechnik, beispielsweise bei den Mikrostrukturtechniken. Aus der hohen technologischen Spezialisierung ist ein Bearbeitungsschema entstanden, das sich zur Miniaturisierung von Baugruppen aller Art eignet. Der bedeutendste Technologieabnehmer ist die Mikromechanik, die die Herstellung von sehr kleinen, beweglichen, nicht-elektronischen Elementen ermöglicht. Der Bau von z.B. miniaturisierten mechanischen Strukturen oder von Mikromotoren ließ in der Vergangenheit zahlreiche Spekulationen über den künftigen Einsatz dieser neuen Technologien entstehen. Sie reichen vom einfachen Mikrosensor bis hin zu selbstständigen miniaturisierten Robotern.

Im Gegensatz zur Mikroelektronik haben diese neuen Mikrotechniken bislang noch vergleichsweise wenig Eingang in die industrielle Entwicklung gefunden. Es wird ihnen ein großes wirtschaftliches Potential prophezeit, wenngleich bisher nur relativ wenige mikrotechnische Bauelemente industriell gefertigt werden.

2.1.1.1 Mikroelektronik, Halbleitertechnik und Siliziumtechnologie

Die begriffliche Trennung von Halbleitertechnik und Mikroelektronik ist eindeutig durchführbar, obwohl diese im allgemeinen Sprachgebrauch gelegentlich synonym verwendet werden. Während jedoch mit Halbleitertechnik ursprünglich eine Verfahrenstechnologie beschrieben wird, bezeichnet Mikroelektronik ein umfassenderes Feld.

Die Mikroelektronik ist ein Teilgebiet der Elektronik, das sich mit der Schaltungsintegration beschäftigt.

*Die Mikroelektronik umfaßt die innige (nicht zerstörlos trennbare) Verbindung von Bauelementen und Schaltung (...) zu einer funktionellen Einheit. Die Schaltung wird durch weitgehend simultane (gleichartige) Bearbeitung vieler Einzelelemente hergestellt. Im Ergebnis entsteht eine integrierte Schaltung ...*²

Demnach sind ihr alle Bereiche zuzuordnen, die zur Herstellung von mikroelektronischen Bauelementen notwendig sind. Schaltkreisentwurf (Elektronik), Prozeßtechnik und Test (Qualitätssicherung) sind Bestandteile der Mikroelektronik.³

Unter Halbleitertechnik versteht man in erster Linie die Wissenschaft, die sich mit dem Verständnis von Halbleitern und deren Eigenschaften (Halbleiterphysik) auseinandersetzt, mit dem Ziel Halbleiterbauelemente zu fertigen. Im weiteren Sinn schließt sie alle notwendigen Prozesse und Methoden zur Herstellung und Bearbeitung von Halbleiterbauelementen mit ein (z.B. Lithographie, Ätztechnik, Reinraumtechnik, Kristallzucht, Epitaxie, Implantation, Diffusion usw.). Diese Prozesse werden im Oberbegriff der Halbleitertechnologie zusammengefaßt und im speziellen Fall des Siliziums analog als Siliziumtechnologie bezeichnet.

Bei der Siliziumtechnologie handelt es sich um die fortschrittlichste Prozeßtechnik, die in Bauelementfertigungen eingesetzt wird. Die verfahrenstechnologische Grundlage zur Herstellung Integrierter Schaltungen ist die Planartechnologie. Sie begründet den Erfolg des Materials Silizium.

2.1.1.2 Die Einflüsse der Halbleitertechnik

Die begriffliche Gleichsetzung der Halbleitertechnik mit der Mikroelektronik und ihre große Bedeutung als „enabling technology“ für die Informationstechnik führte in der Vergangenheit zu einer vergleichsweise einseitigen Betrachtung ihrer Rolle für die Produktionssysteme. Die Bedeutung der Halbleitertechnik wurde in den meisten Fällen auf ihre Anwendung - zumeist ihre mikroelektronische Anwendung - zurückgeführt. Dabei standen Automatisierung und Rationalisierung durch den Einsatz numerischer Steuerungen und elektronischer Datenverarbeitung in Produktion, Logistik und Verwaltung im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Die Fortschritte in der Mikroelektronik wurden durch das Neuentstehen einer Vielzahl von neuen Anwendungsfeldern und durch eine ständige Verkleinerung der Strukturgrößen getragen. Man beobachtet ein starkes, exponentielles Wachstum der Umsatzzahlen, dessen Kontinuität anscheinend auch in den nächsten Jahren Bestand

² Paul, R.: Mikroelektronik. Heidelberg 1981. S.12.

³ Sautter, D., Weinerth, H.: Elektronik und Mikroelektronik. Düsseldorf 1993. S. 664.

hat. Die dazu parallelen technologischen Entwicklungen begleiten dieses Wachstum, indem sie eine fortschreitende Miniaturisierung, umfangreiche Volumenproduktion und größere Zuverlässigkeit ermöglichen.

Die Integration der *Mikroelektronik* und der *Mikrostrukturtechniken* in eine *Mikrosystemtechnik* bedient sich einer gemeinsamen Fertigungstechnik. Die zunächst nur für die Mikroelektronik relevante Halbleitertechnologie gewinnt dadurch eine neue, universellere Bedeutung. Die Möglichkeiten, die technologischen Errungenschaften aus der Mikroelektronik in eine allgemeinverwendbare *Mikrostrukturtechnik* zu übertragen, führten zu einem verstärkten Engagement von Unternehmen in diesem neuen Technologiebereich. Obwohl die technologischen Anfangsbedingungen für eine Entwicklung von vielfältigen *Mikrostrukturtechniken* entscheidend besser sind, kann ein Durchbruch im Sinne eines sich selbst tragenden wirtschaftlichen Erfolgs bislang nicht beobachtet werden. Die Ursachen für die unterschiedlichen Entwicklungslinien beider Technologien sind vielfältig. Das politische und wirtschaftliche Umfeld während der Entstehung der Halbleitertechnik in den fünfziger Jahren unterscheidet sich grundlegend von den Bedingungen, die die *Mikrostrukturtechniken* heute vorfinden. Die Halbleitertechnik wird z.B. als eine strategische Branche angesehen und dementsprechend weltweit durch besondere industriepolitische Hilfestellung gefördert.

2.1.1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Entwicklungsdynamik der Halbleitertechnik ist bemerkenswert. Sie geht einerseits auf die hohe seit ihren Anfängen bestehende industrie- und forschungspolitische Förderung zurück. Andererseits spielen auch die technologischen und ökonomischen Gegebenheiten, wie z.B. die kontinuierliche Produktionskostenreduktion durch die Miniaturisierung der Strukturen oder die schnellen Innovationszyklen, eine wichtige Rolle.

Im folgenden werden die wirtschaftlichen und technischen Wechselbeziehungen skizziert. Aus ihren speziellen Eigenschaften werden die Wirkungen auf die wirtschaftliche und technologische Dynamik der Halbleiterindustrie sowie ihre industriellen Strukturen verdeutlicht. Die Besonderheit dieser Darstellung ist, daß sie von den technischen Gegebenheiten ausgeht.

Die Miniaturisierung hat als treibende Kraft die Planartechnologie wesentlich in ihrer technischen Weiterentwicklung beeinflusst. Die heute erreichte Entwicklungsstufe und Spezialisierung der Siliziumplanartechnologie kann als Resultat der besonderen Rahmenbedingungen in der Halbleiterbranche angesehen werden. Die Verbreitung der Produktionstechnologie „Planartechnik“ zu den Mikrostrukturtechniken und ihre Bedeutung für die Mikrosystemtechnik offenbaren ein neuartiges Potential, das nicht von der Mikroelektronik sondern von der zugrundeliegenden Fertigungstechnik aus-

geht. Perspektiven dieser Verbreitung sollen aufgezeigt werden. Als „Optionen der Halbleitertechnologie für Produktionssysteme“ können damit Erwartungen formuliert werden, wie die Charakteristik der Siliziumtechnologie der Technik allgemein ihr Siegel aufprägen.

2.1.2 Die Entwicklung und Bedeutung der Halbleitertechnik

Die Entstehung und die Entwicklung der Halbleitertechnik ist eingebettet in einem komplexen System von verschiedenen Einflüssen und Abhängigkeiten und signifikant durch ihr äußeres Umfeld bestimmt worden. Politische Interessen, wirtschaftlicher Erfolg und eine bemerkenswerte Eigendynamik prägen das Bild ihrer technologischen Entwicklung bis heute. Die Dominanz des Material-Prozeß-Systems Silizium-Siliziumplanartechnologie ist ungebrochen und für die Herstellung integrierter elektronischer Schaltkreise, abgesehen von wenigen Ausnahmen, für die nähere Zukunft die einzige Alternative. Die wirtschaftlich, technologisch und produktionstechnisch bedingten Besonderheiten wirken als innere und äußere Antriebskräfte der Entwicklung der Siliziumtechnologie und haben die heutige technologische und produktionstechnische Ausrichtung und Spezialisierung maßgeblich festgelegt.

2.1.2.1 Historischer Abriß

Mit der Festkörperphysik wurden schon im vergangenen Jahrhundert grundlegende wissenschaftliche Entdeckungen für die Halbleitertechnik gemacht⁴ und so die Basis für das Verständnis von Halbleitern geschaffen.⁵ Die eigentliche (industrielle) Ge-

⁴ Wichtige Grundlagenentdeckungen gehen bis in die dreißiger Jahre des vorigen Jahrhunderts zurück. Faraday entdeckte 1833 eine schwache Leitfähigkeit bei Silbersulfid und beobachtete eine Abnahme der Leitfähigkeit bei zunehmender Temperatur. Smith und Sale entdeckten 1873 den photoresistiven Effekt. 1874 entdeckt F. Braun den Sperrschichteffekt, indem er unterschiedlichen elektrischen Widerstand eines Materials je nach Polarität der angelegten Spannung feststellte. Adams, Day und Fritts erforschten 1876 das Auftreten einer Spannung bei der Beleuchtung von Selenplättchen (Photospannung).

Quelle: Doll, G.: Fortschritte in der Mikroelektronik. Mannheim 1989. S. 15.

⁵ Weitere wichtige Entdeckungen der Festkörperphysik wurden in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts gemacht. J. Baedeker dotiert 1908 erstmals bewußt einen Halbleiter, um den elektrischen Widerstand zu beeinflussen. 1928 stellen A. Sommerfeld und B. Gudden fest, daß der Grad der Verunreinigung eines Halbleiters in erster Linie für die Änderung seiner Leitfähigkeit verantwortlich ist. Zehn Jahre später veröffentlichten W. Schottky und Spenke die „Randschichttheorie“, die den Sperrschichteffekt physikalisch erklärt. Schon 1925 wurde erstmals das Prinzip eines Kristallverstärkers

schichte der Halbleitertechnik beginnt jedoch erst mit der Erfindung des Germaniumtransistors in den BELL LABORATORIES Ende 1947⁶ als J. Bardeen, W. Brattain und W. Shockley ihren ersten Transistor im Jahr 1948 vorstellten⁷. Es war keine zufällige Erfindung sondern vielmehr das Ergebnis konzentrierter und kontinuierlicher Forschungsanstrengungen von Wissenschaft und Industrie. Allerdings konnten Transistoren erst im Jahr 1951 verlässlich und technisch reproduzierbar hergestellt werden. Von nun an beginnt die industrielle Produktion. Die Entwicklung des Transistors verfehlte dennoch lange Zeit ihr eigentliches Ziel, die Hochfrequenz-Röhren zu ersetzen.⁸ Für fast ein Jahrzehnt blieb der Transistor der Elektronenröhre in den meisten Aspekten technisch unterlegen. Das gilt vor allem hinsichtlich der Zuverlässigkeit der neuen Bauelemente. So wurde etwa bei der Konstruktion des dritten transatlantischen Telefonkabels 1963 noch der Verwendung von Elektronenröhren Vorrang gegeben. In den fünfziger Jahren folgten in rascher Folge Innovationen, wie z.B. die Herstellung des Flächentransistors, des Siliziumtransistors und die Dotierung mittels Diffusion aus der Gasphase. Erst der gegen Ende der fünfziger Jahre entwickelte Siliziumplanarprozeß brachte den Durchbruch, da er die industrielle Serienfertigung von Transistoren ermöglichte.

Die Innovation des Transistors und der 1959 entwickelte Siliziumplanarprozeß markieren den Beginn der Mikroelektronik, die den eigentlichen Durchbruch der industriellen Halbleitertechnik eingeleitet hat. Die kommerzielle Anwendung dieser neuen Technologie begann etwa 1963. Schon zuvor interessierten sich das amerikanische Militär und die NASA für die Mikroelektronik, weil man sich davon verbesserte Steuerungssysteme versprach. Diese Institutionen beschleunigten die Entwicklung der jungen Mikroelektronikindustrie, da für militärische und Raumfahrtanwendungen der Preis zunächst keine ausschlaggebende Rolle spielte.⁹ Im Vordergrund standen Zuverlässigkeit und Miniaturisierung. Dennoch konnten erst 1968 die Umsatzzahlen Integrierter Schaltungen (Abk.: IC: integrated circuit, Integrierte Schaltung) die der Transistoren einholen.¹⁰ Bis dahin waren sie „anwendungsspezifisch“, d.h. ihre Verwendung war durch ihre spezifische Funktion auf wenige Anwendungen festgelegt.

beschrieben, aber erst 1938 konnte er als Labormuster von R. Hilsch und R. Pohl aufgebaut werden.

Quelle: ebenda, S.16.

⁶ Die Firma BELL hatte zunächst die Entwicklung des Transistors für eine tragbare Hörhilfe betrieben.

⁷ Dabei handelte es sich um einen Germanium-Bipolar-Transistor.

⁸ Halfmann, J.: Die Entstehung der Mikroelektronik. Frankfurt/Main 1984. S. 119.

⁹ Queisser, H.-J.: Kristallene Krisen. 1985.

¹⁰ Braun, E., MacDonald, S.: Revolution in Miniature. Cambridge 1978. S.119.

Die MOS¹¹-Schaltungstechnik und die Entwicklung des Mikroprozessors bei der US-Firma INTEL revolutionierte die Halbleitertechnik Anfang der siebziger Jahre von Grund auf. Die Vereinigung von Logik und Speicherfunktionen in einem Prozessorbaustein stellt nach dem Transistor und dem Integrierten Schaltkreis eine weitere wichtige Basisinnovation¹² in der Halbleitertechnik dar. Der Weg zur Entwicklung des Personal Computer war geebnet und der weitere Fortschritt der Halbleitertechnik maßgeblich durch die ständige Leistungsverbesserung von Mikroprozessor- und Speicherbausteinen bestimmt. Diese neue Phase ist gekennzeichnet durch die Beherrschung und Verbesserung der immer komplexer werdenden Design- und Produktionsprozesse. Vornehmlich geht es um die Verkleinerung der Strukturgrößen, die insbesondere für die Speicher-IC's eine enorme Bedeutung hat. Diese werden auch über lange Zeit „Technologietreiber“ genannt, da sie die Entwicklung und Qualität der Halbleiterproduktionsprozesse durch die Forderung nach immer größeren Speicherdichten in außergewöhnlichem Maße vorangetrieben haben. Mit der Erfindung des Mikroprozessors beginnt die Halbleitertechnik, nach und nach alle Bereiche des täglichen Lebens zu durchdringen. H.-J. Queisser spricht in seinem Buch „Kristallene Krisen“ sogar vom Beginn der „Siliziumzeit“.

2.1.2.2 Der Erfolg der Siliziumplanartechnologie

In den fünfziger Jahren wurden Transistoren noch vorwiegend aus dem Halbleitermaterial Germanium hergestellt. Germanium hatte sich zunächst wegen seiner leichteren Handhabbarkeit vor allem bei der Kristallzüchtung durchgesetzt. Militärische Forschungsprojekte in den USA gaben jedoch dem Silizium den Vorzug, da es höhere Prozeß- und Betriebstemperaturen erlaubte. Mit Silizium sollte es möglich sein, Transistoren bei extremeren Umfeldbedingungen zu betreiben und höhere Ströme schalten zu können, beides notwendige Eigenschaften für militärische Anwendungen. Während der fünfziger Jahre entwickelte sich daher das Silizium zum bevorzugten Material für die Bauelementherstellung in den USA, da hier das Militär wichtigster Anwender für diese Bauelemente war. In Europa und Japan wurden zunächst weiterhin kostengünstigere Germanium-Transistoren hergestellt, die zu dieser Zeit vorwiegend in nicht-militärischen Anwendungen eingesetzt wurden.¹³ Transistoren aus

¹¹ MOS:=*Metal Oxide Semiconductor* (engl.) bezeichnet die für einen Feldeffekttransistor charakteristische Schichtenfolge.

¹² Eine in diesem Zusammenhang weitere nennenswerte Basisinnovation ist die Optoelektronik, die insbesondere den Bereich der Kommunikationstechnik nachhaltig beeinflusst hat.

¹³ Morris, P.R.: *A history of the world semiconductor industry*. London 1990. S.88.

Germanium existierten daher noch bis Anfang der sechziger Jahre parallel zu Siliziumtransistoren.

Der entscheidende Durchbruch des Silizium als das heute vorwiegend verwendete Halbleitermaterial gelang mit der Entwicklung der Planartechnologie. Sie wurde zu Beginn der sechziger Jahre entwickelt und bildete die Grundlage zum Bau integrierter Schaltungen. Sie nutzt Bearbeitungsmethoden zur Strukturierung einer Siliziumoberfläche, die mit anderen Materialien nur unter Schwierigkeiten durchzuführen wären. Ginge man ausschließlich von den elektrischen Eigenschaften aus, so müßten andere Halbleiter mit besseren elektrischen Eigenschaften, z.B. höherer Ladungsträgerbeweglichkeit usw., bevorzugt werden. Lediglich für bestimmte Anwendungen (z.B. in der Optoelektronik) konnten sich bislang andere Festkörpermaterialien behaupten (Galliumarsenid, Indiumphosphid u.a.). Die Entscheidung zugunsten des Siliziums ist aus technischer Sicht wesentlich auf seine chemischen Eigenschaften und vorzüglichen Bearbeitungsmöglichkeiten zurückzuführen.

- Silizium ist ein Hauptbestandteil der Erdkruste. Diese unbegrenzte Verfügbarkeit, seine im Vergleich zu anderen Halbleiter relativ einfache Gewinnung aus den Rohstoffen, die erreichbare hohe Reinheit und die gute Dotierbarkeit mit Donatoren und Akzeptoren sind Vorteile, die dem Silizium gegenüber seinem seinerzeitigen Konkurrenten Germanium wichtige Vorteile verschafften.
- Der ausschlaggebende Grund für den Erfolg liegt in der Fähigkeit des Siliziums, ein widerstandsfähiges isolierendes Oxid zu bilden, das zugleich Schutz, Muster und Maske für die Oberfläche und ihre Bearbeitung ist. Dieses Oxid weist folgende vier wesentliche Eigenschaften auf, die für die Halbleitertechnologie von hoher Bedeutung sind:
 - Chemische Stabilität von SiO_2 auf Si und chemische Passivierung der Si-Oberfläche; anders als die Oxide von Ge oder GaAs ermöglicht SiO_2 eine „reine“ Si-Oberfläche.
 - Die Feinstrukturierbarkeit von SiO_2 -Schichten erlaubt die miniaturisierte Maskentechnik.
 - Die diffusionshemmende Wirkung von SiO_2 gegenüber Fremdatomen erlaubt die topologische Strukturierung der Bauelementoberfläche.
 - Die hohe elektrische Durchbruchfeldstärke des sauberen SiO_2 ermöglicht MOS-Transistoren.

Dieses technologische System Silizium unter SiO_2 -Deckschicht macht sich die Siliziumplanartechnik zunutze, die für die heutige Technik bestimmend geworden ist. Diese planare Aufbauweise erlaubt eine hochgenaue Strukturierung des Wafers und eine exakte Einstellung der Halbleitereigenschaften.

2.1.2.3 Die Planartechnik und die Herstellung Integrierter Schaltungen

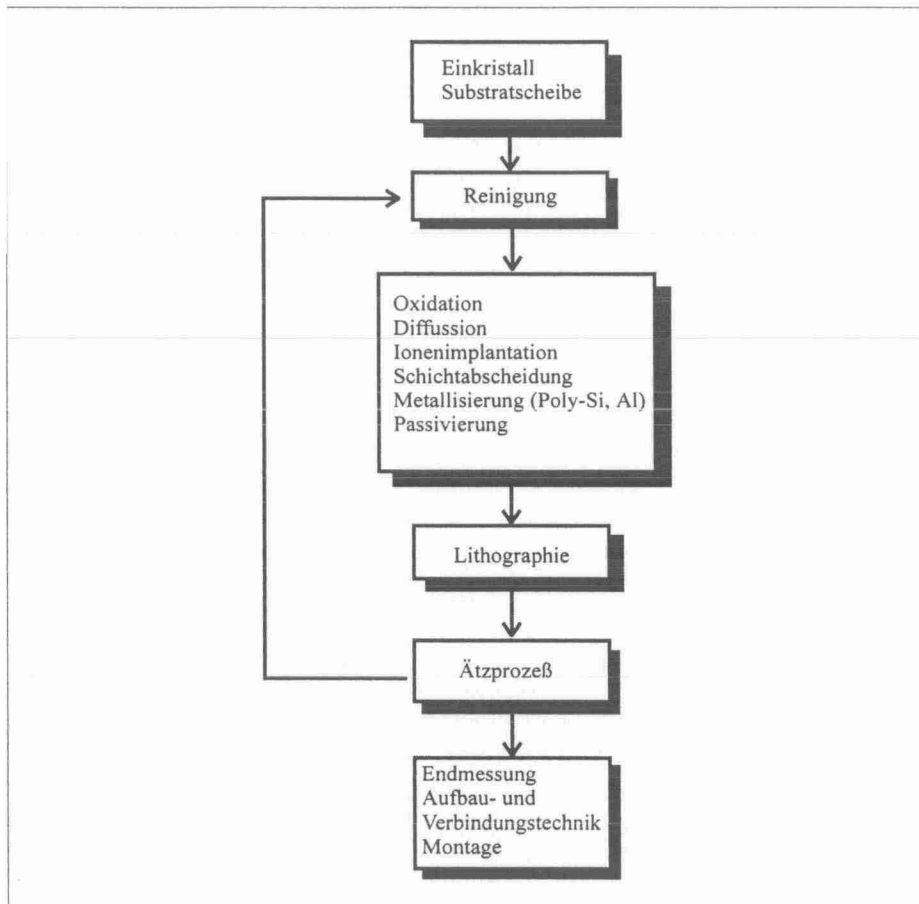


Abbildung 2.1-1

Prozeßablauf bei der IC-Herstellung
Quelle: nach Höfflinger, B.: Großintegration. S. 69.

Die Grundlage für die Herstellung von *Integrierten Schaltungen* ist die *Planartechnik*.

Man versteht darunter

die Kombination einer Reihe von aufeinanderfolgenden und zum Teil sich wiederholenden Einzelprozessen an der Oberfläche einkristalliner Halbleiterscheiben.¹⁴

Abgesehen von der Waferherstellung und der Endmontage der Chips durch die Aufbau- und Verbindungstechnik erfolgt die Herstellung *Integrierter Schaltungen* durch die wiederholte Abfolge von Maskierungsschritten und Materialbearbeitung. Die dafür notwendigen Verfahrenstechniken lassen sich folgendermaßen einteilen:

- Lithographie,
- Ätztechniken,
- Schichttechniken,
- Dotiertechniken sowie
- Reinigungsverfahren.

Ausgangspunkt der technologischen Prozesse ist eine vordotierte, einkristalline Halbleiter-Waferscheibe, die ganzflächig mit einer Oxidschicht (SiO_2) bedeckt ist. Durch *Lithographie-* und *Ätzprozesse* werden bestimmte Bereiche des Siliziumdioxids (oder gegebenenfalls andere Schichten) entfernt und damit eine Maskierung zur nachfolgenden Bearbeitung des Halbleitersubstrates hergestellt. Zur Festlegung der elektrischen Eigenschaften des Basismaterials dienen die *Dotierverfahren*, bei denen gezielt Fremdatome (Bor, Phosphor, Arsen u.a.) in den Halbleiterkristall eingelagert werden. Durch die mehrfache Wiederholung von Maskierung und Dotierung entsteht ein Profil unterschiedlich dotierter Bereiche im Substrat.

Die Gesamtfunktion des Halbleiterbausteins wird einerseits durch bestimmte dotierungsabhängige Festkörpereigenschaften, andererseits durch das Auftragen bzw. Erzeugen und Strukturieren von Schichten definierter Dicke erreicht. Zum Aufbau planarer Strukturen werden daher Schichtabscheidungsverfahren verwendet, die beispielsweise der Herstellung von Epitaxieschichten, Gateoxid, Poly-Silizium und Leiterbahnen dienen. Zwischen den einzelnen Technologieprozessen erfolgen regelmäßig Reinigungsschritte, um den Wafer von Verunreinigungen zu säubern. Nach dem Abschlußtest der Integrierten Schaltungen auf dem Wafer werden die Chips getrennt und in der Regel in geeigneten Gehäusen montiert.

Die Prozesse zum Bau Integrierter Schaltungen müssen speziell aufeinander abgestimmt werden, weil sich aufeinanderfolgende Schritte gegenseitig beeinflussen können. So sind vor und nach jeder Maskierung und Schichtabscheidung störende Prozeßrückstände vollständig zu entfernen. Hohe Temperaturen verändern schon vor-

¹⁴ I. Ruge, H. Mader, „Halbleiter-Technologie“, Berlin 1984; S. 179.

handene Dotierprofile und sollten somit bei fortgeschrittenen Ablauf möglichst vermieden werden. Oftmals sind zur Vorbereitung eines bestimmten Einzelschrittes spezielle Vorbehandlungen notwendig. Zur Schichtabscheidung müssen beispielsweise Haftvermittler aufgetragen oder das Substrat durch geeignete Ätzprozesse angeraut werden.

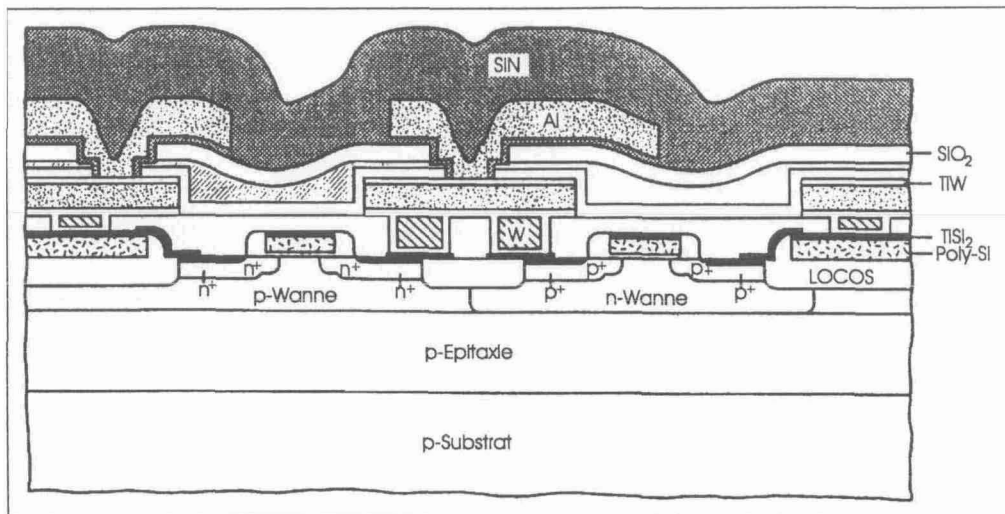


Abbildung 2.1-2

Querschnittsdarstellung eines CMOS-Inverters

Quelle: Schumicki, Seegebrecht: Prozeßtechnologie. S. 3.

In einer modernen Halbleiterprozeßlinie werden für den Bau eines modernen 64MBit-DRAM-Bausteins in der Regel 24 Masken benötigt. Bei einer größeren Anzahl von Metallisierungsebenen (mit jeder Metallisierungsebene kommen zwei Maskierungsschritte hinzu) durch komplexere logische und elektrische Funktionen kann diese Zahl noch überschritten werden. Zur Realisierung der eigentlichen Grundstrukturen bei CMOS- bzw. Bipolar-Schaltkreisen sind i.a. ca. 12-14 Masken ausreichend.

Jeder Einzeldurchlauf (Maskierung und Materialbearbeitung) bedingt im Mittel ca. 20 einzelne Verfahrensschritte, wie z.B. Reinigung, Temperaturbehandlung, Ätzung usw., so daß mit zunehmender Maskenzahl die Menge der Prozeßschritte stark ansteigt.

DRAM	Strukturgröße in μm	Maskenanzahl	Prozeßschritte
16KBit	4,0	6	100
64KBit	3,0	7	140
256KBit	2,0	8	200
1MBit	1,2	15	360
4MBit	0,8	17	400
16MBit	0,5	20	450
64MBit	0,35	24	560

v
g

Tabelle 2.1-1

Trends der Entwicklung der Prozeßkomplexität bei Speicherbausteinen
 Quelle: Elsevier Advanced Technology: Profile of the Worldwide Semiconductor Industry. England 1995. S. 285.

2.1.2.4 Arbeitsabläufe in der Produktion

Die Fertigungsabläufe der Halbleitertechnik sind in ihren Mechanismen und ihrer Organisation durch die Eigenschaften der Halbleiterprozesse bestimmt. Während konventionelle Produktionslinien oft als serielle Prozesse stattfinden, ist die Herstellung von Halbleiterbauelementen durch die vielfache Wiederholung gleichartiger Prozeßschritte geprägt.

Obwohl die Produktion von Halbleiterbauelementen nur aus etwa einem Dutzend voneinander prinzipiell unterscheidbaren Einzelprozessen besteht, ergeben sich dennoch bei modernen Halbleiterchips Fertigungstiefen von bis zu 600 Technologieschritten (Speicher- und Prozessorchips), die durch die wiederholte Abfolge der Produktionssequenzen Maskieren-Reinigung-Festkörperbearbeitung-Reinigung entstehen. Da jeder dieser Prozesse die mögliche Ursache eines Fehlers in sich bergen und damit die Funktion des Chips in Frage stellen kann, ist zur Absicherung der Fertigungsstabilität die Überwachung jedes Verfahrensschritts notwendig.¹⁵ Eine umfassende Kontrolle ist umso wichtiger, da ein fehlerhafter Prozeß in der Regel keine Korrekturmöglichkeit bietet. Die frühzeitige Erkennung solcher irreparablen Wafer-scheiben kann unnötigen Prozessieraufwand verhindern.

Die Prozeßkontrolle läßt sich grundsätzlich nach jedem Einzelprozeß, Prozeßmodulen und nach dem gesamten Prozeßablauf durchführen. Die qualitative Überprüfung

¹⁵ Schon bei einer angenommenen Ausfallwahrscheinlichkeit von 99,9% für jeden Verfahrensschritt, so erreicht man bei 500 Technologieschritten am Ende nur eine Ausbeute von ca. 60% für den zu Ende prozessierten Baustein.

on Einzelprozessen und Prozeßmodulen wird durch sog. „in-line“-Messungen vorgenommen.

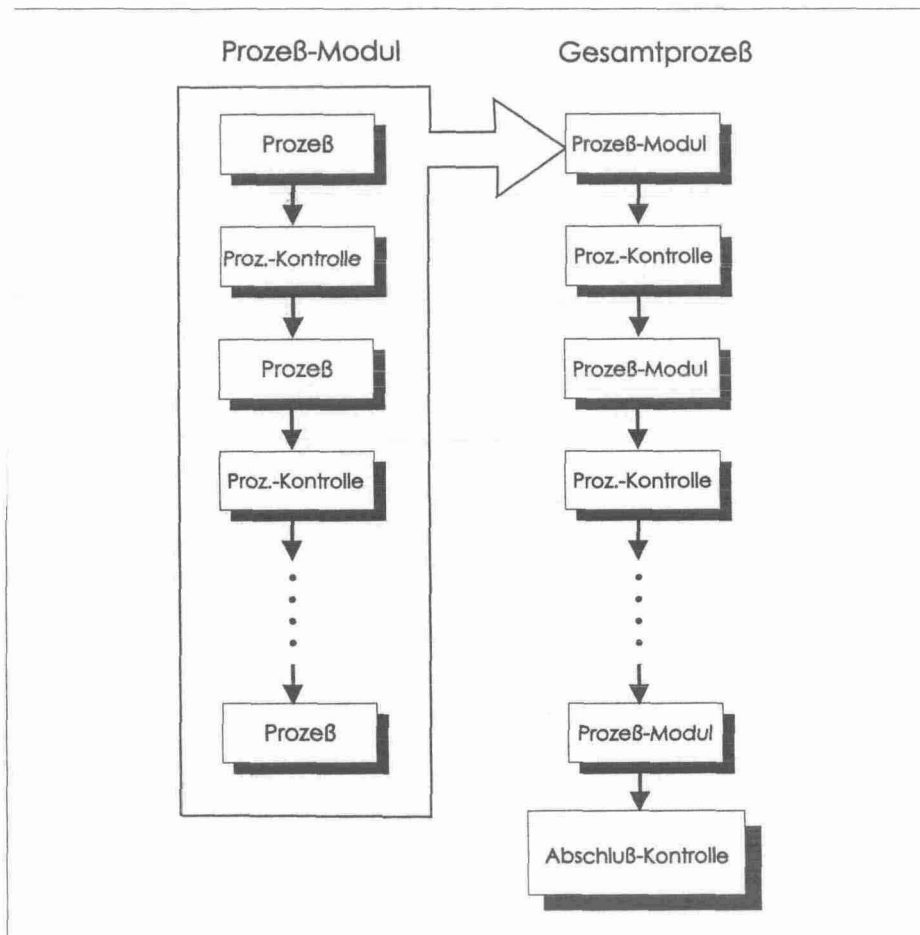


Abbildung 2.1-3

Kontrolle der Prozesse innerhalb des Gesamtprozesses

Dabei werden die Ergebnisse eines oder einer Serie von Einzelprozessen anhand ein facher Messungen kontrolliert¹⁶. Zunehmend wird versucht, die Qualität des Einzelprozesses „in-situ“, d.h. während der Prozeßdurchführung, mit Hilfe von Sensoren zu bestimmen.

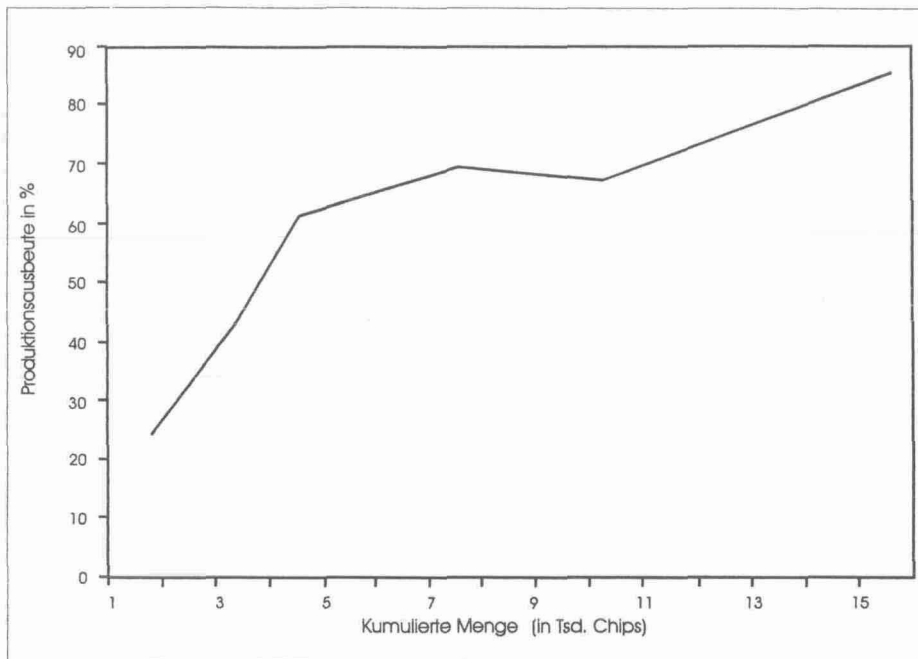


Abbildung 2.1-4

Realistische Lernkurve eines Chipherstellungsprozesses für 16K EPROMs (Electrically Programmable Read Only Memory), aufgetragen über die kumulierte Anzahl an fertiggestellten Chips

Quelle: Gruber, H.: Modelling the learning curve for the production of semi-conductors. Cahiers BEI. March 1993. S. 59.

¹⁶ Die Kontrollen von Lithographie- oder Schichtabscheideprozessen wird oft mittels optischen Meßmethoden durchgeführt; Implantations- oder Diffusionsverfahren können durch Schichtwiderstandsmessungen kontrolliert werden.

Während der Produktion kann zwar die Güte des jeweiligen Prozeßschrittes untersucht werden, eine direkte Funktionsüberprüfung des gesamten Chips ist in den meisten Fällen allerdings erst nach Abschluß aller Prozesse möglich.

Die Qualität des gesamten Prozeßablaufs wird noch vor dem Funktionstest durch Messungen zahlreicher Schlüssel-Parameter (ca. 20-30) in den sog. Prozeß-Kontroll-Modulen durchgeführt, die sich als Teststrukturen zwischen den eigentlichen Chips auf dem Wafer befinden. Konnten zuvor keine Unregelmäßigkeiten bei der Prozeßkontrolle von Einzelprozessen festgestellt werden, ist damit das Zurückverfolgen von Mängeln zu ihrer Ursache und die Korrektur in Prozeßparametern zeitlich an die gesamte Scheibendurchlaufzeit gebunden.

Im Laufe der Zeit steigt durch die Erfahrung des Personals mit der Handhabung und Bearbeitung von Waferscheiben die Ausbeute wesentlich an.¹⁷ Obwohl die physikalischen Vorgänge und Zusammenhänge im Halbleiter bekannt sind, ergeben sich zu Beginn einer neuen Produktion häufig nur Ausbeuten von ca. 10%. Diese lassen sich über die gesamte Produktionsdauer teilweise bis auf 90% verbessern. Durch die rein empirische Vorgehensweise bei der Ausbeutesteigerung entsteht eine für die Chipherstellung charakteristische Lernkurve, die in der Regel einen exponentiellen Verlauf über die mit der Zeit korrelierte, akkumulierte Anzahl an fertiggestellten Bauelementen nimmt.

Man erkennt, daß es sich bei der Steigerung der Fertigungsqualität um einen längerfristigen Prozeß handelt, der u.U. durch die Kürze der Produktlebensdauer oder zu geringe Stückzahlen die maximale Effizienz niemals erreicht. Ursachen der langsamen Qualitätsverbesserung sind die empirische Fehlersuche und die Produktdurchlaufzeit, die bei technologieintensiven Prozessen bis zu 3 Monaten betragen kann.

2.1.2.5 Die wirtschaftliche Entwicklung der Halbleiterindustrie

Schon kurz nach seiner Entwicklung wurde die wirtschaftliche und soziale Bedeutung des Transistors in den USA richtig eingeschätzt.¹⁸ Sein Stellenwert wurde nicht nur für militärische Anwendungen, sondern auch für die Fernmeldetechnik erkannt. Das Resultat waren hohe Förderungsanstrengungen des amerikanischen Staates, die sich nicht nur auf die indirekte Unterstützung durch Abnahme von Bauteilen durch das amerikanische Militär beschränkten, sondern die auch die Liberalisierung des zunächst monopolistischen Marktes durch Abbau der Patentdominanz von AT&T

¹⁷ Beneking, H.: Halbleitertechnologie. Stuttgart 1991. S. 676.

¹⁸ Queisser, H.-J.: Mikroelektronik und Dezentralisierung. Berlin 1982. S. 29.

beinhaltete¹⁹. Schon bald darauf entwickelten sich auf die neue Technologie spezialisierte Firmen, so stieg in der ersten Hälfte der fünfziger Jahre die Zahl der Transistorhersteller auf 25 Unternehmen an; 1959 waren es sogar 34. Die zahlreichen Unternehmensneugründungen der folgenden Jahre im Halbleitersektor waren vor allem durch die damals leicht erschwingliche Produktionsausrüstung und die vielversprechenden wirtschaftlichen Wachstumsraten begünstigt worden.

Jahr	Durchschnittspreis in \$	Anteil des Militärs an der Gesamt-IC- Produktion
1962	50,00	100 %
1963	31,60	94 %
1964	18,50	85 %
1965	8,33	72 %
1966	5,05	53 %
1967	3,32	43 %
1968	2,33	37 %

Tabelle 2.1-2

Anteil der Militärs an der Gesamtproduktion Integrierter Schaltkreise
Quelle: Tilton, J.: *The International Diffusion of Technology: The Case of Semiconductors*. Washington 1971. S. 91.

Die Vorgehensweise, einzelne („diskrete“) Transistoren auf einer Siliziumscheibe zu bauen, diese zu zersägen, und die funktionsfertigen Bauteile wieder zu einem elektronischen Schaltkreis zu vereinen, war unwirtschaftlich und führte zur Entwicklung der *Integrierten Schaltung* gegen Ende der fünfziger Jahre. Die Tatsache, daß nicht nur Transistoren und Dioden aus Halbleitermaterial hergestellt werden konnten, sondern auch Widerstände und Kondensatoren, machte es möglich, vollständige elektronische Schaltungen integriert aufzubauen. Trotz der Wirtschaftlichkeit der Herstellungsweise waren Integrierte Schaltungen anfänglich noch teuer und somit für die

¹⁹ „The Department of Justice initiated an antitrust suit against AT&T in 1949 which, during the period 1949-1956, influenced the company's policy of swiftly disseminating its new technology. [...] the 1956 consent decree [...] thereby restrained AT&T from leveraging its monopoly position in telecommunications into a dominant position in related commercial markets and from monopolizing, over the life of its patents, the commercial potential of the research and development work of Bell Labs.“; Borrus, M.G.: *Competing for Control: America's Stake in Microelectronics*. Cambridge 1988. S. 58.

Anwendung im zivilen Bereich uninteressant. Wie beim Transistor war es auch hier das Militär, das zunächst als Hauptabnehmer von Integrierten Schaltkreisen auftrat.²⁰

Jahr	Umsätze der US-Halbleiterindustrie in Mio. \$ pro Jahr	Änderung gegenüber Vorjahr
1956	90	125%
1957	151	67%
1958	210	39%
1959	395	88%
1960	541,9	37%
1961	564,8	4,2%
1962	571,2	1,1%
1963	640,2	12%
1964	777,0	21,3%
1965	1122,4	44,4%
1966	1467,0	30,7%
1967	1383,9	-5,66%
1968	1414,5	2,2%
1969	1686,8	19,3%
1970	1719,7	2%
1971	1501,8	-12,6%
1972	2135,6	42%
1973	3097,0	45%
1974	3646,0	17,7%

Tabelle 2.1-3

Umsätze der Halbleiterindustrie bis 1974

Quelle: Halfmann, J.: Die Entstehung der Mikroelektronik. Frankfurt/Main 1984. S. 158.

Die Bedeutung der Basisinnovation „Integrierter Schaltkreis“ wird am besten durch die Wachstumswahlen der ersten Jahre belegt. Abgesehen von konjunkturbedingten Einbrüchen (1962, 1967) waren nahezu durchweg zweistellige Wachstumsraten zu

²⁰ Eckert, M., Schubert, H.: Kristalle, Elektronen, Transistoren. Hamburg 1986. S. 200.

verzeichnen. Zudem verdoppelte sich die Zahl der Komponenten pro Chip²¹ bis 1975 durchschnittlich jedes Jahr (1975 :100000 Komponenten pro Chip).

Die seit Mitte der sechziger Jahre zunehmend kommerzielle Verwendung *Integrierter Schaltkreise* wurde im Zeitraum zwischen 1966-1972 vorwiegend von der schnell wachsenden Computerindustrie getragen. Diese löste zu jener Zeit als erste zivile Industrie die tragende Funktion der Politik der staatlichen Unterstützung bei der Halbleiterindustrie ab.

Bis ins Jahr 1971 wurden integrierte Schaltungen ausschließlich „anwendungsspezifisch“ gefertigt, d.h. die Funktion einer Schaltung war ausschließlich einer bestimmten Anwendung zugeordnet und konnte nur selten auf andere Anwendungen übertragen werden. Die Erfindung des Mikroprozessors²² bei INTEL, 1971, war für die gesamte Mikroelektronikindustrie richtungsweisend. Kurz zuvor hatte das Unternehmen einen integrierten Speicherbaustein mit einer Kapazität von 1kbit vorgestellt. Die schnelle Verbreitung der neuen Bauelemente in den Anwendungsbranchen und die sich hinsichtlich ihrer Produktivität und Produktzuverlässigkeit weiterentwickelnden Herstellungsmethoden bestimmten von nun ab ein nahezu anhaltend exponentiell verlaufendes wirtschaftliches Wachstum. Insbesondere die Computerindustrie hatte großen Anteil an dem schnellen Kapazitätswachstum der Bauelemente, der Chips.

US-Amerikanische IC-Märkte, gegliedert nach Endverbraucher	1962	1965	1969	1974	1978
Staatlich garantierte Abnahmen	100%	55%	36%	20%	10%
Computerindustrie	0%	35%	44%	36%	37,5%
Industrielle Anwendungen	0%	9%	16%	30%	37,5%
Konsumelektronik	0%	1%	4%	15%	15%
U.S. Gesamtumsätze in Mio. \$	4	39	413	1.204	2.080

Tabelle 2.1-4

Marktanteile Integrierter Schaltkreise im US-Amerikanischen Markt von 1962 bis 1978

Quelle: Borrus, M.G.: *Competing for Control: America's Stake in Microelectronics*. Cambridge 1988. S. 73.

²¹ Chips nennt man die Silizium-Bausteine in Rechteck- oder Quadratform, in die eine Silizium-Scheibe nach dem Prozessieren zersägt oder - nach Anritzen - zerbrochen wird. Die vom Einkristall abgesägte Silizium-Scheibe heißt Wafer.

²² Es handelte sich dabei um den Typ i4040, der aus 2250 Transistoren bestand.

Besondere Aufmerksamkeit hat die Halbleiterindustrie in den achtziger Jahren erregt. Die Verschiebung der Weltmarktanteile am Halbleitermarkt zugunsten japanischer Hersteller war ausschlaggebend für eine Politisierung der Halbleiterindustrie. Die Ursprünge der Halbleitertechnik lagen wie oben beschrieben in den USA, und amerikanische Firmen dominierten bis Ende der siebziger Jahre alle Märkte für Halbleiterprodukte. Seitdem haben sich die Marktanteile amerikanischer und japanischer Unternehmen gegensätzlich entwickelt, während die europäischen Hersteller ihren Anteil nach den Verlusten zu Beginn der achtziger Jahre auf nahezu gleichbleibendem Niveau halten konnten. Seit einigen Jahren drängen nun auch andere Länder des asiatisch-pazifischen Raums (APAC) auf den Halbleitermarkt und verzeichnen Zuwachsraten, die weit über dem durchschnittlichen Gesamtwachstum liegen.

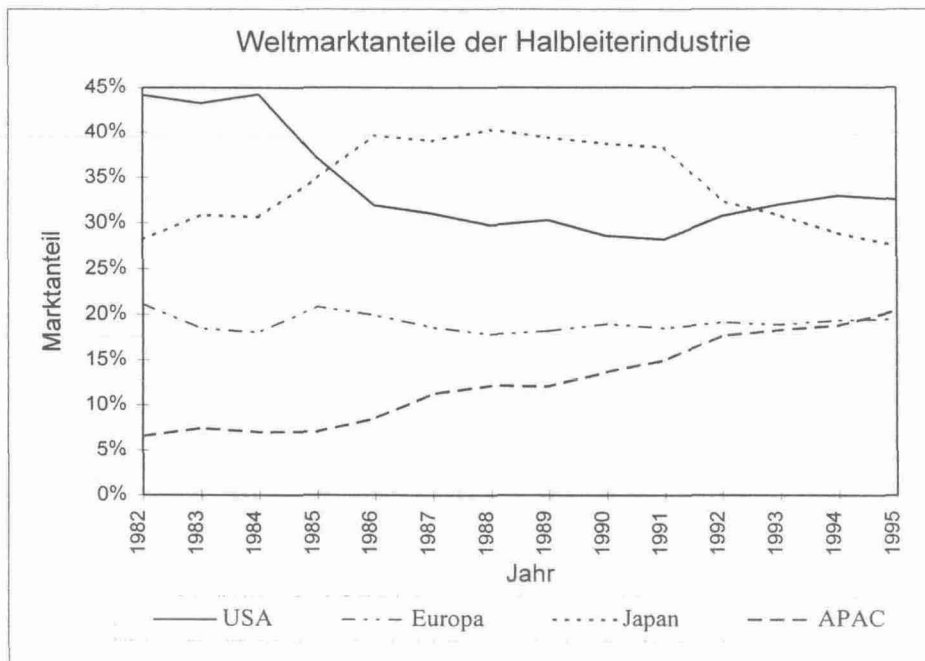


Abbildung 2.3-5

Halbleiterweltmarktanteile

Quelle: Bagger, T.: Strategische Technologien, internationale Wirtschaftskonkurrenz und staatliche Intervention. München 1992, S.88 und Semiconductor Industry Association 1996.

Neben den wachsenden Marktanteilen zeigen auch Positionsverschiebungen der jeweils größten Unternehmen im Halbleitermarkt die Dominanz japanischer Hersteller. Waren Mitte der siebziger Jahre noch die amerikanischen Unternehmen TEXAS INSTRUMENTS und MOTOROLA die größten Produzenten, so wurden sie mittlerweile von INTEL, NEC und TOSHIBA abgelöst. Sechs der zehn umsatzgrößten Unternehmen kommen aus Japan, drei aus den USA und eins aus Europa²³.

2.1.2.6 Staatliche Förderung der Halbleitertechnik

Zu allen Zeiten war die Entwicklung der Halbleiterindustrie geprägt von staatlicher Einflußnahme und Intervention. Schon vor der Erfindung des Planarprozesses gaben die spezifischen Produktanforderungen des Militärs die Richtung der Weiterentwicklung vor. Vor dem Hintergrund des Koreakriegs wurden mehrere Miniaturisierungsprogramme²⁴ ins Leben gerufen, die allesamt die Verkleinerung elektronischer Schaltungen zum Ziel hatten.

Die vielleicht ausschlaggebendste Förderung für die Entwicklung der Produktionstechnologie für Transistoren ist auf das Jahr 1956 zu datieren. Die Entscheidung des „US-Defense Department“ die Halbleiterfirmen mit 40 Mio. \$ bei F&E zu unterstützen und eine jährliche Abnahme von einer Million Transistoren zu verlässlichen Preisen zu garantieren, veranlaßte die Unternehmen, ihre Produktionskapazitäten auszubauen. Die zunächst sehr niedrige Ausbeute führte dazu, daß diese Verträge in einem tatsächlichen Produktionspotential von etwa 14 Millionen Einheiten resultierte. Durch Lerneffekte in der Fertigung konnten dann die Kosten gesenkt, die produzierte Stückzahl erhöht und neue Märkte erschlossen werden.²⁵

Wenn auch die Integrierte Schaltung keine direkte Folge dieser militärisch gestützten Forschungsanstrengungen war, so ist ihre Erfindung dennoch ein indirektes Resultat der hohen Anforderungen des Militärs.²⁶

²³ Klodt, H.: Strategische Handels und Industriepolitik. Tübingen 1992. S. 110.

²⁴ Es handelt sich dabei um die Projekte „Tinkertoy“, „Molekularelektronik“ und „Mikromodulkonzept“.

²⁵ Borrus, M.G.: Competing for Control: America's Stake in Microelectronics. Cambridge 1988. S. 66.

²⁶ Halfmann, J.: Die Entstehung der Mikroelektronik. Frankfurt/Main 1984. S. 126.

*Government support having directed the pace of technological advance and lowered barriers to entry during the incubation period of semiconductor development, military procurement at premium prices created incentive and gave semiconductor firms the initial production experience that enabled them to enter and develop markets for commercial applications of their state-of-the-art components. The Defense Department did not require commercial market volumes, but it compensated by paying premium unit prices for its more limited demand.*²⁷

Auch die Anfangsphase der Mikroelektronik war durch die staatlich initiierte Nachfrage bestimmt (siehe Tabelle 2.1-4). NASA und Pentagon sicherten und bestimmten durch Erstaufträge die Produkt- und Technologieentwicklung. Die besondere Bedeutung dieser Unterstützung bestand in den rigorosen Qualitätsmaßstäben, die bei Raumfahrt- und Militäranwendungen gegenüber dem Preis die vorrangige Rolle spielten. Einerseits die Forderungen nach elektronischen Systemen, die auch unter extremen Temperatur- und Vibrationsbedingungen funktionieren, andererseits die vergleichsweise hohen nachgefragten Stückzahlen verhalfen der damaligen Halbleiterindustrie zur Verbesserung der technologischen Prozesse und damit zur Kostensenkung.²⁸

Die Verschiebung der Einsatzbereiche Integrierter Schaltungen auf den zivilen Bereich wurde von der japanischen Regierung aufgegriffen, die das wirtschaftliche Potential der Mikroelektronik frühzeitig erkannte. Unter der Leitung des MITI (Ministry of International Trade and Industry) schlossen sich japanische Unternehmen 1978 zu einem Projekt „VLSI“ zusammen, wodurch die Halbleiterforschung koordiniert wurde. Der Einfluß dieses Programms war bemerkenswert. Innerhalb weniger Jahre konnte die marktbeherrschende Rolle amerikanischer Firmen gebrochen werden²⁹ (siehe auch Abbildung 2.1-5). Zur Unterstützung der erheblich unter Druck geratenen amerikanischen Halbleiterindustrie wurden nun auch in den USA staatliche Förderprogramme eingeleitet mit dem Erfolg, daß die verbliebenen Marktanteile gehalten werden konnten. Die folgende Tabelle veranschaulicht eindrucksvoll die Wirksamkeit staatlicher Förderung auf die Entwicklung der Halbleiterindustrie am Beispiel der Handelsbilanzen von Japan und USA zur Zeit der ersten japanischen Förderprogramme.

²⁷ Borrus, M.G.: *Competing for Control: America's Stake in Microelectronics*. Cambridge 1988. S. 69.

²⁸ Halfmann, J.: *Die Entstehung der Mikroelektronik*. Frankfurt/Main 1984. S. 180.

²⁹ Mirow, M.: *Wettbewerbsbedingungen in der Elektroindustrie- Notwendigkeit einer Industriepolitik*. München 1993. S. 86.

Handelsbilanz für Halbleiterbauelemente (in Mio. \$)		
Jahr	Japan	USA
1976	-84	+293
1977	-4	+151
1978	+85	-152
1979	+119	-201
1980	+366	-223
1981	+349	-40

Tabelle 2.1-5

Handelsbilanzdifferenz bei Halbleiterbauelementen in Japan und USA als Folge japanischer Förderprogramme
 Quelle: Malerba, F.: The Semiconductor Business: The Economics of Rapid Growth and Decline. London 1985. S. 156.

In Europa reagierte man erst ab Mitte der achtziger Jahre mit vergleichbaren Programmen, wie z.B. ESPRIT, MEGA und JESSI, um den technologischen Rückstand, der sich in einem Rückgang der Marktanteile von fast 20% auf ca. 10% widerspiegelte, aufzuholen.

Heute beteiligen sich fast alle Regierungen durch intervenierende wirtschafts- und technologiepolitische Maßnahmen an einem Technologiewettlauf in der Halbleiterindustrie. Diese Anstrengungen beruhen allgemein auf der Erkenntnis, daß die Beherrschung und Produktion neuer Technologien ein wichtiger Faktor künftigen gesellschaftlichen Wohlstandes darstellt. Im Gegensatz dazu stellen in ihrer Untersuchung „Wissenschaft für Macht und Markt“ die Autoren fest, daß insbesondere das Motiv der internationalen Konkurrenz zwischen Staaten den wissenschaftlich-technischen Fortschritt beherrscht.

Wo immer eine Lücke ausgemacht wurde, bedurfte es zur Förderung des betreffenden Gebietes keiner besonderen Begründung, um es zum Gegenstand nationaler Interessen werden zu lassen.³⁰

Folgende Tabelle zeigt die Intensität der staatlichen F&E-Förderung im Bereich Halbleiter für verschiedene Länder. Man stellt fest, daß insbesondere Unternehmen in den südostasiatischen Staaten, Korea und Taiwan, am meisten von staatlichen Interventionen profitieren. Das begründet auch den Erfolg der dort ansässigen Halbleiterindustrie auf den Weltmärkten (siehe Abbildung 2.1-5).

³⁰ Eckert, M., Osietzki, M.: Wissenschaft für Macht und Markt. München 1989. S. 207.

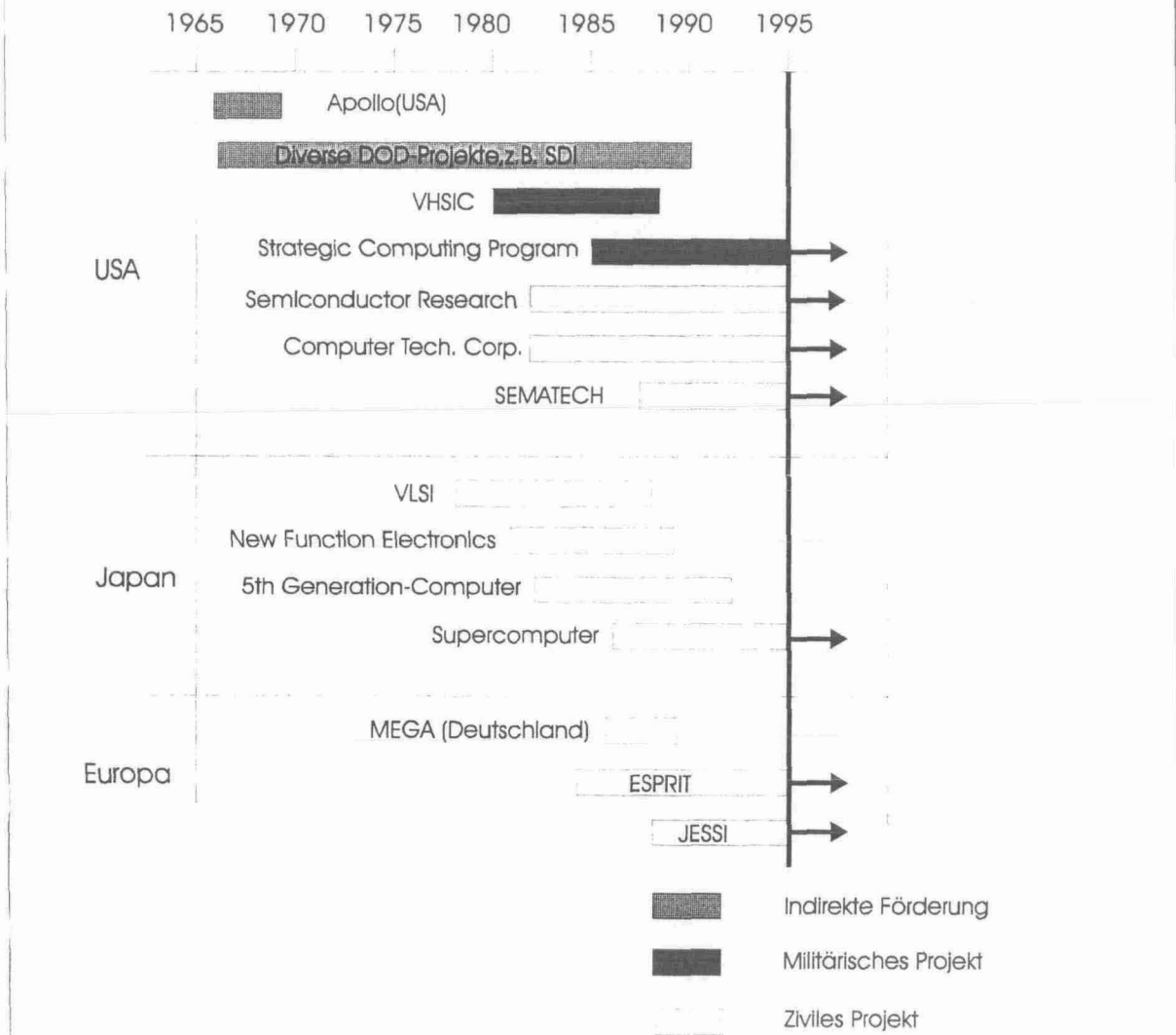


Abbildung 2.1-6

Staatliche Förderungen der Halbleiterindustrie

Quelle: Mirow, M.: Wettbewerbsbedingungen der Elektronikindustrie. München 1989, S. 85.

Neben dem wirtschaftlichen Einfluß der wachsenden Nachfrage haben auch diese staatlichen Eingriffe erhebliche Auswirkung auf die Geschwindigkeit und Ausrichtung des technologischen Fortschritts in der Halbleitertechnik.

Nicht zuletzt ist daher das dynamische Wachstum in dieser Branche auch auf wirtschafts- und technologiepolitische Einflußnahmen zurückzuführen.

	Steuerliche Förderung	F&E-Zuschüsse	Verbilligte Darlehen	Forschungsinfrastruktur
Japan	+++	+	++	++
USA	+	+	o	++
Deutschland	o	++	o	++
Taiwan	++	++	++	+++
Korea	+++	+++	++	++
o=nicht vorhanden	+ = geringe Intensität	++ = hohe Intensität	+++ = sehr hohe Intensität	

Tabelle 2.1-6

Intensität der staatlichen Förderung im Bereich Halbleiter nach Ländern
 Quelle: Hilpert, H.G., Ochel, W., Penzkofer, H., Reinhard, M.: Wirtschafts- und Technologiepolitik und ihre Auswirkungen auf den internationalen Wettbewerb: Das Beispiel der Halbleiterindustrie. ifo Schnelldienst; 23/1994; S. 13.

Den dynamisch steigenden Kosten technologischer Fortschritte steht ein seit etwa Mitte der achtziger Jahre stattfindender internationaler Förderwettbewerb entgegen, der mit den Programmen in Europa begann und sich jetzt durch die Konkurrenz aus den südostasiatischen Ländern vermutlich eher beschleunigt. Es ist daher zu erwarten, daß sich die Auswirkungen staatlicher Fördermaßnahmen auf die technologische Entwicklungsgeschwindigkeit seit Beginn der japanischen Programme nicht wesentlich verringert hat.

2.1.2.7 Die heutige Marktsituation

Im Jahr 1995 wurden weltweit elektronische Halbleiter im Wert von ca. 144,4 Mrd. Dollar umgesetzt, ein Großteil (etwa 85%) davon im Bereich *Integrierter Schaltkreise*. Der Rest entfällt auf Leistungsbaulemente, optoelektronische und diskrete Bauelemente. Die Zuwachsraten der Halbleiterindustrie unterliegen starken Schwankungen. Sie liegen in der Regel bei ca. 15% p.a. und somit über dem Durchschnitt anderer technologischer Güter. Nach Expertenschätzungen ist mit einem Ansteigen der

Wachstumsraten zu rechnen und im Jahr 2000 soll ein Marktvolumen von 330 Mrd.\$ erreicht sein.

Jahr	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	2000
Umsatz in Mrd. \$	57,2	58,4	ca. 62	65,3	83,1	110,6	144,4	182,9	331,0

Tabelle 2.1-6

Umsätze der Halbleiterindustrie
Quelle: Dataquest, Oktober 1995.

Die Tabelle 2.1-7 zeigt die weltweit führenden Halbleiterhersteller. Diese zehn umsatzstärksten Unternehmen stellen den Kern von weltweit etwa 250 Firmen dar und verfügen über einen kumulierten Marktanteil von ca. 55%.

Rang	Firma	Umsatz 1994 (Mio. \$)	Umsatz 1995 (Mio. \$)	Wachstum (%)
1	Intel	10.099	13.828	37
2	NEC	7.961	11.360	35
3	Toshiba	7.556	10.185	35
4	Hitachi	6.644	9.422	42
5	Motorola	7.238	9.173	27
6	Samsung	4.832	8.344	73
7	Texas Instruments	5.548	8.000	44
8	Fujitsu	3.869	5.511	42
9	Mitsubishi	3.772	5.154	37
10	Philips	2.920	4.040	38
Gesamt		60.439	85.017	40,67
Gesamter Halbleitermarkt		110.576	144.400	30,6

Tabelle 2.1-7

Rangliste der umsatzstärksten Halbleiterhersteller 1995
Quelle: Dataquest aus Markt & Technik 3/96 S. 20.

Die hohe Konzentration auf dem Halbleitermarkt hat sich als Folge der Spezialisierung dieser Firmen auf Massenprodukte wie Speicher und Mikroprozessoren herausgebildet. Im Jahr 1995 konnten die Umsätze dieser ersten zehn Halbleiterhersteller stärker als der Gesamtumsatz der Halbleiterbranche ansteigen. Auch in Zukunft ist mit einem Anwachsen der Unternehmenskonzentration zu rechnen, weil die Dominanz der Halbleiterspeicher und Mikroprozessoren weiter zunehmen wird (siehe Abbildung 2.1-7).

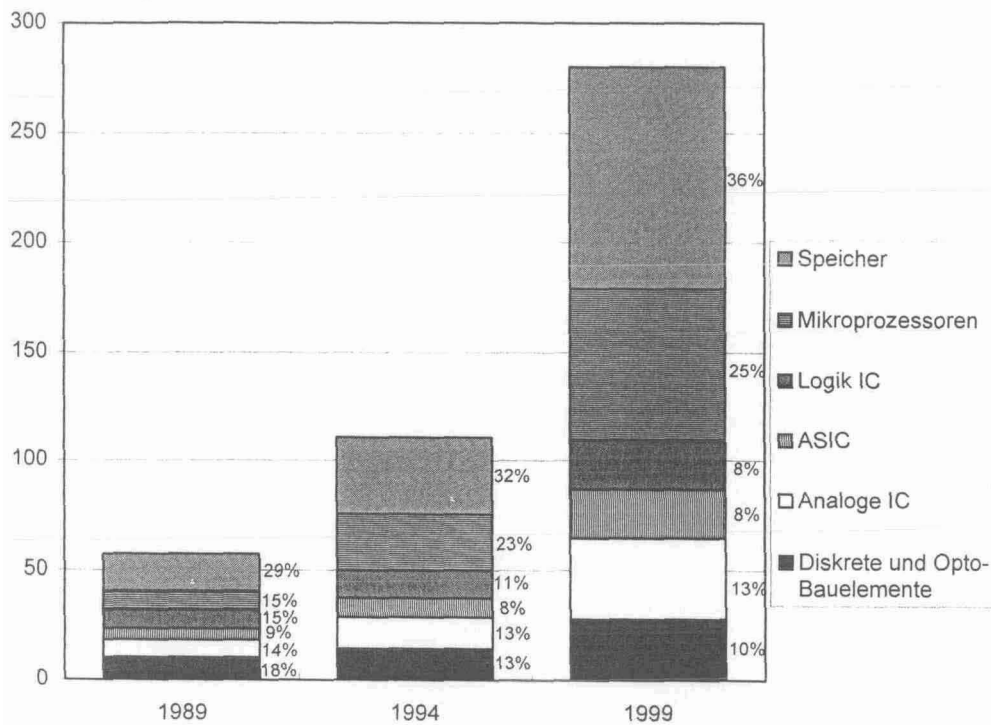


Abbildung 2.1-7

Marktgröße nach Produkten

Quelle: Knorr, J.: Unterwegs zur Gigabit-Generation. Siemens Zeitschrift. 1/96; S. 7.

Die Hälfte des gesamten Chipmarktes entfällt auf den Industriesektor Datentechnik, für den die Bauelementtypen Mikroprozessoren und Speicher relevant sind. Dominiert sind die japanischen Anbieter bei den technologieintensiven DRAM (Dynamic Random Access Memory), während die Stärken der amerikanischen Un-

ternehmen bei den Mikroprozessoren liegen. Der Anteil von DRAM am Gesamtumsatz an Integrierten Schaltkreisen beträgt z.Z. ca. 21%.

Weitere wichtige Märkte stellen die Branchen Konsumelektronik und Telekommunikation dar. Wirtschaftliche Triebfeder des Umsatzwachstums ist die Datentechnik. Das Ineinandergreifen der Fortschritte bei Mikroprozessoren und Speichern begünstigte das Innovationstempo und erzwang somit einen schnellen Generationswechsel in der Computerbranche. Die Liberalisierung und Globalisierung auf den Telekommunikationsmärkten beförderte in den letzten Jahren ein Ansteigen der Marktanteile der Kommunikationstechnik.

2.1.2.8 Die Dynamik der Halbleitertechnologie

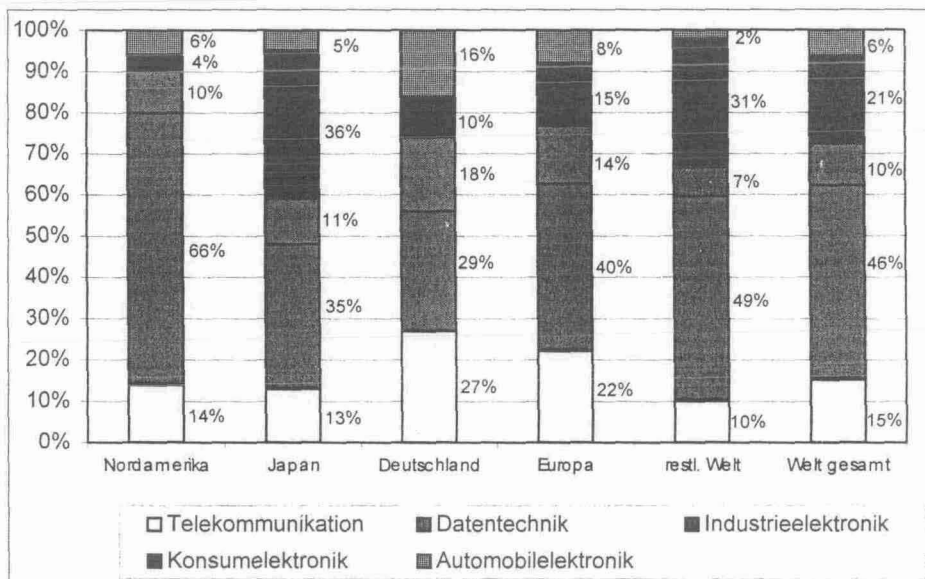


Abbildung 2.1-8

Branchenmarktanteile der Halbleiterindustrie 1993

Quelle: GME. mikroelektronik + mikrosystemtechnik. 4/1994; S. 245.

Seit über 30 Jahren ist die Dynamik in der Weiterentwicklung von Schaltkreisen mit Bauelementen aus Silizium ungebrochen. Beginnend mit den diskreten Bauelementen, den Transistoren und Dioden, führt der Entwicklungsweg über erste integrierte

Schaltkreise, Standardlogikbausteine bis hin zu den modernen Mikroprozessoren, Speicherbausteinen und signalverarbeitenden Bausteinen für Kommunikationsanwendungen. Die Siliziumtechnologie übertrifft hinsichtlich ihres Innovationstempos die meisten anderen Industriebereiche und ist durch die einzigartige Universalität ihrer Anwendung bestimmend für viele andere Technikbereiche geworden. Ausschlaggebend für die technologische und wirtschaftliche Fixierung auf den Basiswerkstoff Silizium sind neben einigen Materialeigenschaften seine Vorkommenshäufigkeit (im Sinne einer kostengünstigen Versorgung mit Rohsilizium) und vor allem die Verfahrenstechnologien.

2.1.2.8.1 Wirtschaftliche Entwicklungsparameter

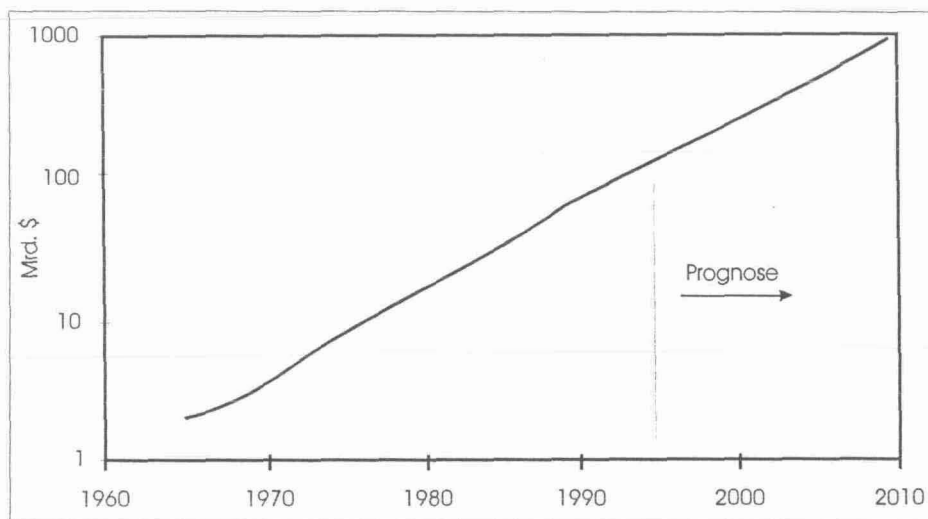


Abbildung 2.1-9

Weltweite Umsätze des Halbleitermarktes

Quelle: Chatterjee, P.K., Doering, R.R.: Manufacturing Gigachips in the Year 2005. 1995 Symposium on VLSI Technology, Digest of Technical Papers. Kyoto 1995; S. 53.

Das hohe wirtschaftliche Wachstum mikroelektronischer Bauelemente verläuft im Einklang mit der Geschwindigkeit der technologischen Weiterentwicklung. Zur Be-

wertung des wirtschaftlichen Erfolgs stehen in aller Regel Umsatzentwicklungen³¹ im Vordergrund. Konjunkturbedingt sind die Umsatzsteigerungen der Halbleiterindustrie großen Schwankungen unterworfen. In den Jahren 1994 und 1995 konnten jedoch bis über 30% jährliches Wachstum erzielt werden.

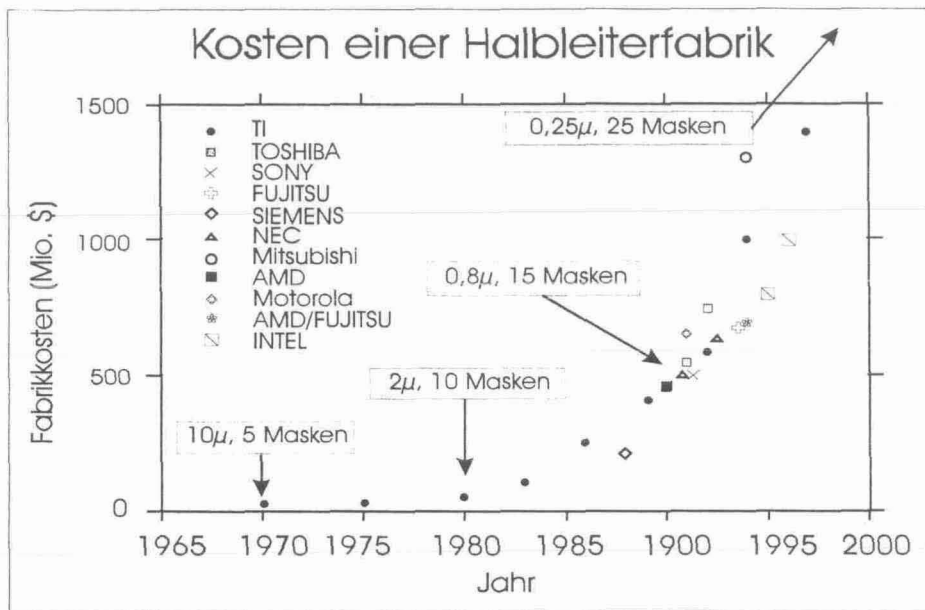


Abbildung 2.1-10

Entwicklung der Fabrik-Kosten mit Strukturgrößen und Prozeßkomplexität
Quelle: Markt&Technik 19/1995, S. 20.

³¹ Dennoch ist die Aussagekraft von Umsatzzahlen beschränkt, da sie nur die auf dem freien Markt gehandelten Halbleiterprodukte beziffern, nicht jedoch die ausschließlich zum internen Bedarf produzierten berücksichtigen. Daher ist zu vermuten, daß das Gesamtvolumen der Welthalbleiterproduktion den angegebenen Gesamtumsatz noch um einiges übersteigen dürfte. IBM hat z.B. als größter Halbleiterbauelementehersteller der Welt erst seit 1994 seine Bauelemente auf dem freien Markt angeboten. Bis zu diesem Zeitpunkt hat das Unternehmen nur für den eigenen Bedarf Bauelemente hergestellt und wurde bei der Ermittlung der Branchenumsätze nicht berücksichtigt.

Ähnlich hohe Anstiege weisen auch die Investitionskosten für neue Fertigungsstätten auf. Während noch bis in die sechziger Jahre der Einstieg in die Halbleiterindustrie auch aufgrund niedriger Investitionskosten für Fertigungsausstattungen attraktiv war, so stiegen auch diese Kosten exponentiell an und erreichen heute Summen von ca. 3 Mrd. DM pro Fabrik (Siemens investiert z. B. in Dresden seit 1994 über einen Zeitraum von mehreren Jahren 2,7 Mrd. DM in eine neue Halbleiterfabrik).

Den größten Anteil an diesen Kosten stellt der Aufwand für die Anforderungen an Staubfreiheit und chemische Reinheit dar. Der Anteil an Reinraumausstattung, reinraumtaugliches Fertigungsequipment und chemisch reine Prozeßchemikalien an den Gesamtkosten beträgt etwa 50-70% und ist in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegen. Der Lohnkostenanteil variiert je nach Höhe der übrigen Fixkosten zwischen 20% und 40%.

	Kostenanteil an Fabrikkosten
Gebäude ohne Equipment	6,0%
Equipment	27,0%
Personal	25,0%
Betriebsmittel (Gase, Chemie,...)	25,0%
Si-Wafer	8,0%
Sonstiges	9,0%

Tabelle 2.1-8

Aufteilung Waferkosten nach Kostenarten

Diese Zuwächse des Halbleitermarktes werden ungeachtet eines andauernden schnellen Preisverfalls der Halbleiterprodukte erreicht. Abbildung 2.1-11 zeigt anhand vergangener Generationswechsel bei den Speicherbauelementen, daß sich trotz ständig erhöhter Leistungsfähigkeit der Preis der Bauelemente einem jeweils gleichen, konstanten Wert nähert.

Gleichzeitig mit dem Wachsen des Marktes um jährlich durchschnittlich ca. 15% findet eine Kostendegression pro Bauteil um den Faktor 50 pro Dekade statt, d.h. in einem Jahrzehnt hat eine integrierte elektrische Funktion nur noch ein Fünfzigstel ihres heutigen Wertes. Abbildung 2.1-11 zeigt den Preisverfall von Speicherchips und das Wachstum der Zahl integrierter Transistoren pro Chip (Bits/Chip). Das gleiche Verhalten läßt sich auch bei anderen Typen von Halbleiterbauelementen beobachten.

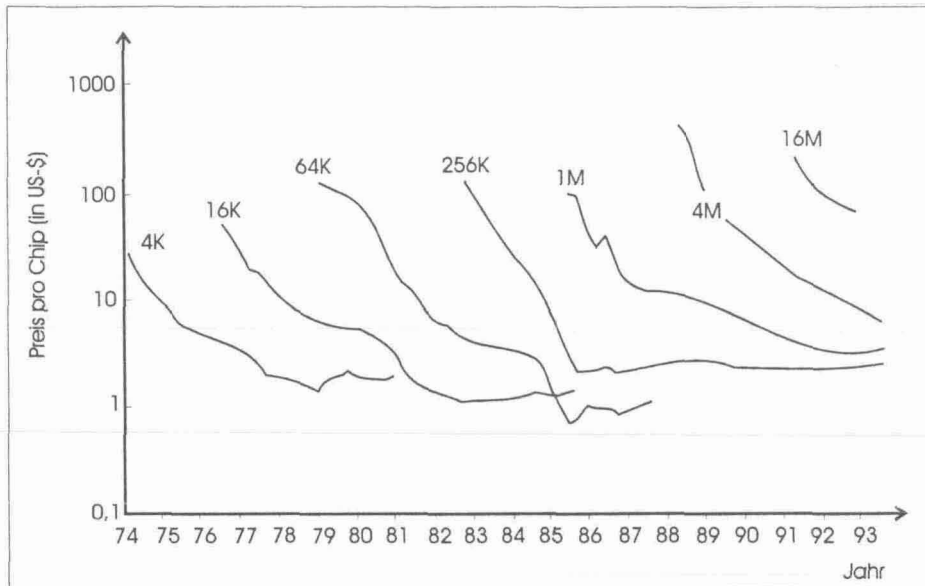


Abbildung 2.1-11

Preisverfall von DRAM-Speicherchips verschiedener Generation
 Quelle: Föll, H.: Technological and Economical Aspects of Mega-Chip Development. Electron Technology. Warschau 1993; S. 23-34.

Die Größe der Speicherchipindustrie beeinflusst mit ihren regelmäßigen Technologie-Generationswechseln alle Bereiche der Chipentwicklung. Die Speicherhersteller dominieren durch die Masse an benötigter Fertigungskapazität die Nachfrage nach Fertigungsgeräten (Equipment). Die relative Enge des gesamten Fertigungsgeräte-Marktes zwingt die Equipmenthersteller, die Spezifikation der Fertigungsausrüstung an die Anforderungen der Speicherherstellung anzupassen. Die Fertigungsgeräteindustrie ist dadurch mit der Generationenfolge der Speicher verbunden, und orientiert sich an dem dreijährigen Rhythmus des Technologiewandels.

2.1.2.8.2 Technische Entwicklungsparameter

Das Wachstum technischer Leistungsdaten in der Halbleitertechnik wird im sog. Moore'schen Gesetz als exponentielles Wachstum beschrieben. Anhand von Beob-

achtungen ging Gordon Moore³² schon Mitte der sechziger Jahre davon aus, daß sich die exponentielle Zunahme der Transistoren pro Chip fortsetzt.

*I just noticed that the number of transistors on a chip had doubled for each of the last three years, so I said the rate would continue.*³³

Auch heute läßt sich feststellen, daß sich die Komplexität³⁴ von Mikrochips alle 3 Jahre vervierfacht. Belegen läßt sich diese Beobachtung am Beispiel des DRAM, dessen Komplexität näherungsweise mit seiner Kapazität übereinstimmt. Für Logikchips gelten diese Feststellungen analog, in der absoluten Anzahl der Transistoren liegen sie mit etwa dem Faktor 5 unter den Speicherchips. Heutige Prozessoren besitzen zwischen 3 und 8 Millionen Transistoren bei Chipflächen von 200 mm. Aus Gründen des schneller wachsenden Verdrahtungsaufwands bei Logikchips verläuft die Wachstumskurve nicht ganz so steil wie bei den DRAM's.

Das Komplexitätswachstum jeder Generation um den Faktor 4 wird durch Verkleinerung der Lineardimensionen um den Faktor 1,7 und durch die Vergrößerung der aktiven Chipfläche um den Faktor 1,4 erreicht.³⁵

	4k	16k	64k	256k	1M	4M	16M	64M
Produktionsbeginn (Jahr)	1976	1979	1982	1985	1987	189	1992	1995
Chipfläche (mm)	24	20	30	45	54	91	142	200
kleinste Strukturgröße (µm)	6	4	2	1,5	1,2	0,8	0,6	0,4

Tabelle 2.1-9

Entwicklung von Chipfläche und kleinsten Abmessungen bei DRAM-Bauelementen

Quelle: Föll, H.: Technological and Economical Aspects of Mega-Chip Development Electron Technology. Warschau 1993; S. 25.

³² G. Moore war seinerzeit Mitarbeiter von Shockley Transistor Laboratories, später dann Mitgründer von Fairchild Semiconductors und Gründer von INTEL.

³³ G. Moore, aus Reid, T.: Microchip. London 1985; S. 123.

³⁴ Unter der Komplexität eines Integrierten Schaltkreises kann hier die Anzahl der logischen Funktionsblöcke (sog. Gatter) verstanden werden. Bei Speicherbausteinen entspricht die Anzahl dieser Gatter in etwa der Speicherkapazität.

³⁵ O. Manek; „Leistungsbeschreibung der Mikroelektronik“; Berlin 1994.

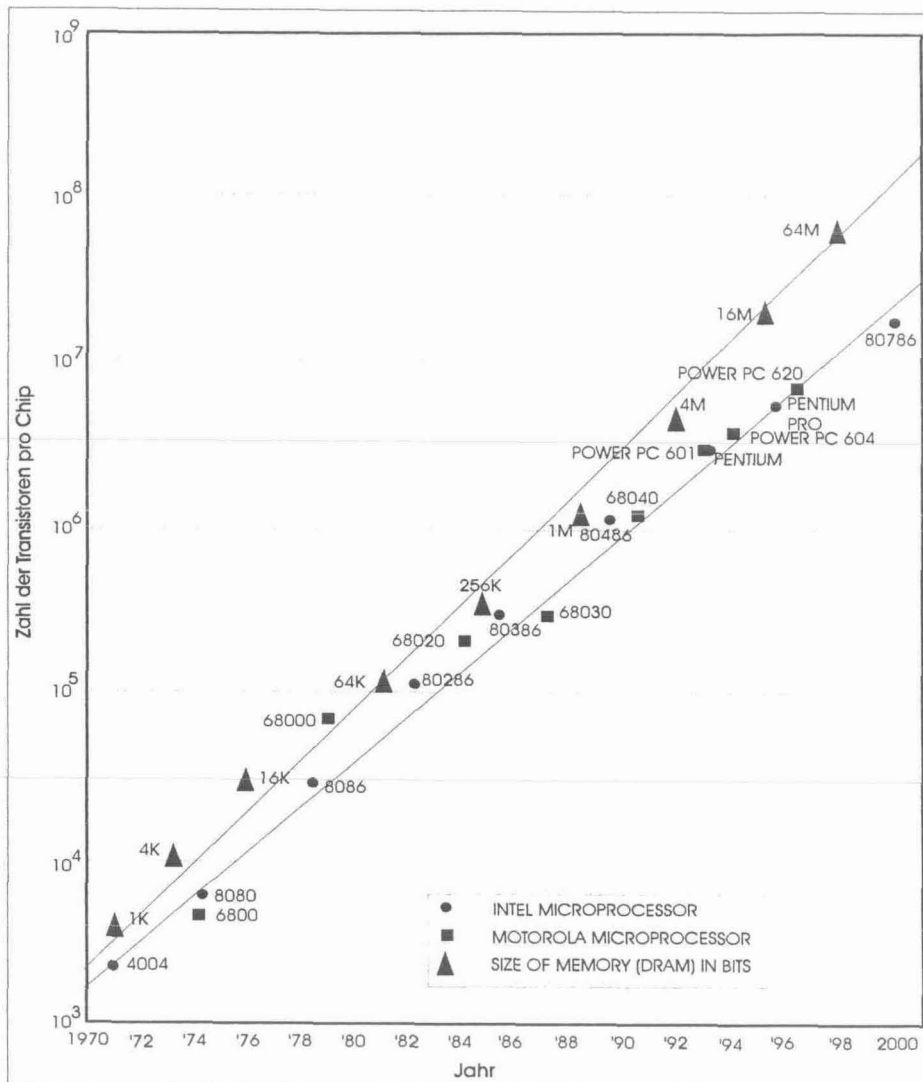


Abbildung 2.1-12

Komplexitätswachstum bei DRAM und Mikroprozessoren
 Quelle: VLSI Research, Inc.: Integrated Circuit Engineering Corporation.

Ein weiterer Effekt der Miniaturisierung neben dem Ansteigen der Komplexität ist das Wachstum der Arbeitsfrequenz integrierter Schaltungen. Dabei wirkt sich die Verkleinerung der Strukturgrößen auf die Schaltzeit eines Transistors und die sie bestimmende Kapazität positiv aus. Wichtige Größe ist die Umladezeit einer Kapazität, die sowohl von der Strukturgröße und von dem Schaltstrom abhängt als auch vom zu erreichenden Spannungshub.

2.1.2.9 Gründe für die dynamische Entwicklung der Halbleitertechnik

Die Gründe für die Dynamik der Halbleitertechnik sind vielschichtig. Im allgemeinen sind Ursachen dynamischen Verhaltens stets Wachstums- und Selbstverstärkungsmechanismen.

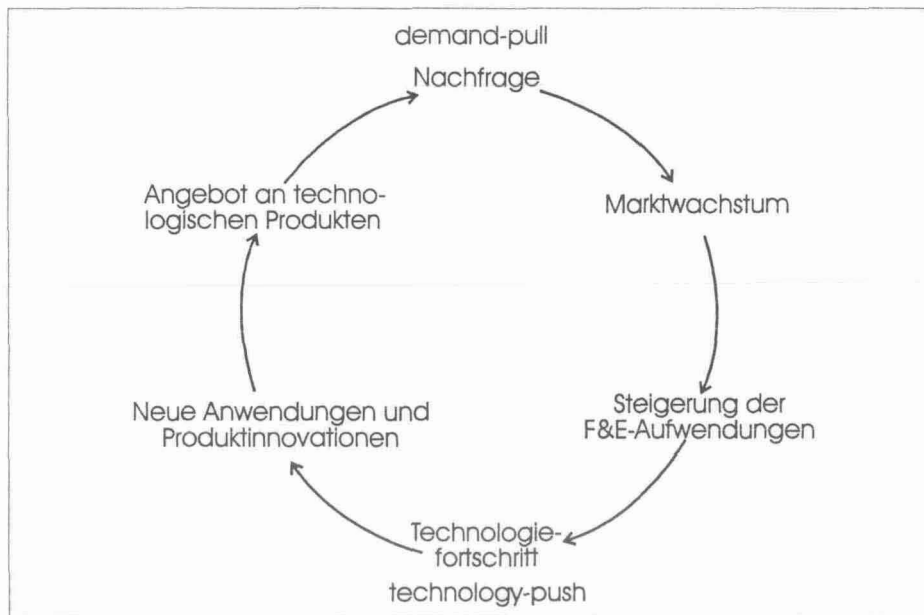


Abbildung 2.1-13

Der technologische Fortschritt und wirtschaftliches Wachstum im Zusammenspiel unterschiedlicher Faktoren

Auch bei der Halbleitertechnik findet man solche Prozesse begünstigt durch wirtschaftliche Abhängigkeiten, politische Umfeldbedingungen und technologisch-physikalische Zusammenhänge, die in ihren synergetischen Wirkungen zur massiven Durchdringung vieler Lebensbereiche mit Halbleiterprodukten beigetragen haben.

Ursachen der dynamischen Entwicklung der Halbleitertechnik sind nicht ausschließlich aus dem wirtschaftlichen Zusammenwirken von Angebot und Nachfrage abzuleiten. Vielmehr handelt es sich bei der Entwicklung der Halbleitertechnik um ein vielschichtiges Zusammenspiel wirtschaftlicher, technologischer und politischer Einflüsse und Wirkmechanismen.

Stabilisierende Wirkung auf die Kontinuität in der Halbleitertechnik hat die Wechselbeziehung zwischen wirtschaftlicher Nachfrage „demand-pull“ und technologischer Neuerung „technology-push“.

Zwischen Nachfrage und technologischer Innovation besteht ein grundsätzlicher Zusammenhang, der mitverantwortlich für die ausgeprägte Wachstumsdynamik im Halbleitersektor ist. Die stetigen Steigerungen der Umsätze von Halbleiterproduzenten stehen mit den nahezu konstanten technologischen Fortschritten in einer Wechselbeziehung.

Die universelle Verwendbarkeit der Chips ermöglicht ihren Einsatz in vielen Bereichen. Mit jeder neuen Chipgeneration wird die Funktionalität bestehender Produkte erhöht, und neuartige Anwendungen werden geschaffen. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten sind die Rahmenbedingungen, die großen Einfluß auf den Nachfrageanstieg und damit das dynamische Umsatzwachstum haben. Gleichzeitig sind sie die Voraussetzung, die zunehmenden F&E-Kosten für jede neue Generation von Halbleiterbauelementen aufzubringen.

Die Dauer dieses Prozesses ist in den vergangenen Jahrzehnten entsprechend dem Moore'schen Gesetz bemerkenswert konstant geblieben. Sie wird maßgeblich von den Umsetzungszeiten zwischen Technologieinnovation und Produktentwicklung sowie von der Leistungsfähigkeit der F&E bestimmt.

2.1.3 Industriestrukturen und Merkmale moderner Halbleiterproduktion

Die zuvor beschriebene Entwicklung der Halbleitertechnik und die Besonderheiten beim industriellen Produktionsprozeß führte in der Halbleiterindustrie zu ausgeprägten industriellen Strukturen. Sie sind gekennzeichnet durch hohe Spezialisierung der Halbleiterunternehmen, weit fortgeschrittene Globalisierung und Internationalisierung, sowie eine starke Kooperation von Unternehmen in strategischen Allianzen. Die koordinierte und ausgeprägte Zielausrichtung der Forschung und Entwicklung auf die jeweils nächste Technologiegeneration bestimmt zusätzlich in hohem Maß Intensität und Spezialisierung der technologischen Fortschritte.

2.1.3.1 Besonderheiten des industriellen Produktionsprozesses der Halbleitertechnik

Die bestimmende Rolle der Fertigungstechnik integrierter Halbleiterbauelemente für die technologische Weiterentwicklung ist eine Folge des immensen wirtschaftlichen Drucks, der durch die Dynamik des Fortschritts auf die Halbleiterhersteller ausgeübt wird. Nicht ohne Grund werden die Halbleiterspeicher (DRAM) mit der jeweils höchsten Bauteildichte und den damit zusammenhängenden hohen Anforderungen an die Fertigung auch als Technologietreiber bezeichnet. Der Erfolg der japanischen Unternehmen in diesem Marktsektor während der achtziger Jahre ist ausschließlich auf die Optimierung der Produktionstechnik für Integrierte Bauelemente zurückzuführen.

Der industrielle Produktionsprozeß von integrierten Bausteinen ist demnach weitgehend bestimmt durch wirtschaftliche Umfeldbedingungen und gekennzeichnet durch einige spezifische Eigenheiten. Die Produktion von Halbleiterbausteinen unterscheidet sich von anderen Produktionssystemen und ist von drei bedeutsamen wirtschaftlichen Schlüsselfaktoren, nämlich Kosten, Zuverlässigkeit und Time-to-market geprägt.³⁶

2.1.3.1.1 Kosten

Das Verhältnis von Investitionen zum Umsatz liegt in der Halbleiterbranche mit 20-30%³⁷ deutlich über dem Durchschnitt der verarbeitenden Industrie. US-Unternehmen verwendeten z.B. von 1980-1992 jährlich etwa 12% des Umsatzes für F&E und weitere 16% für Kapitalinvestitionen.³⁸

Diese hohen laufenden Aufwendungen sind Kostenfaktoren, die heute für viele Unternehmen eine hohe Markteintrittsbarriere darstellen und die während der Frühphase dieser Industrie in den sechziger Jahren nicht existierte. Ein Markteintritt ist heute meist nur mit intensiver staatlicher Unterstützung möglich, die oft die hohen Kosten der Technologieentwicklung auffängt (so konnten z.B. innerhalb der letzten 5-10 Jahren durch staatliche Unterstützung zahlreiche Halbleiterfabriken in Taiwan und Korea entstehen.).

³⁶ Liehr, M., Rubloff, G.W.: Concepts in competitive microelectronics manufacturing. Journal of Vacuum Science Technology. Jul/Aug 1994. S. 2727.

³⁷ Noyce, R.: Decline of the U.S. Semiconductor Infrastructure. U.S. Congress; S. 39: „The US semiconductor industry reinvests 20 to 30 percent of sales in new capital every year.“; Washington 1990.

³⁸ „U.S. Industrial Outlook -1194“; „Chapter 15: Electronic Components“; Office of Microelectronics.

Der Kostenanstieg für neue Produktionslinien ist exponentiell. Gründe hierfür liegen in der ökonomischen Notwendigkeit, den steigenden Fixkostenblock (siehe Abbildung 2.1-15) mit höheren Produktionszahlen aufzufangen. Die Kapazität der Halbleiterfabriken muß schnell ansteigen, um die Kostenlast auf eine hohe produzierte Stückzahl zu verteilen. Hinzu kommt der kurze Produktlebenszyklus von nur wenigen Jahren und das schnelle Altern der Fertigungsinfrastruktur, so daß die Amortisationsdauer vergleichsweise gering ist. Trotz der schnellen Kostenentwicklung bei den Fertigungsgeräten bleibt festzustellen, daß die Kosten bezüglich der produzierten Waferfläche ungefähr gleich bleiben, weil sich Kostenanstieg und Produktivitätserhöhung kompensieren (siehe Abbildung 2.1-14).

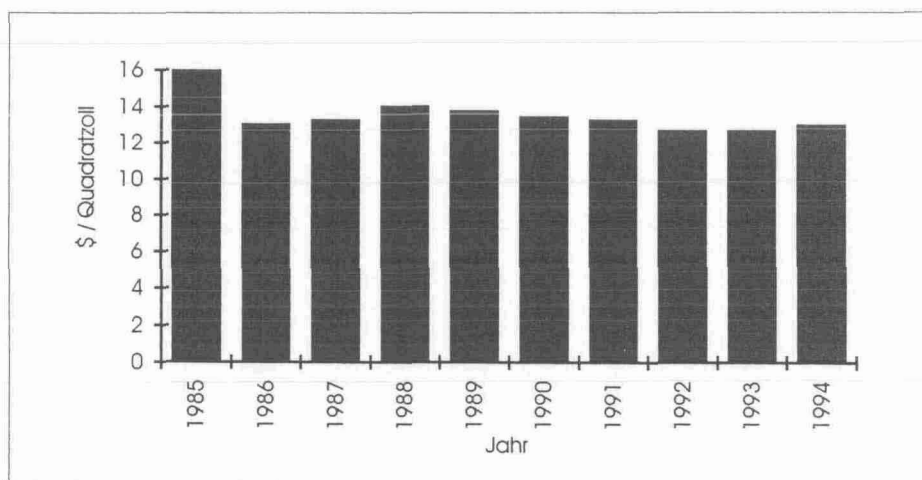


Abbildung 2.1-14

Kostenentwicklung in Bezug zur prozessierten Waferfläche
Quelle: Markt&Technik 19/1995, S. 20.

Insbesondere bei mikroelektronischen Massenprodukten (Speicher und Mikroprozessoren) sind diese Einflußfaktoren durch den häufigen Technologiewechsel, die hohen technologischen Anforderungen an die Fertigungsausstattung und den wirtschaftlichen Druck der konkurrierenden Anbieter gewichtig. Viele Anbieter müssen angesichts fehlenden Kapitals für Innovationen aufgeben. Großfirmen wie INTEL u.a. bestimmen bis heute durch forcierte Entwicklungsstrategien den Halbleitermarkt und sichern als Marktführer ihren wirtschaftlichen Erfolg.

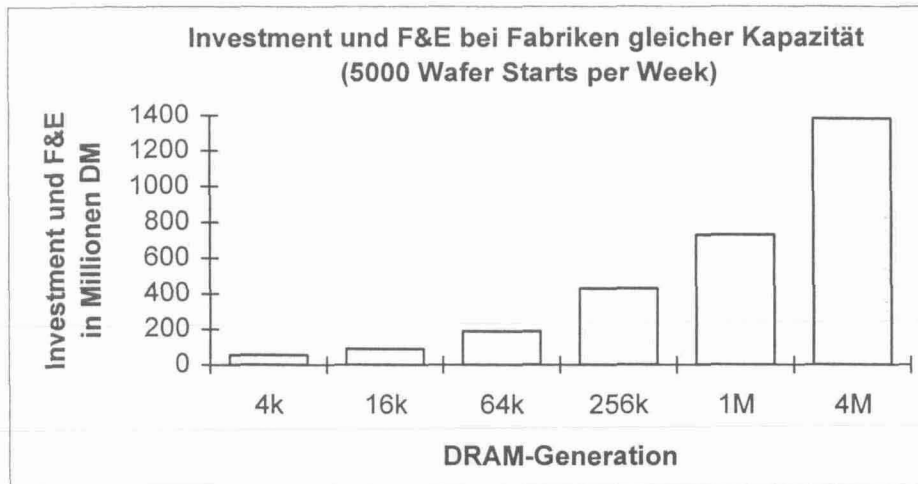


Abbildung 2.1-15

Fixkostenzunahme bei DRAM-Generationen

Quelle: Maringer, A.: Preisverfall mikroelektronischer Bauelemente am Beispiel der DRAM-Speicherbauelemente. Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 5/1990; S. 431.

Die Erneuerung der Produktionsanlagen zur Aufnahme größerer Waferscheiben kommt einer Neueinrichtung der Produktionsreinhäuser gleich, da die meisten Fertigungsanlagen nicht ohne weiteres auf größere Waferdurchmesser umzustellen sind. Durch die hohen Anforderungen an das Equipment und die wachsenden Produktionskapazitäten wächst der Aufwand für Fertigungsgeräte von Generation zu Generation um 80-100%.³⁹ Insbesondere die Probleme der Produktionsausbeute und Produktionsauslastung dominieren die moderne Halbleiterfertigung.

Weitaus weniger gravierend sind diese wirtschaftlichen Parameter für Halbleiterfabriken, die in geringeren Stückzahlen produzieren. Produktionsanlagen für analoge ICs, Logik-ICs und ASIC's zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität der Fertigungseinrichtung aus, die in Fabriken für die Speicherherstellung nicht erreicht wird. Diese hohe Anpassungsfähigkeit wird jedoch mit Einbußen bei Produktionsausbeute und Produktionsdurchsatz erkauft. Die Notwendigkeit zur Kostenreduktion ist mit den wechselnden Anforderungen der Produkte in Einklang zu bringen.

³⁹ Ogirima, M.: Process Innovation for Future Semiconductor Industry. 1993 Symposium on VLSI Technology. Kyoto 1993. S. 4.

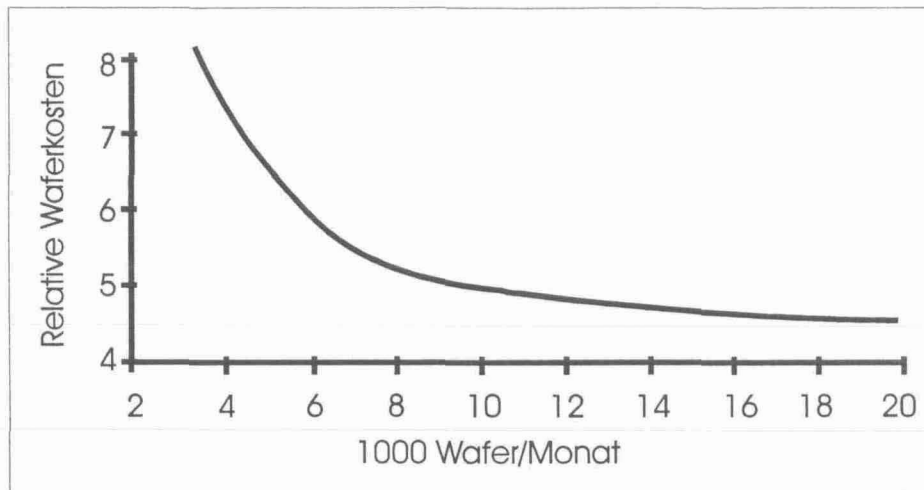


Abbildung 2.1-16

Relative Produktionskosten bezüglich Fabrikkapazität

Quelle: Chatterjee, P.K., Doering, R.R.: Manufacturing Gigachips in the Year 2005. 1995 Symposium on VLSI Technology. Digest of Technical Papers. Kyoto 1995. S. 54.

Die hohe Dynamik des technologischen Wandels ist die Ursache einer Reihe von Herausforderungen für Halbleiterhersteller:

- Aufgrund großer wirtschaftlicher Konkurrenz und technologischer Weiterentwicklung sind regelmäßig hohe Investitionen notwendig, um die Fertigungsanlagen auf dem Stand der Technik zu halten.
- Neue Verfahren bzw. Technologien müssen in die Produktion zu einem Zeitpunkt eingeführt werden, in der diese noch nicht ausreichend beherrscht werden. Auf Schwierigkeiten stößt man insbesondere bei chemisch-physikalischen Prozessen, da diese anfänglich nicht reproduzierbar sind.
- Die einzelnen hochkomplexen Prozesse müssen alle Kriterien an Ausbeute und Qualität erfüllen, da sie in einer Gesamtheit von Prozessen verwendet werden.

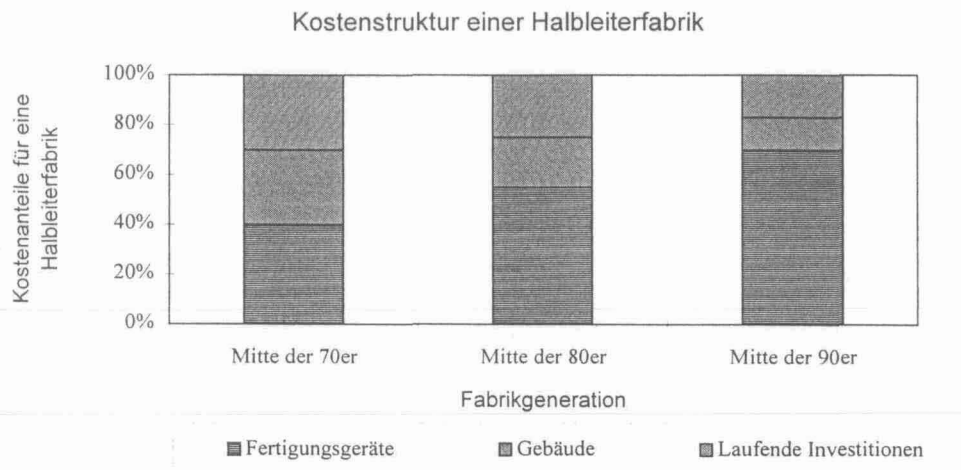


Abbildung 2.1-17

Entwicklung der Kostenstruktur einer Chipfabrik

Quelle: SEMATECH: The National Technology Roadmap for Semiconductors. 1996.

2.1.3.1.2 Zuverlässigkeit

Im Zusammenhang mit der Notwendigkeit zur Kostenreduzierung im Produktionsprozeß steht eine hohe Qualitätskontrolle bei Produkt und Produktion.

Die Produktzuverlässigkeit, d.h. die Erhaltung der Funktionalität über eine vorgebene Lebensdauer, stellt eine wichtige Eigenschaft Integrierter Schaltkreise dar, die für den Einsatz in vielen Anwendungsgebieten und damit eine Vorbedingung für den Markterfolg ist. Die Arten von Fehlermechanismen sind vielfältig. Neben Materialermüdungen durch innere Spannungen können auch elektrisch bedingte Ausfälle entstehen, wie z.B. durch Elektromigration u.a.. Daher müssen schon in der Designphase mögliche Fehlerquellen berücksichtigt und die Entwurfsregeln den Prozeßbedingungen angepaßt werden. Die Identifikation des Ausfallmechanismus führt in einem Lernprozeß zur Anpassung der Prozeßparameter in der Produktion. Nach dem abschließenden Funktionstest werden die Chips einem beschleunigten Belastungstest unterzogen, bei dem sie einige Zeit mit Spannungen über dem Nominalwert und unter ho-

hen Temperaturen betrieben werden. Dieses sog. Burn-In verringert die Anfangsausfallrate drastisch.

Die Prozeßzuverlässigkeit beeinflußt direkt die Herstellungskosten. Ausbeute, Durchsatz und die aktive Betriebszeit der Herstellungsgeräte (equipment up-time) sind Maßzahlen, die die Leistungsfähigkeit des Produktionsablaufes angeben. Eine intensive Prozeßkontrolle ist notwendig, um stabile Prozesse und geringe Ausbeuteverluste zu erreichen. Bei der sog. 6- σ -Prozeßkontrolle (σ : Standardabweichung vom Mittelwert) wird darauf geachtet, daß die Abweichungen jedes einzelnen Prozeßparameters der Fertigungsgeräte 3ppm des Spezifikationswerts nicht überschreiten. Weitere Verbesserung der Qualität können beispielsweise über Maßnahmen der Kontaminationskontrolle und durch die in-situ-Diagnose erreicht werden (d.h. über Sensoren wird der Fertigungsschritt online überwacht).⁴⁰

2.1.3.1.3 Time-to-Market

Unter Time-to-market versteht man die benötigte Zeitdauer, um ein Produkt zur Marktreife zu bringen. Die Entwicklungszeit einer völlig neuen Halbleitertechnologiegeneration beträgt etwa 10 Jahre, angefangen bei den ersten Materialforschungen bis hin zur Volumenproduktion.⁴¹ Der eigentliche Produktlebenszyklus beträgt hingegen nur ca. 3 Jahre. Durch den schnellen Wechsel der Chipgenerationen ist der Aufwand an F&E-Kosten sehr hoch. Um auch bei nachfolgenden fortgeschrittenen Technologien noch erfolgreich am Markt vertreten zu sein, müssen F&E-Arbeiten an mehreren Generationen gleichzeitig finanziert werden. Diese finden in der Regel phasenverschoben statt. So befindet sich häufig eine Generation in der Forschung, eine in der Entwicklung und eine oder zwei weitere in der Produktion.⁴²

Gelingt es einem Unternehmen nicht vor einem Konkurrenten ein Halbleiterprodukt auf den Markt zu bringen, so können schon geringe Verzögerungszeiten große Erlöse einbußen bei der späteren Vermarktung nach sich ziehen (siehe Abbildung 2.1-18).

Die Kumulierung des technologischen Vorsprungs ist eine Besonderheit, die es den technologisch unterlegenen Unternehmen erschweren, dauerhaft Gewinne mit Halbleiterbauelementen zu erzielen. Ein Wissensrückstand von wenigen Jahren bedeutet, nur noch wenig Gewinn zu erzielen und damit die hohen Investitionskosten und die

⁴⁰ Liehr, M., Rubloff, G.W.: Concepts in competitive microelectronics manufacturing. *Journal of Vacuum Science Technology*. Jul/Aug 1994. S. 2728.

⁴¹ Liehr, M., Rubloff, G.W.: Concepts in competitive microelectronics manufacturing. *Journal of Vacuum Science Technology*. Jul/Aug 1994. S. 2727.

⁴² Mitte 1995 lagen bereits erste Labormuster des 256 MBit-DRAM vor; die Produktion des 16 MBit-DRAM ist z.Z. auf dem voraussichtlichen Höhepunkt angekommen. Die Produktion des 64 MBit-Chips läuft in Kürze an.

notwendigen F&E-Kosten für die Nachfolgenerationen nicht mehr erbringen zu können. Andererseits kann ein technologischer Wissensvorsprung durch Reinvestition in F&E die Überlegenheit auch in der kommenden Generation sichern.⁴³ Bereits entstandene Lerneffekte aus einer Chipgeneration lassen sich allerdings nur zu einem geringen Teil in die Nachfolgende übertragen. Das zeigt sich im oftmals sprunghaften Wechsel der Marktführer bei den Halbleiterspeicherproduzenten.⁴⁴

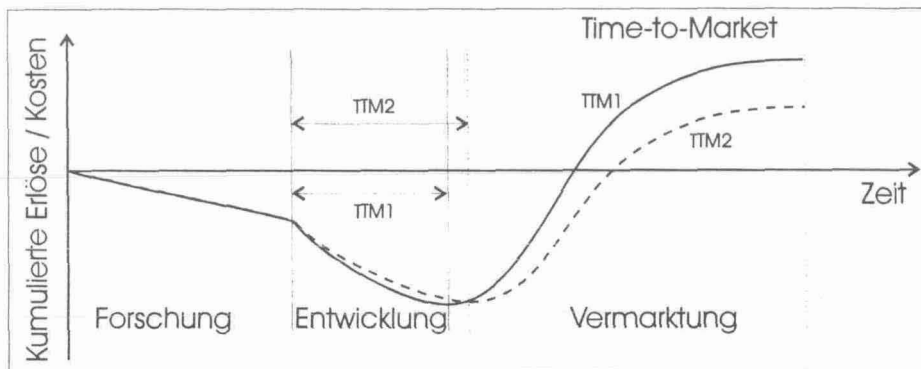


Abbildung 2.1-18

Auswirkungen des Time-to-Market auf den Deckungsbeitrag
 Quelle: Eckstein, F.: Entwicklungstrends in der Produktionstechnik bis zum Jahr 2000. REFA-Nachrichten. 1/1991; S. 4-14.

2.1.3.2 Aufbau einer modernen Halbleiterfabrik

Die geforderten Umfeldbedingungen für die Halbleiterfabrik lassen geringen Spielraum bei der äußeren Gestaltung der Produktionsanlagen. Die wichtigsten Rahmenbedingungen stellen der Reinraum und die Medienversorgung dar; i.a. wird ein Mehrebenen-Aufbau bevorzugt. Der Reinraum erfordert eine laminare Verdrängungsströmung, die von oben nach unten freigewordene Partikel davonträgt. Der Reinraumluft wird bei jedem Austausch ein Anteil gereinigter Außenluft hinzugefügt. Vom eigentlichen Fertigungsreinraum abgetrennt wird die nach unten bewegte Luft über sog.

⁴³ Bagger, T.: Strategische Technologien, internationale Wirtschaftskonkurrenz und staatliche Intervention. München 1992. S. 75.

⁴⁴ Klodt, H.: Strategische Handels und Industriepolitik. Tübingen 1992. S. 109.

Grauräume (d.h. Räume mit verminderter Luftreinheit) erneut zur Klimaanlage und den Luftfiltern zurückgeführt. Die Medienversorgung besteht aus Spezial-Behältern mit Rohrleitungen zu den jeweiligen Fertigungsanlagen, die besondere Gesichtspunkte bezüglich Reinheit und Sicherheit erfüllen müssen.

Das gesamte Gebäude muß aufgrund der sehr erschütterungsempfindlichen Prozesse, insbesondere der Lithographie, schwingungsarm errichtet sein. Störende Einflüsse von innen und außen müssen weitgehend vermieden werden.

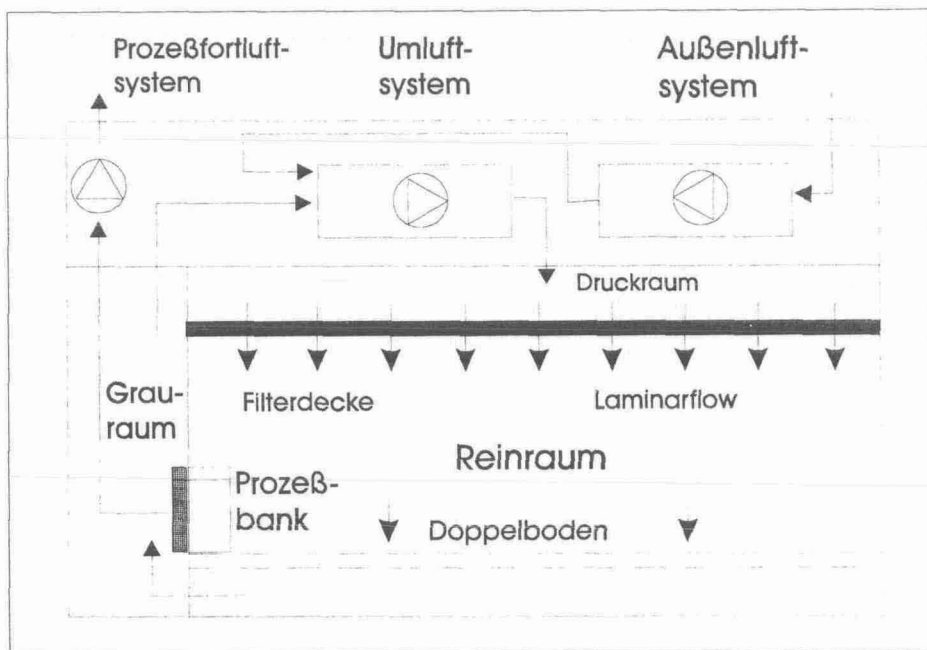


Abbildung 2.1-19

Prinzip-Skizze eines Reinraums

Quelle: Menz, W., Bley, P.: Mikrosystemtechnik für Ingenieure. Weinheim 1993, S. 34.

Der innere Aufbau moderner Halbleiterfabriken hängt von der Typenvielfalt der Bauelemente ab. Das Spektrum der Halbleiterproduktionssysteme reicht von einer variantenarmen Massenfertigung bis zu einer Mischfertigung mit unterschiedlichen Technologiearten. Abgesehen von vergleichbaren Anforderungen an die Reinräume sind Fertigungsausstattung und Produktionsorganisation gänzlich unterschiedlich.

Charakteristisch für Massenproduktionen ist die Größe der Fertigungslinien. Sie beschränken sich in der Regel auf die Produktion weniger verschiedener Bauelementtypen und sind daher auf eine geringe Flexibilität und hohen Durchsatz ausgelegt. Typische Beispiele sind die Fabriken zur Herstellung von Speicherbausteinen und Mikroprozessoren. Der relativ geradlinige Prozeßablauf macht den Einsatz von CAM (Computer Aided Manufacturing) zur Automatisierung vergleichsweise unkompliziert. Aufgrund der stets gleichbleibenden Prozeßabfolge sind auch Transportvorgänge zwischen den Fertigungsanlagen leicht zu automatisieren. Durch die konstante Zuordnung zwischen Fertigungsgeräten und Prozessen benötigt man nach dem sog. „Einfahren“ der Anlagen eine geringe Zahl von Bedien- und Aufsichtspersonen. Die überschaubare Anzahl verschiedener Maskenschritte macht ein aufwendiges Maskenmanagement überflüssig. Durch diese Eigenschaften werden Produktionssysteme für die Massenfertigung zu Lasten der Flexibilität sehr effizient.

Im Gegensatz dazu ist die Anpassungsfähigkeit eines der Hauptmerkmale einer modernen Mischfertigung. Zusätzlich zur Produktionsablaufsteuerung muß die Planung und Steuerung der einzelnen Prozeßabläufe berücksichtigt werden. Die Komplexität durch die Anzahl verschiedener Prozesse macht den Einsatz von aufwendigen CAM/CIM-Verfahren (CIM: Computer Integrated Manufacturing) erforderlich. Schon bei teilautomatisierten Betrieben kann der Anteil der Investition für ein solches System etwa 10-20% erreichen⁴⁵. Die Vielfalt an Fertigungsequipment und der Technologieschritte benötigt im allgemeinen mehr Kontrolle und Bedienpersonal. Aufwendiges Maskenmanagement, längere Durchlaufzeiten, höhere Pufferbestände sind weitere Merkmale dieser Form der Bauelementproduktion.

Mischfertigungen entstehen in der Regel aus vormals auf Massenprodukte spezialisierten Produktionsanlagen. Bedingt durch die häufigen technologischen Generationswechsel veralten moderne Halbleiterfabriken schon nach ca. 6 Jahren, so daß sie zur Fertigung der jeweils modernsten Speicher- und Mikroprozessorbaulemente nicht mehr geeignet sind. Da Mischfertigungen im allgemeinen einen etwas niedrigeren technologischen Standard benötigen, werden sie häufig durch die Umrüstung einer Halbleiterfabrik erstellt.

2.1.3.3 Strukturelle Entwicklung der Halbleiterindustrie

In den sechziger Jahren konzentrierten sich alle Produktionsschritte zur Herstellung integrierter Schaltkreise in einem Unternehmen. Entwurf, Technologieentwicklung, Fertigung von integrierten Schaltkreisen, die Entwicklung und Herstellung der Fertigungs- und Meßgeräte, die Qualitätskontrolle und das abschließende Einhäusen wur-

⁴⁵ Weinerth, H.: Schlüsseltechnologie Mikroelektronik. München 1989. S. 149.

den an einem Produktionsstandort durchgeführt. Die Firma FAIRCHILD steht stellvertretend für diese Art des Halbleiterunternehmens. Aus ihr gingen zahlreiche namhafte Unternehmen der Halbleiterbranche hervor (z.B. Intel u. LSI-Logic).

Die Halbleiterfirmen erkannten sehr früh, daß Spezialisierung der sinnvollste Weg ist, den gewachsenen technischen Anforderungen in allen Bereichen der Chipherstellung gerecht zu werden. Die Herstellung der Fertigungsgeräte und der Ausrüstung von Halbleiterfertigungseinrichtungen wurden als erstes ausgelagert. Die Entwicklung dieser Equipment-Industrie ist mittlerweile so weit fortgeschritten, daß jeder Typ eines hochspezialisierten Fertigungsgeräts von nur noch wenigen Herstellern für den weltweiten Bedarf produziert wird. Unter dem zunehmenden Preisdruck wurde als nächstes die relativ aufwendige und auf einen großen Anteil manueller Arbeit angewiesene Aufbau- und Verbindungstechnik hauptsächlich in Niedriglohnländer nach Fernost exportiert.⁴⁶

Ein weiterer Spezialisierungsprozeß ist die Verselbstständigung der CAD-Industrie. Nachdem die CAD-Software schon seit langem extern entwickelt wurde, findet nun auch der Entwurf von integrierten Schaltkreisen zunehmend abgekoppelt von den Halbleiterproduktionen statt. Weit fortgeschritten ist diese Entwicklung in Taiwan zu beobachten, wo teilweise die neuesten Technologielinien ohne eigene Entwurfsabteilung betrieben werden. Andererseits entstehen Mikroelektronikzentren mit eigenen Entwurfabteilungen, ohne selbst über IC-Technologie zu verfügen (Fabless Companies). Begünstigt wurde dieser Aufsplitterungsprozeß durch die geringe Anzahl der Anbieter eines bestimmten Fertigungsgerätes. Dadurch konnte die Anzahl der teilweise gerätespezifischen Design-Rules⁴⁷ auf einige wenige eingeschränkt werden. Die Spezialisierung der Halbleiterfirmen auf bestimmte Technologielinien mit allgemein bekannten Spezifikationen war eine weitere Folge dieses Prozesses.

Im Gleichschritt mit dieser Modularisierung der Fertigungsabläufe hat sich die strategische Orientierung der Unternehmen verändert. Die Verlagerung von Halbleiterfabriken unterschiedlichster Halbleiterhersteller in die wichtigsten Marktregionen der Welt (zur Sicherung der Marktnähe) ist ein Zeichen dafür, daß insbesondere in der Halbleiterindustrie eine zunehmende Internationalisierung stattfindet.

Die Globalisierung ist zum Kennzeichen der weltwirtschaftlichen Entwicklung in den vergangenen Jahrzehnten geworden. Angetrieben durch den technologischen Wandel, den hohen Wettbewerbsdruck und den regionalen Änderungen der Nachfrage ist insbesondere in der Halbleiterindustrie die Weltmarktorientierung der Unternehmen stark ausgeprägt. Erkennbar ist dieser Trend in dem anhaltend langfristigen Wachs-

⁴⁶ Manck, O.: Leistungsbeschreibung der Mikroelektronik. Berlin 1994. S. 8.

⁴⁷ Unter Design-Rules versteht man vom Prozeßablauf oder den elektrischen Spezifikationen vorgegebene Anforderungen an den Entwurf. Es handelt sich dabei in erster Linie um Geometrieregeln.

tum von ausländischen Investitionen, in der internationalen Orientierung bei Kooperationen und in der Wahl der Zulieferfirmen (international sourcing) sowie der ausgeprägten Produktspezialisierung regionaler Märkte.

	Halbleiterexportanteile nach Unternehmensnationalität	Halbleiterexportanteile nach Herstellungsland	Differenz
Nordamerika	32%	18%	14%
Europa	20%	22%	-2%
Japan	29%	22%	7%
Asien/Pazifik (ohne Japan)	19%	38%	-19%

Tabelle 2.1-10

Vergleich Halbleiterexportanteile nach Nationalität des Unternehmens und Region

Quelle: DRI/McGraw-Hill 1994.

Anhand der Tabelle wird die globale Orientierung von Halbleiterunternehmen deutlich. Nordamerika und der asiatisch-pazifische Raum weisen die größten Differenzen zwischen den Exportanteilen nationaler Unternehmen und dem Gesamtexport der Region auf. Hierin spiegelt sich tendenziell die Praxis amerikanischer Unternehmen wider, die zur Senkung der Produktionskosten in die Halbleiterfertigung in südostasiatischen Ländern mit niedrigeren Lohnkosten investieren.

Auch der Grad der Produktspezialisierung zwischen den Regionen Nordamerika, Japan, Europa und Südostasien ist vergleichsweise hoch:

Die Stärken der US-amerikanischen Unternehmen liegen traditionell in der Herstellung von Mikroprozessoren, bei denen sie einen Weltmarktanteil von 70% halten. Firmen wie INTEL und MOTOROLA dominieren diesen Markt. Preis und Ausbeute spielen hier die untergeordnete Rolle gegenüber dem Schaltungsentwurf und der ausgeprägten Kunden-Hersteller-Beziehung. Neben den Mikroprozessoren umfassen daher auch vorrangig kundenspezifische Schaltkreise das Produktspektrum amerikanischer Unternehmen.

Die japanischen Unternehmen haben in den achtziger Jahren den Schwerpunkt ihrer Anstrengungen auf die Produktionstechnologie gelegt und mit der Herstellung von Standardbausteinen große Weltmarktanteile gewonnen. Die technologischen Vorsprünge sicherten ihnen höhere Ausbeuten und damit Wettbewerbsvorteile gegenüber ihren Konkurrenten. Die geringe Gewinnspanne bei Standardbauelementen und das Erstarken des Yen führte in den letzten Jahren dazu, daß sich die japanischen Unter-

nehmen auf die Produktion höherwertiger Bauelemente, wie z.B. kundenspezifische Logikschaltkreise, konzentrieren mußten. Auch hier liegt ein Grund für die wachsende Anzahl strategischer Allianzen mit amerikanischen Partnern, deren Stärken im Bereich des Schaltungsentwurfs liegen.

Die wachsende Bedeutung der südostasiatischen Länder in der Halbleiterindustrie ist auf eine starke Konzentration auf die Herstellung von DRAM-Speicherbauelemente insbesondere von Süd-Korea zurückzuführen. Bedingt durch die starke industriepolitische Unterstützung konnte dort in den Jahren von 1985 bis 1992 ein Umsatzwachstum von 450% auf 3,3 Mrd. \$ erreicht werden.

Im Vergleich zu diesen Regionen hat die europäische Halbleiterindustrie ein relativ schwaches Produktionspotential. Die Umsätze der Halbleiterindustrie in Europa betragen 20% des Weltmarktes und stehen damit in einem bemerkenswerten Gegensatz zu ihrem Anteil von 9% an der weltweiten Halbleiterproduktion, d.h. mehr als die Hälfte der Halbleiterbauelemente muß nach Europa importiert werden. Die Stärken der europäischen Halbleiterhersteller liegen in der Diversifizierung der Produkte in den Bereichen der Telekommunikations-, Multimedia- und Konsumanwendungen.

2.1.3.4 Strategische Allianzen

Seit Mitte der achtziger Jahre lassen sich branchenübergreifend vielfältige internationale Kooperationen zwischen Unternehmen beobachten, die als Antwort auf die tiefgreifende Veränderung der Wettbewerbsbedingungen entstanden sind. Die Globalisierung des Wettbewerbs durch den Abbau der Handelsschranken und durch die Öffnung der Märkte hat insbesondere die Halbleiterunternehmen einem erhöhtem Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Strategische Allianzen stellen ein unternehmerisches Instrument dar, um diese veränderten Rahmenbedingungen des globalen Wettbewerbs zu bewältigen.⁴⁸

Während durch diesen übergreifenden Wandel des weltweiten Wettbewerbs nahezu jede Branche betroffen ist, gibt es insbesondere bei Hochtechnologien, so auch bei der Halbleitertechnik, weitere Gründe für die Bildung Strategischer Allianzen.

Die kurzen Entwicklungs- und Produktlebenszyklen von Halbleiterbauelementen verbunden mit den steigenden F&E-Aufwendungen für neue Produkte führen dazu, daß zum Teil selbst große Unternehmen Kosten und Risiken dafür nicht mehr alleine übernehmen können. F&E wird damit zum größten Fixkostenblock, insbesondere dann, wenn, bedingt durch die kurze Produktlebensdauer, mehrere Produktgenerationen gleichzeitig in der Entwicklung sind. Um sich diese Lasten zu teilen, schließen sich Halbleiterhersteller zu sog. Forschungsallianzen zusammen, die mit dem Ziel der

⁴⁸ Basedow, J., Jung, C.: *Strategische Allianzen*. München 1993. S. 4ff.

gemeinsamen Entwicklung eines Produktes gebildet werden. Beispielsweise wurden 1992 gleich drei große Allianzen zur Entwicklung eines 256MBit DRAM-Bausteins zwischen SIEMENS, IBM und TOSHIBA, zwischen AT&T und NEC sowie zwischen HITACHI und TEXAS INSTRUMENTS geschlossen.⁴⁹

Die Verschiebung der Kostenstruktur von variablen zu den fixen Kosten machen hohe Absatzvolumina und volle Kapazitätsauslastung notwendig, um Stückkosten zu senken. Aufgrund der schnellen Verbreitung neuer Technologien kann nur noch derjenige Hersteller Gewinne erzielen, der vor der Konkurrenz Kostensenkungspotentiale (Lernkurveneffekte) ausnutzt.⁵⁰ Diese führte in der Vergangenheit bei den Speicherchips dazu, daß jeweils nur die ersten Anbieter einer Generation in der Lage waren, wesentliche Gewinne zu erwirtschaften. Unter diesen Wettbewerbsbedingungen schließen sich Halbleiterunternehmen für Produktion und Vermarktung zu Volumenallianzen zusammen, um Größenvorteile zu schaffen. Diese liegen einerseits in einer schnellen Steigerung von Fertigung und Absatz und andererseits in der Ausnutzung von Lernkurveneffekte bei großen produzierten Stückzahlen.⁵¹

Trotz weit fortgeschrittener Globalisierung ist insbesondere bei Hochtechnologien der freie Zugang zu regionalen Märkten oftmals eingeschränkt. Aus nationalen Interessen werden zum Schutz eigener Hochtechnologie-Industrie industriepolitische Maßnahmen durchgesetzt. So regulieren beispielsweise Handelsabkommen zwischen Europa, USA und den asiatischen Staaten den Austausch von Halbleiterprodukten. Markterschließungs- bzw. Vertriebsallianzen stellen Möglichkeiten dar, nationale Hemmnisse zu umgehen und durch Joint-Venture-Produktionen oder OEM⁵²-Fertigung die Marktzugangsbarrieren zu überwinden. Auch die gemeinsame Nutzung von Distributionsnetzen mit dem Ziel, die Produktpaletten komplementär zu ergänzen und die Geschäftstätigkeit auszuweiten, führen zur Bildung strategischer Allianzen.

Ein weiterer schwer faßbarer Effekt solcher Kooperationen besteht in Lernprozessen, die sich aus einer engen Zusammenarbeit - insbesondere bei gemeinsamen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben - mit den Partnern ergeben. Die gemeinsame Arbeit von Angehörigen aller beteiligten Unternehmen offenbart und kompensiert Stärken und Schwächen der Partner. Vor allem westliche Halbleiterunternehmen versprechen sich von der Zusammenarbeit mit japanischen Firmen Einblicke in deren

⁴⁹ Hilpert, H.G.: Strategische Allianzen in der Halbleiterindustrie. ifo Dresden Bericht. Dresden 5/1994. S. 30.

⁵⁰ Basedow, J., Jung, C.: Strategische Allianzen. München 1993; S. 6.

⁵¹ Hilpert, H.G.: Strategische Allianzen in der Halbleiterindustrie. ifo Dresden Bericht. Dresden 5/1994. S. 33.

⁵² OEM: Original Equipment Manufacturer.

fortschrittliche Prozeßtechnologie⁵³ und -organisation. Japanische Unternehmen erwarten sich hingegen Kompensation bei System-Knowhow und im Software-Bereich.⁵⁴

Für die Halbleiterunternehmen sind strategische Allianzen mittlerweile ein bedeutender Wettbewerbsfaktor. Im Jahr 1993 gab es ca. 700 globale Allianzen zwischen Halbleiterunternehmen, und jährlich wächst diese Zahl um ca. 100 an.⁵⁵

Obwohl solche Zusammenschlüsse von konkurrierenden Herstellern gleichartiger Produkte kartellrechtlich bedenklich sind, hat sich die Befürchtung der Monopolisierung durch die Bildung von Allianzen auf den Halbleitermärkten in der Vergangenheit nicht bestätigt. Vor allem in den neuen Wachstumsregionen in Südostasien entstehen neue DRAM-Erstanbieter, obwohl Anfangsinvestitionen von mehr als 1Mrd. \$ zum Aufbau einer Fabrikationsstätte erforderlich sind.⁵⁶

2.1.3.5 Forschung und Entwicklung

Der hohe Anteil an Forschung und Entwicklung in der Halbleitertechnik findet unter den Hochtechnologiebranchen nur bei wenigen anderen hochinnovativen Industriefeldern, z.B. der Pharmazie, seine Entsprechung. Die Koordinierung und Ausrichtung der Forschungsziele von Unternehmen und staatlichen Forschungsinstituten ist einzigartig. Sowohl der gleichbleibende schnelle Anstieg der Leistungsfähigkeit der Bauelemente als auch (mit einigen Einschränkungen) das hohe wirtschaftliche Wachstum können als Indiz für diese Zielorientierung der Forschungsanstrengungen gewertet werden. Das Resultat ist die Entstehung einer dominierenden Treiberfunktion der Speichertechnologie.

Die Ursachen einer solchen Entwicklung sind unterschiedlicher Natur und waren zu Beginn der Speicherentwicklung andere als heute. Da während der Entstehungszeit der Integrierten Schaltkreise noch keine technologischen Grenzen die Weiterentwicklung störten, reichte die wirtschaftliche Attraktivität des Halbleitermarktes und die hohe Konkurrenz insbesondere auf dem Speichersektor aus, um einen schnellen Fortschritt zu initiieren. Es entstand ein kontinuierliches Wachstum (Moore'sches Gesetz), an das sich nicht nur die Hersteller von Halbleiterbauelementen anpaßten,

⁵³ Produktionsprozesse in den Halbleiterfabriken werden zu einem großen Anteil durch empirische Vorgehensweisen optimiert, d.h. Fertigungsgeräteparameter werden teilweise iterativ auf maximale Ausbeute getrimmt.

⁵⁴ Hilpert, H.G.: Strategische Allianzen in der Halbleiterindustrie. ifo Dresden Bericht. Dresden 5/1994. S. 33.

⁵⁵ Hilpert, H.G.: Strategische Allianzen in der Halbleiterindustrie. ifo Dresden Bericht. Dresden 5/1994. S. 30.

⁵⁶ Manck, O.: Leistungsbeschreibung der Mikroelektronik. Berlin 1994.

sondern auch die nach- und vorgelagerte Industrie, d.h. die Anwenderindustrie, wie Konsumelektronik, Computertechnik, ebenso die Fertigungsgeräte-, Material- und Systemhersteller für die Halbleiterproduktionen. Die nach und nach steigenden Schwierigkeiten, die technologischen Hürden zu überwinden, erforderten einen immer größeren Aufwand für F&E. Durch die beginnenden Förderungen als Maßnahme der staatlichen Industriepolitik von Japan, USA und Europa Mitte der achtziger Jahre konnte diese Kostenlast der Unternehmen teilweise externalisiert werden. Zu Beginn der neunziger Jahre fanden strategische F&E-Allianzen in der Halbleiterindustrie Einzug, wodurch wiederum der drohenden Kostenexplosion bei der Entwicklung neuer Bauelementgenerationen entgegengetreten werden konnte. Die Beständigkeit der Weiterentwicklung hat sich bis heute fortgesetzt, wenngleich künftig eine Abschwächung der Wachstumsgeschwindigkeit prognostiziert wird.

Jahr der ersten Auslieferung	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Strukturfeinheit (μm)	0,35	0,25	0,18	0,13	0,10	0,07
Speicher Bits/Chip	64M	256M	1G	4G	16G	64G
Preis/ Bit (millicent)	0,017	0,007	0,003	0,001	0,0005	0,0002
Logikchips (Mikroprozessoren/ ASICs)	4M/2M	7M/4M	13M/7M	25M/12M	50M/25M	90M/40M
Transistoren/ cm^2 Preis/Transistor (millicent)	1/0,3	0,5/0,1	0,2/0,05	0,1/0,03	0,05/0,02	0,02/0,01
Chipfrequenz (Mikroprozessoren)	150	200	300	400	500	625
Chipgröße (mm^2)						
DRAM	190	280	420	640	960	1400
Mikroprozessor	250	300	360	430	520	620
ASIC	450	660	750	900	1100	1400
max. Verdrahtungsebenen	4-5	5	5-6	6	6-7	7-8
Versorgungsspannung (V)	3,3	2,5	1,8	1,5	1,2	0,9
Leistungsaufnahme (W)	80	100	120	140	160	180

Tabelle 2.1-11

SIA Roadmap 1994

Quelle: Semiconductor Industry Association: The National Technology Roadmap for Semiconductors.

Zur Koordination der weiteren technologischen Entwicklung in den USA zwischen den Halbleiterunternehmen, Fertigungsgeräte- und Materialherstellern, staatlichen

und universitären Einrichtungen sowie Industriekonsortien hat die SIA (Semiconductor Industry Association) einen Zeitplan („Technology Roadmap“) mit Richtwerten für die technologische Leistungsfähigkeit für die nächsten 15 Jahre der Halbleitertechnologie erstellt. Damit wird versucht, eine koordinierte Forschungszusammenarbeit durch eine gemeinsam vorgegebene Zielsetzung zu erreichen. Diese Richtlinien sind umfassend und legen nicht nur Rahmendaten für die physikalischen und elektrischen Parameter künftiger Generationen Integrierter Schaltkreise fest. Sie sehen auch konkrete Wege für Technologie- und Fertigungsgeräteinnovationen kurz- und längerfristiger Zeiträume vor, um diese Ziele zu erreichen.

Aus den Ursprüngen zumeist ungerichteter Unternehmensforschung entwickelte sich mit der Entstehung der ersten integrierten Halbleiterspeicher, ca. 1970, ein Schwerpunkt der Halbleiterforschung. Die technologische Führungsfunktion hinsichtlich permanenter Miniaturisierung hat die Halbleiterspeicherindustrie bis heute, zum großen Teil aus wirtschaftlichen Gründen, nicht abgegeben. Sie beeinflusst daher essentiell die Entwicklung der Halbleitertechnologie. Durch die zunehmende Einflußnahme staatlicher Förderprogramme wurde die Tendenz der technologischen Fokussierung auf die Speichertechnologie verstärkt. Auch die „Technology Roadmap“ der SIA greift die Generationszyklen der Speicherbausteine auf und orientiert sich an deren technologischen Anforderungen. Die hohe Konzentration der F&E in der Halbleitertechnik auf Belange der Speichertechnologie hat zu einer „Verarmung der Vielfalt der Technologie“ aber auch zu deren Wachstumsgeschwindigkeit und Leistungsfähigkeit geführt.

2.1.4 Halbleitertechnik als Basistechnologie für Mikrosysteme

Die Siliziumplanartechnologie ist das Fundament einer universellen Produktionstechnik für die *Mikrostrukturtechniken*. Ihre Verfahrenstechnik macht sie zur *Basistechnologie* für vielfältige Anwendungen und ermöglicht letztenendes eine *Mikrosystemtechnik*, die auf den Grundlagen der in der Halbleitertechnologie benutzten Einzeltechnologien beruht.

2.1.4.1 Mikrotechniken und Mikrostrukturtechnik

Die Ausweitung der Miniaturisierungstechniken im Umfeld der Halbleitertechnik machte die Einführung eines neuen Begriffs notwendig, der in allgemeinerer Weise die Technologie zum Bearbeiten und Erzeugen von Strukturen kleiner Dimensionen bezeichnet. Mikrotechnik ist ein Sammelbegriff, hinter dem sich die methodenorientierten Verfahrenstechnologien zum miniaturisierten Aufbau von Funktionsgruppen

verbergen. Darunter fallen neben der Halbleitertechnik und deren Einzeltechnologien, die anisotrope Ätztechnik, die Verbindungstechnik und die LiGA-Technik, sowie alle sonstigen möglichen Methoden, die zur Bearbeitung von Strukturen im Mikrometerbereich erforderlich sind.

Als Mikrostrukturtechniken werden im folgenden die Technologien entsprechend der Funktionszugehörigkeit (Elektronik, Mechanik, Optik und Fluidik) der Baugruppe bezeichnet.

Die wichtigsten Mikrostrukturtechniken sind:

- Mikroelektronik,
- Mikromechanik,
- Mikrofluidik sowie
- Mikrooptik.

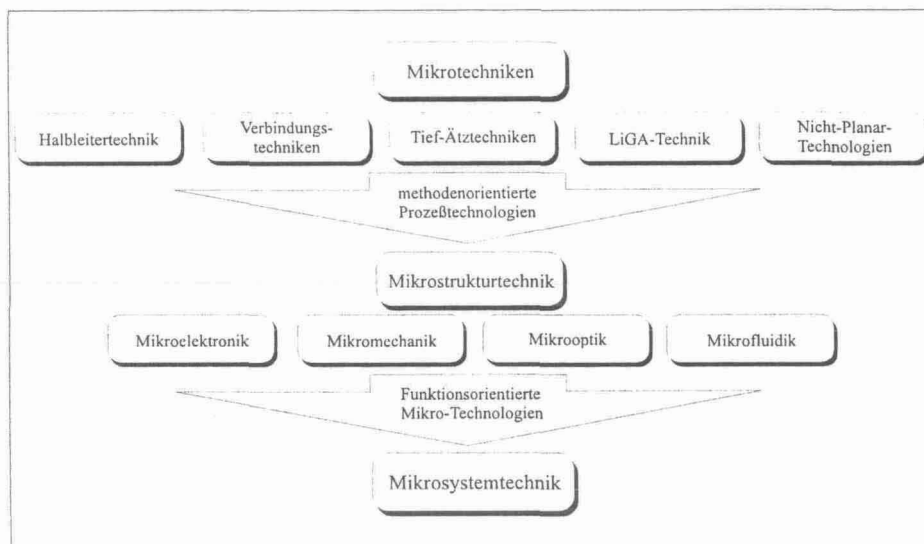


Abbildung 2.1-20

Einordnung der Mikrotechnik und Mikrostrukturtechnik

Die Halbleitertechnik stellt heute die gemeinsame methodologische und fertigungstechnische Grundlage der Mikrostrukturtechniken dar. Die hochentwickelten Verfahrenstechnologien, insbesondere die Lithographie und die selektive Ätztechnik, sind die Basis aller Mikrostrukturierungsverfahren. Ihre Bedeutung für die Produktions-

technik spiegelt sich im Umfang der Einsetzbarkeit in modernen Fertigungssystemen wieder.

2.1.4.2 Anwendungsfelder von Mikrostrukturtechniken

Die Mikroelektronik befindet sich sowohl technologisch als auch anwendungsbezogen im Brennpunkt der Integration von nichtelektronischen Komponenten. Die vergleichsweise langsame Entwicklung der Peripheriebausteine in den vergangenen drei Jahrzehnten hat einige Vorteile der Mikroelektronik, nämlich Platzbedarf, Gewicht und Kosten, durch die aufwendige externe Ausstattung abgeschwächt. Die Anpassung der Schaltungperipherie, der Sensorik und Aktuatorik, hinsichtlich ihrer Größe, ihrer Herstellungsverfahren und ihrer elektrischen Kopplung an die integrierten Schaltungen, ist das größte Einsatzgebiet der Mikrostrukturtechniken.

Die Sensorik, d.h. die Erfassung und Aufbereitung nichtelektrischer Größen für die Mikroelektronik, gehört seit ihren Anfängen zu den wichtigsten schaltungsperipher wahrgenommenen Funktionen. Sie hat ihre Bedeutung durch die großen Fortschritte in der Automatisierungstechnik sowie in der Meß- und Regelungstechnik erlangt. Das bedeutendste Anwendungsgebiet der Mikrostrukturtechniken stellt daher die Mikrosensorik dar. Darunter versteht man die Realisierung integriert gefertigter Sensoren unter Verwendung von Mikrostrukturtechniken. Fast ebenso bedeutend, jedoch nur in wenigen Fällen in praktischen Anwendungen zu finden, ist die Mikroaktuatorik. Auch die Feinwerktechnik profitiert u.U. von den Möglichkeiten der Mikrotechnik.

2.1.4.2.1 Mikrosensorik

Mittlerweile können die meisten Sensorkonzepte herkömmlicher Aufnehmer auch durch integrierte Verfahren umgesetzt werden. Mit Hilfe von geeigneten mikromechanischen oder mikrooptischen Strukturen und Funktionsprinzipien lassen sich Sensoren beispielsweise zur Druck-, Schwingungs-, Beschleunigungs-, Kraft-, Fluß-, Strömungsmessung usw. herstellen.

Dabei werden die verschiedensten physikalischen Wirkprinzipien genutzt. Gemeinsam ist vielen Anwendungen, daß mechanische Verformungen in elektrisch meßbare Widerstands- oder Kapazitätsänderungen überführt werden. Da das primäre Ausgangssignal des Sensors zunächst ein analoges elektrisches Signal ist, ist es nicht unmittelbar für den Einsatz in digitalen Systemen geeignet, vielmehr muß es durch einen geeigneten Analog-Digital-Wandler umgewandelt werden. Häufig entstehen Wech-

selspannungssignale, die durch mechanisch schwingungsfähige Strukturen erzeugt und mittels eines elektronischen Umsetzers zu digitalen Signalen verarbeitet werden. Die am häufigsten genutzten physikalischen Effekte, die zur Aufnahme der nicht-elektrischen Meßgröße verwendet werden, beruhen

- auf Widerstandsänderungen durch Wärmeeinwirkung, Ladungsträgerbeeinflussung (z.B. ähnlich der Gateladung beim Feldeffekttransistor) oder mechanische Einflüsse, wie Kompression, Dilatation und Torsion, bzw. auf dem Piezoresistiven Effekt oder
- auf kapazitiven Änderungen durch Verformung von Mikrostrukturen (z.B. Änderung vom Plattenabstand eines Kondensators bei Beschleunigungssensoren oder Drucksensoren).

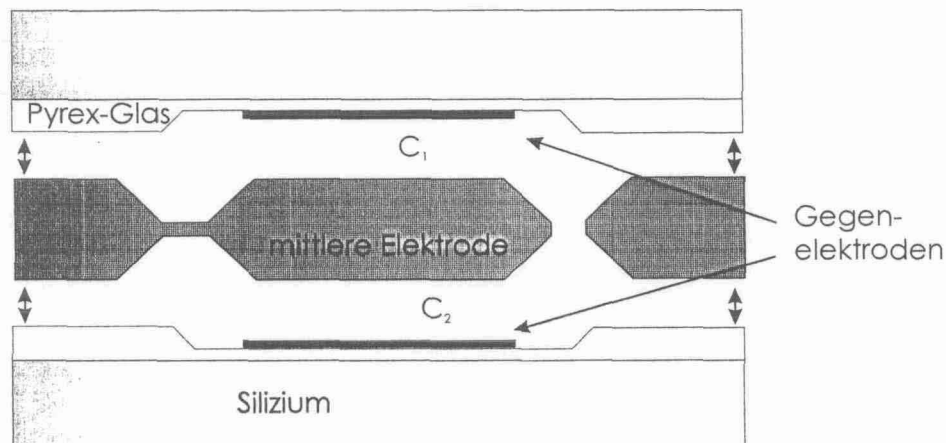


Abbildung 2.1-21

Querschnitt durch einen kapazitiven Beschleunigungssensor
 Quelle: J. Marek; „Sensoren und Aktoren in Silizium-Mikromechanik“; Sonderdruck aus Themenband „Halbleiter in Forschung und Technik“; Ehningen 1991; S. 120.

Waren konventionelle Meßaufnehmer früher für sensible Anwendungsfelder zu störanfällig, werden diese Bereiche jetzt zunehmend durch integrierte Sensoren erschlossen. Am Beispiel des Airbag-Bausteins für PKW's wird dies deutlich. Da Fehlfunktionen des Sensors zu folgeträchtigen Vorfällen führen können, ist seine

erhöhte Zuverlässigkeit für die Anwendung in der Automobilindustrie unumgänglich. Vorgaben der Automobilhersteller für die Ausfallwahrscheinlichkeit von 1ppm sind die Regel.

Neben Wirkprinzipien, die sich in Widerstands- oder Kapazitätsänderungen, also elektrischen Größen, niederschlagen, ist es auch möglich, optische Effekte zur Messung von Größen heranzuziehen.

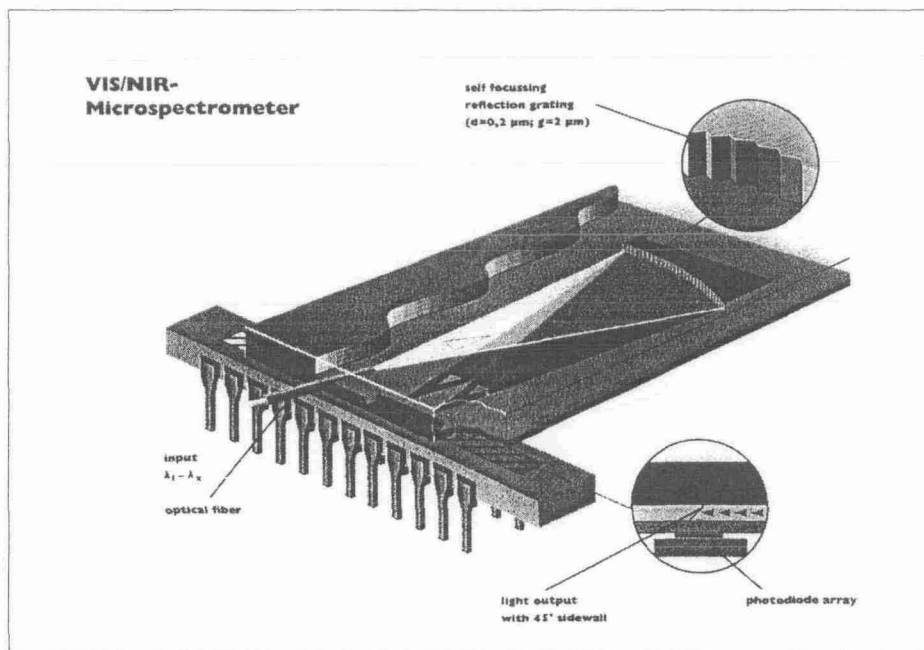


Abbildung 2.1-22

Skizze eines Mikrospektrometers hergestellt durch LiGA-Technik
Quelle: Firmenprospekt von Fa. MicroParts, Dortmund 1996.

Diese sind je nach Anwendungsfeld den elektrischen Aufnehmern überlegen, insbesondere ist die Unempfindlichkeit gegenüber elektrischen Feldern ein großer Vorteil. Wichtige optische Effekte, die sich zur Aufnahme von Meßgrößen eignen, sind:

- Feststellung von Entfernungsänderung durch Interferenz,
- Auslenkung des Lichtstrahls aus der optischen Achse,

- Sagnac-Effekt⁵⁷ (Laser-Doppler-Anemometer),
- Elektro-optischer Effekt (Phasendrehung im elektrischen Feld) sowie der
- Magneto-optische Effekt (Phasendrehung im magnetischen Feld).

Die Integration solcher Sensoren ist vergleichbar mit der Integration elektronischer Bauelemente. Lediglich der Grad der Miniaturisierung ist durch die speziellen Eigenschaften optischer Komponenten eingeschränkt.

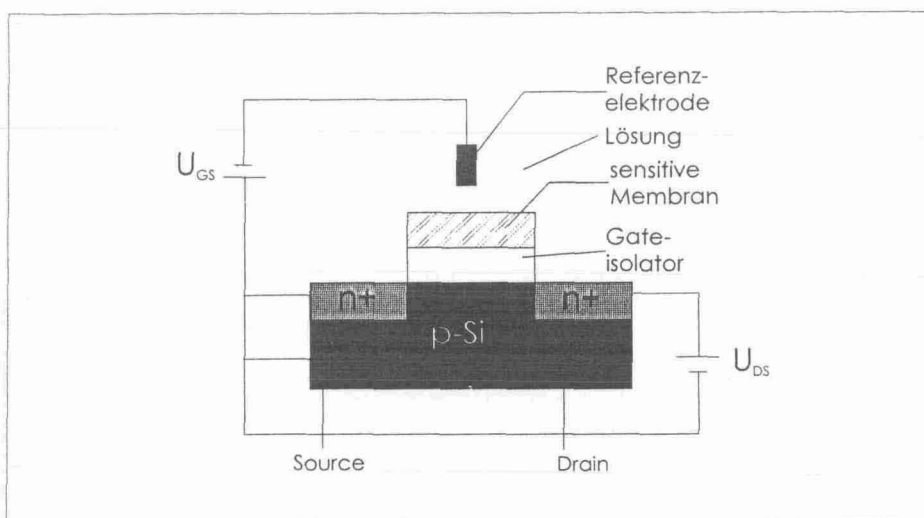


Abbildung 2.1-23

Prinzipskizze eines Sensors für chemische Stoffe

Zu den neueren Entwicklungen gehört die Integration von chemischen und biologischen Sensoren. Diese funktionieren häufig nach dem Prinzip der Leitfähigkeitsänderung (z.B. nach Ionenleitung) oder Temperaturänderung bei chemischen Reaktionen. Häufig sind für die Funktion solcher Sensoren sehr hohe Temperaturen (ca. 1000°C) eines katalytischen Stoffes (oftmals Metalloxide) notwendig, um eine Reaktion der zu detektierenden Moleküle zu verursachen. Die Integration dieser Sensortechniken ist die miniaturisierte Übertragung des herkömmlichen Aufbaus in Planartechniken. Sie ermöglicht jedoch die Detektion weitaus geringerer Stoffmengen, da Temperatur-

⁵⁷ In einer optischen Schleife haben zwei gegenläufige Lichtwellen verschiedene Umlaufzeiten, wenn die Schleife selbst rotiert.

änderungen aufgrund der geringen Wärmekapazität des Katalysators, oder Widerstandsänderung aufgrund der geometrischen Abmessungen präziser festgestellt werden können.

2.1.4.2.2 Mikroaktuatorik

Während Sensoren nichtelektrische Größen in elektrische Signale umwandeln, setzt ein Aktuator elektrische Signale in der Regel in mechanische Arbeit um⁵⁸. Durch die Mikrotechniken ist es möglich, diese Aktuatorelemente zu Mikroaktuatoren zu integrieren. Sie erzeugen Stellbewegung meist aus einer Kraft bzw. Energie, die unterschiedlichen physikalischen Prinzipien entstammen:

- piezoelektrisch (mechanische Formänderung durch elektrisches Feld),
- elektrostatisch (elektrische Kraftwirkung auf Ladungen),
- elektromagnetisch (Kraftwirkung auf bewegte elektrische Ladungen im Magnetfeld),
- thermomechanisch (Ausnutzung unterschiedlicher Wärmeausdehnungen bei verschiedenen Stoffen, Bi-Metall),
- thermopneumatisch (Ausnutzen der Wärmeausdehnung von Gasen zur Erzeugung von Drücken) sowie
- Shape-Memory Alloys (Gedächtnismetalle, z.B. TiNi-Legierungen mit Formgedächtnis nehmen oberhalb einer bestimmten Temperatur ihre ursprüngliche Form wieder an.).

Im Vergleich zu den Makroaktuatoren⁵⁹ finden Mikroaktuatoren nur sehr langsam den Weg in die Anwendungsfelder. Der Hauptgrund liegt darin, daß sich mit der Miniaturisierung der Aktuatoren auch die Größe der mechanischen Ausgangssignale verringert hat, das Endsystem jedoch oftmals große Stellwege bzw. -kräfte benötigt. So befindet sich die Mikroaktuatorik noch in einem frühen Entwicklungsstadium.

⁵⁸ Eine globalere Definition ist bei H.Janocha, „Aktoren“, Saarbrücken 1992, S. 1, angegeben. „Aus globaler Sicht sind Aktoren (engl. actuator) die Verbindungsglieder zwischen dem informationsverarbeitenden Teil von elektrischen Steuerungen und einem technischen oder nichttechnischen, z.B. biologischen, Prozeß. Mit Hilfe von Aktoren lassen sich Energieflüsse oder Massen/Volumenströme zielgerichtet einstellen. Ihre Ausgangsgröße ist eine Energie oder Leistung, die sehr häufig als mechanisches Arbeitsvermögen „Kraft mal Weg“ zur Verfügung steht.“ Die hier gewählte Schreibweise schließt sich der englischen, „actuator“, an.

⁵⁹ „Zu den Makroaktoren zählen z.B. elektronische Energiesteller, wie Leistungsdioden und -transistoren, elektromagnetische Aktoren (Motoren), fluidtechnische Aktoren (Ventile, fluidtechnische Motoren), Bi-Metalle, Memory-Metalle u.a.“; ebenda.

Nur in wenigen Fällen konnten integrierte Mikroaktuatoren industrielle Anwendung finden.

Als erfolgreiches Beispiel dient die Ink-Jet-Technologie, mit der die Düsen im Druckkopf eines Tintenstrahldruckers hergestellt werden. Eine hohe Druckqualität wird durch die Qualität und die definierte Anordnung der Düsenaustrittsöffnungen erreicht. Mittels Maskentechnik und anisotroper Ätztechnik läßt sich den hohen Qualitätsanforderungen gerecht werden.

Die Einsatzgebiete der Mikroaktuatoren sind durch die notwendigen Stellgrößen für das Zielsystem festgelegt. Überall dort, wo die Dimension der Stellgröße eine geringe Rolle spielt bzw. sich durch die Systemintegration und die Herabdimensionierung der Stellgrößen eine wesentliche Verbesserung der Systemfunktionalität erreichen läßt, sind die Einsatzfelder der Mikroaktuatorik zu suchen.

Viele Anwendungsvorschläge für Mikroaktuatoren konzentrieren sich auf die Integration von weit verbreiteten Stellgeberprinzipien. Der Versuch, die im makroskopischen Bereich bekannten Aktuatorprinzipien zu realisieren, führte zur Herstellung von Mikromotoren. Die Funktionsprinzipien sind vielfältig. Besonders geeignet hierfür ist die Ausnutzung des elektrostatischen Effekts, der bei kleinen Dimensionen besondere Wirksamkeit erlangt und technologisch einfacher zu realisieren ist, da man auf die Konstruktion von Mikrospulen verzichten kann. Die Integration von Mikrospulen ist z.Z. noch sehr aufwendig. Eine große Bedeutung kommt der *Mikroaktuatorik* in solchen Bereichen zu, wo mit ihr Wirkprinzipien realisiert werden können, die im makroskopischen Bereich nicht sinnvoll oder mit konventionellen Herstellungsverfahren nicht zu erreichen sind. Dazu gehört beispielsweise die Herstellung von digitalen Displays. Eine mögliche Wirkungsweise besteht in der Verwendung zahlreicher in einem Feld angeordneter kippbarer Spiegel, die durch elektrostatische Kräfte bewegt werden können. Je nach Kippneigung verändert sich die reflektierte Lichtintensität. Das Feld der beweglichen Spiegelemente läßt sich mit den zuvor beschriebenen Mikrotechniken, z.B. der anisotropen Ätztechnik des Siliziums, herstellen. Naturgemäß sind die Probleme der Mikroaktuatorik hinsichtlich ihrer Anwendung in Systemen komplizierter als die der Sensorik. Zur Einwirkung auf einen makroskopischen Prozeß oder auf die Umwelt müssen monolithisch integrierbare Kräfteerzeugungsprinzipien gefunden werden, deren Stellgrößen für die Anwendungszwecke ausreichend sind.

2.1.4.2.3 *Feinmechanische Strukturen*

Die Notwendigkeit der Herstellung von sehr kleinen Strukturen oder von Strukturen sehr hoher Präzision wurde vergleichsweise früh erkannt. Bereits in den fünfziger

Jahren wurden Mikrobohrverfahren⁶⁰ eingesetzt, z.B. um Düsen für die Treibstoffeinspritzung bei Otto-Motoren zu erzeugen, die die Verbrennungsvorgänge im Zylinder verbesserten⁶¹.

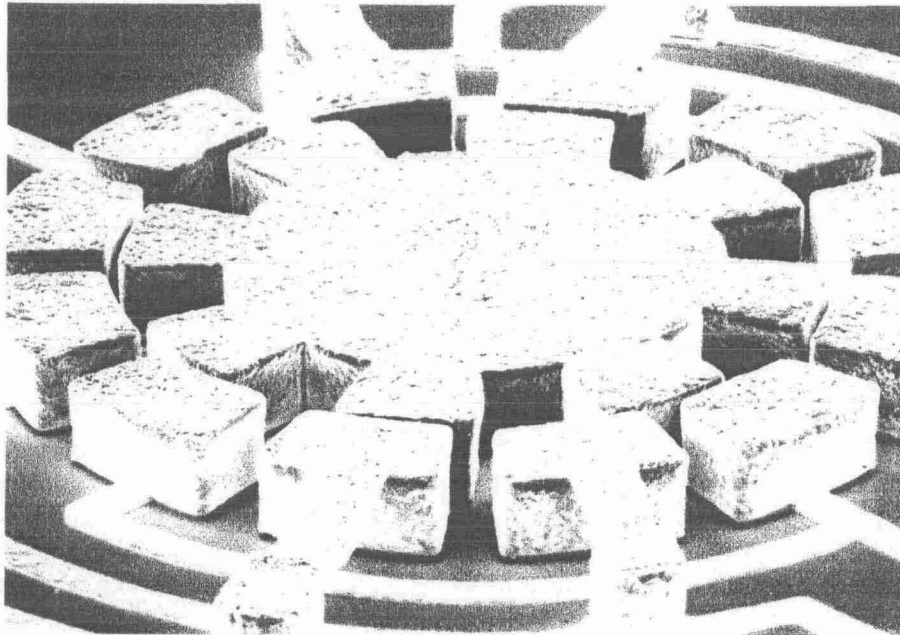


Abbildung 2.1-24

Mikromotor

Quelle: Engelmann, G.: Berlin 1993. In: H.-G. Wagemann; Halbleiterbauelemente. Jahrbuch der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Berlin 1994. S. 31.

⁶⁰ Unter Mikrobohren versteht man mechanische Bohrverfahren, mit denen Bohrungen unter $50\mu\text{m}$ hergestellt werden können. Frazier, B., Friedrich, C., Warrington, R. O.: The Miniaturization Technologies: Past, Present, and Future. IECON '94: 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. New York 1994. S. 1460.

⁶¹ Frazier, B., Friedrich, C., Warrington, R. O.: The Miniaturization Technologies: Past, Present, and Future. IECON '94: 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. New York 1994. S. 1460.

Seitdem wurden weitere aus dem makroskopischen Bereich bekannten spanenden Verfahren zur Anwendung bei Mikrobearbeitungen modifiziert. Mikrofräsen, Laserbearbeitung, Funkenerosionsverfahren (Micro-electro-discharge-machining) usw. eignen sich zur Erzeugung kleiner Strukturierungen und werden teilweise in der industriellen Fertigung eingesetzt. Im allgemeinen ist die Leistungsfähigkeit solcher Verfahren hinsichtlich ihrer Präzision begrenzt.

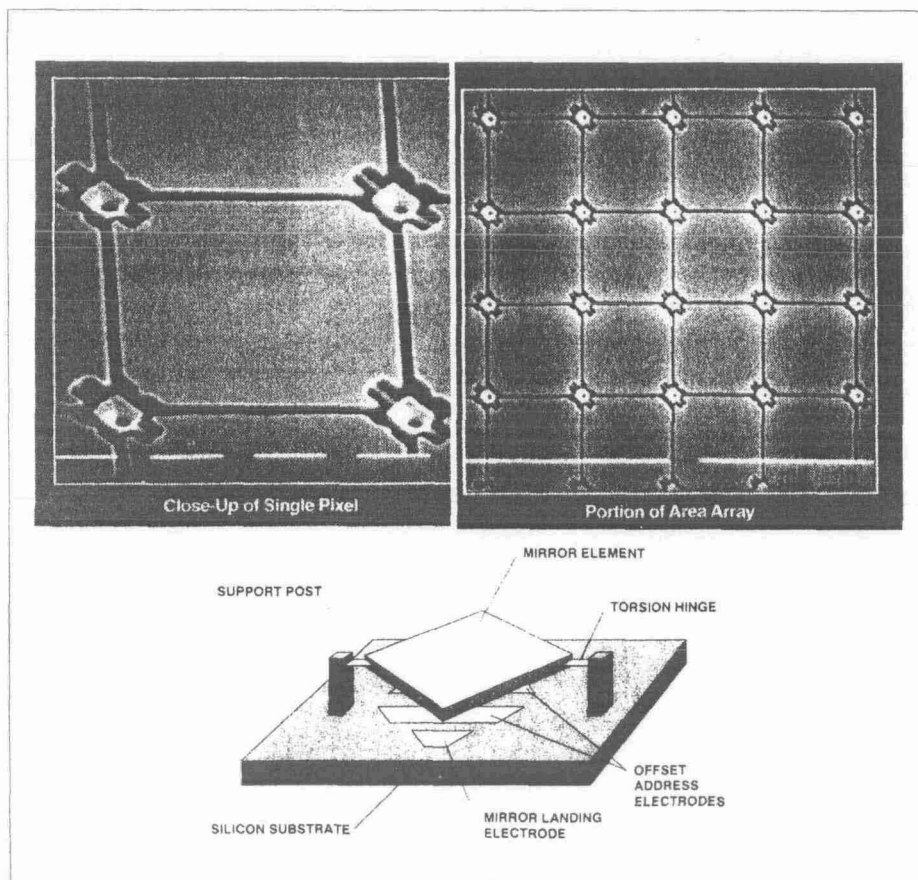


Abbildung 2.1-25

Aufbau eines DMD-Displays (Deformable Mirror Device)

Quelle: Markt & Technik Nr. 39; 1993; S. 28.

Lediglich einige Schleiftechniken (Läppen, Polieren usw.) erreichen die aus der VLSI⁶²-Mikroelektronik bekannten Dimensionen. Auch scheitert die Möglichkeit der Herstellung komplexerer kleindimensionierter Baugruppen an der mangelnden Präzision und Reproduzierbarkeit solcher Fertigungsverfahren.

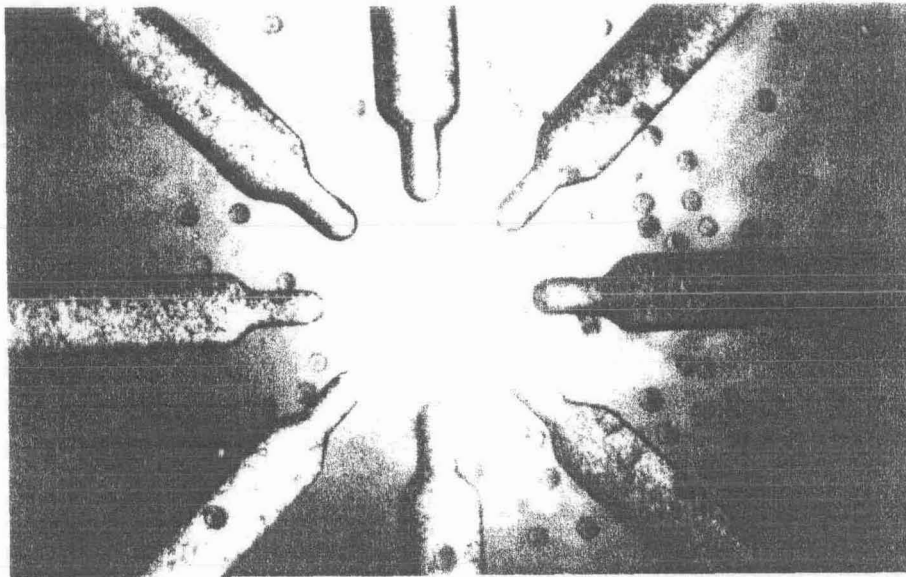


Abbildung 2.1-26

Draufsicht auf einen Feldkäfig mit einzelnen biologischen Zellen.

Quelle: Fuhr G.

Insbesondere die Montage miniaturisierter Produkte stellt ein großes Problem dar, da Mikrostrukturen mit Abmessungen kleiner als $500\mu\text{m}$ nur mit Hilfsmitteln für den Menschen handhabbar sind.⁶³ Mikroelektronik bekannten Dimensionen. Auch scheitert die Möglichkeit der Herstellung komplexerer kleindimensionierter Baugruppen an der mangelnden Präzision und Reproduzierbarkeit solcher Fertigungsverfahren. Insbesondere die Montage miniaturisierter Produkte stellt ein großes Problem dar, da

⁶² VLSI: Very Large Scale Integration.

⁶³ Leßmöllmann, C., Feiertag, R.: Handhabung und Qualitätssicherung bei Mikrostrukturen. Tendenzen in der Entwicklung, Konstruktion und Anwendung der Feinwerktechnik und Mikrotechnik. Ilmenau 1993, S. 274.

Mikrostrukturen mit Abmessungen kleiner als $500\ \mu\text{m}$ nur mit Hilfsmitteln für den Menschen handhabbar sind.⁶⁴

Die konventionelle Feinwerktechnik nutzt zumeist spanabnehmende oder abtragende Verfahren zur Strukturierung kleiner Bauteile. Die Grenzen dieser Bearbeitungsverfahren liegen hinsichtlich Strukturfeinheit und Genauigkeit bei etwa $50\ \mu\text{m}$. Das Potential der planaren Mikrotechniken, kleinere bzw. präzisere Strukturen zu formen, stellt diesbezüglich eine Ergänzung zu diesen Techniken dar. Lithographie, Ätz- und Schichttechniken stehen hierbei im Mittelpunkt. Abbildung 2.1-27 zeigt auf einen Chip mit LiGA-Technik aufgebraute Strukturen, die der besseren Wärmeabfuhr des elektronischen Schaltkreises dienen sollen.

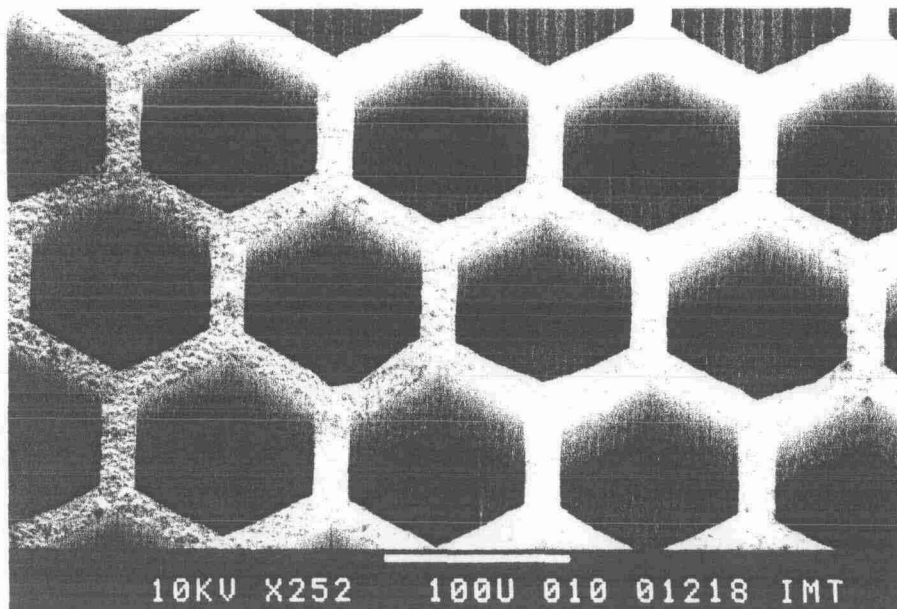


Abbildung 2.1-27

Aufnahme von mikroelektronischen Schaltungen eines prozessierten Wafers, auf den Mikrostrukturen aus Nickel abgeformt wurden.

Quelle: Michel, A.: Abformung von Mikrostrukturen auf prozessierten Wafers. Karlsruhe 1993. S. 73.

⁶⁴ Leßmöllmann, C., Feiertag, R.: Handhabung und Qualitätssicherung bei Mikrostrukturen. Tendenzen in der Entwicklung, Konstruktion und Anwendung der Feinwerktechnik und Mikrotechnik. Ilmenau 1993. S. 274.

Die planaren Fertigungstechniken eignen sich mit gewissen Einschränkungen auch zur Herstellung von Mikroinstrumenten, wie sie in der Medizin benötigt werden. Folgende Abbildung zeigt eine Mikrofaßzange, die durch das Verschieben eines Schlauches (rechter oberer Rand) betätigt werden kann. Die Herstellung von solchen miniaturisierten Instrumenten ermöglicht minimalinvasive, medizinische Eingriffe.

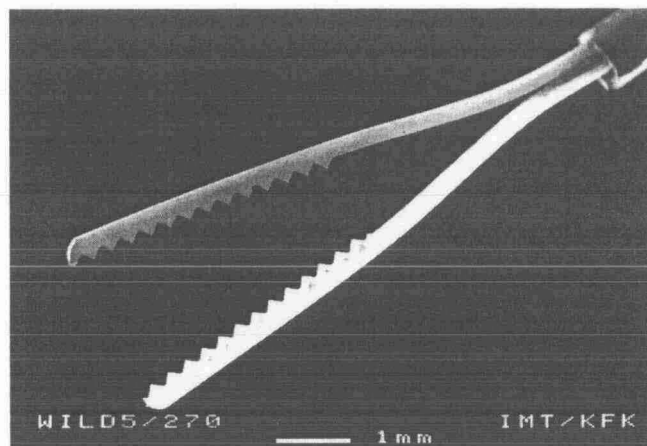


Abbildung 2.1-28

Elektronenmikroskopische Aufnahme des Funktionsmusters einer Mikrofaßzange für den Einsatz in der Neuroendoskopie.
Quelle: BMBF: Mikrosystemtechnik 1994-1999. Bonn 1994, S. 22.

2.1.4.3 Systemintegration und Mikrosystemtechnik

Die Mikrosystemtechnik (MST) beschreibt ein relativ junges interdisziplinäres Forschungsgebiet, in dem das Wissen unterschiedlichster Disziplinen wie z.B. des Maschinenbaues, der Elektrotechnik, der Chemie, der Biotechnologie, der Verfahrenstechnik usw. zusammenfließt.

Die Mikrosystemtechnik ist die „funktionale Verknüpfung einzelner Mikrotechniken unter Anwendung der Systemtechniken zu extrem verkleinerten, weitgehend autonomen Funktionseinheiten.“⁶⁵

Ein Mikrosystem ist demzufolge eine integrierte Einheit, die auf bestimmte äußere Einflüsse reagiert, Entscheidungsprozesse durchführt und gemäß seiner funktionalen Bestimmung mit Hilfe von Aktuatorik agiert. Es entsteht durch den kombinierten und zielgerichteten Einsatz von Mikrotechniken und Systemtechniken⁶⁶ und erfüllt Funktionen, die zuvor, wenn überhaupt, nur im makroskopischen Bereich realisiert werden konnten.

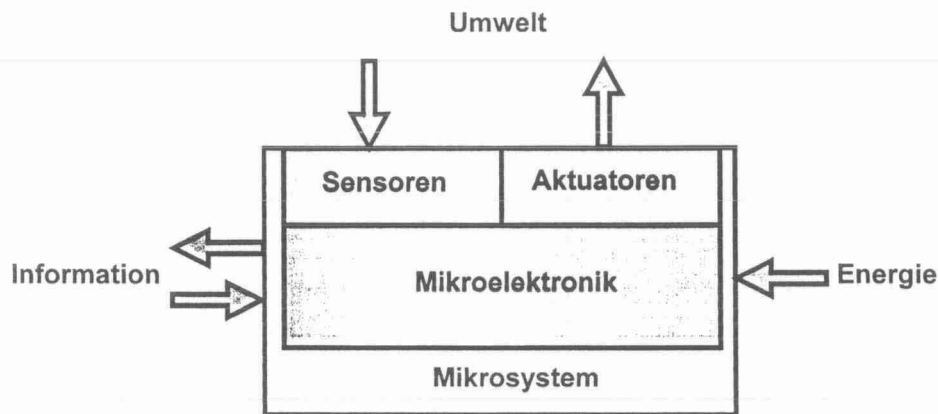


Abbildung 2.1-29

Aufbau von Mikrosystemen

Die Leistungsfähigkeit der Mikroelektronik steht häufig in einem krassen Mißverhältnis zur Leistungsfähigkeit der angeschlossenen Peripherie. Gesamtsysteme werden heute nicht durch die Elektronik in ihrer Leistung eingeschränkt, sondern in er-

⁶⁵ Wicke, W.: Die Förderung der Mikrosystemtechnik in Deutschland. 1. Statuskolloquium des Projektes Mikrosystemtechnik. Kerforschungszentrum Karlsruhe. 23./24. September 1993. S. 6.

⁶⁶ „Systemtechniken unterstützen die Kombination der einzelnen Mikrostrukturtechniken zu einem Gesamtsystem. Dazu gehören in diesem Zusammenhang Systemkonzepte, Signalverarbeitungskonzepte, Systementwicklungsmethoden und -werkzeuge und die Aufbau- und Verbindungstechnik.“; Gronau, M.: Technologien für Mikrosysteme. Düsseldorf 1993. S. 2.

ster Linie durch die mit ihr verbundene Sensorik bzw. Aktuatorik. Durch ihre Substitution mit mikromechanischen Funktionselementen werden zunehmend Peripherieelemente durch Miniaturisierung der Leistungsfähigkeit elektronischer Schaltkreise angepaßt.

Die Mikrotechniken umfassen die Verfahrenstechnologien zur Herstellung von integrierten und miniaturisierten Komponenten. Durch eine geeignete Aufbau- und Verbindungstechnik⁶⁷, die die Integrations- und Kombinationsfähigkeit der einzelnen Technologien berücksichtigt, lassen sich unterschiedliche Mikrostrukturtechniken zu Systemen verbinden. Eine neuartige Rolle erhalten die Systemtechniken, die den Einsatz der Mikrotechniken koordinieren und mit neuen Ansätzen die Verwendung unterschiedlichster physikalischer Effekte (mechanische Bewegung, Elektronik usw.) in den Entwicklungsablauf einbinden. Ein künftiges Ziel besteht also darin, die Herstellungstechnologien einander kompatibel zu gestalten und geeignete Schnittstellen und Entwurfskonzepte zu entwickeln.

MIKROSYSTEMTECHNIK			
Mikrostrukturtechnik	Mikrotechnik	Aufbautechnik	Systemtechniken
	<i>Siliziumplanartechnologie</i>		Entwicklungswerkzeuge
Mikroelektronik		Monolithische Integration	<i>Entwurf, Simulation, Test</i>
	<i>Verbindungstechnik</i>		
Mikromechanik			
	<i>Tiefenätzverfahren</i>	Heterointegration	Signalverarbeitungsverfahren
Mikrooptik			
	<i>Tiefenlithographie</i>		
Mikrofluidik		Hybride Integration	Systemarchitekturen
	<i>LiGA-Technik</i>		

Tabelle 2.1-12

Die Mikrosystemtechnik als Kombination von Techniken zur Herstellung von Mikrosystemen

Quelle: nach Büttgenbach, S.: Mikromechanik. Berlin 1991, S. 218.

⁶⁷ Die Aufbau- und Verbindungstechnik wird in der Literatur je nach Autor den Mikrotechniken (S. Büttgenbach, „Mikromechanik“) oder den Systemtechniken (M. Gronau, „Technologien für Mikrosysteme“) zugeordnet. Im Sinne eines Bindeglieds zwischen Mikrotechniken und Systemtechniken wird sie hier als dritte der Mikrosystemtechnik zugeordnete Technologie aufgeführt.

Der Grundgedanke der Miniaturisierung von Gesamtsystemen leitet sich aus der Mikroelektronik und Siliziumtechnologie ab. In gleicher Weise wie die Produkte der Elektronik sollten zunächst die der Mechanik, dann auch die anderer Disziplinen wie der Optik, der Fluidtechnik usw., von der Integrations-Methodik profitieren und dadurch erhebliche Leistungssteigerungen erfahren. Die Entwicklung der Integrierten Silizium-Mikromechanik führte zu dem Konzept der Kombination von elektronischen und mechanischen Komponenten auf gleichem Substrat und markierte damit die Entstehung des Begriffs Mikrosystemtechnik.

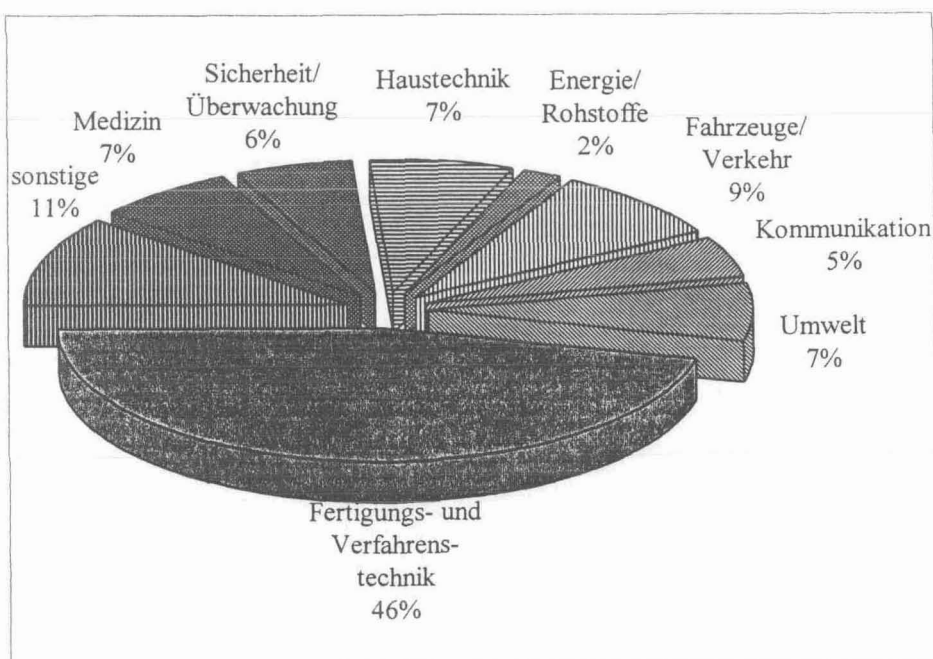


Abbildung 2.1-30

Einsatzgebiete der Mikrosystemtechnik
Quelle: VDI/VDE-IT.

Durch die Systemintegration erhofft man sich einen zusätzlichen Vorteil, der aus der Einbeziehung der Komponentenschnittstellen in das Mikrosystem resultiert.

*Zu erwarten ist, daß mit dieser Technik über die bloße Addition von Einzeltechniken hinausgehende Nutzeffekte entstehen, so daß bei der MST von einer **synergetischen Kombination von Einzeltechniken** zu sprechen ist, deren Anwendungsbereiche heute noch nicht abgesehen werden können, weil sie weitgehend offen und damit noch innovativ gestaltbar sind.*⁶⁸

Die Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten von Mikrotechniken läßt auf ein großes Anwendungspotential der Mikrosystemtechnik schließen. Nachfolgende Darstellung (Abbildung 2.1-30) zeigt die Ergebnisse einer Diffusionsstudie zum „Förderschwerpunkt Mikrosystemtechnik“⁶⁹, in der u.a. die Einsatzgebiete und die prozentuale Verteilung der Anwendungen von Mikrosystemen untersucht wurden. Die Fertigungs- und Verfahrenstechnik ist nach o.a. Untersuchung als größtes Einsatzgebiet der Mikrosystemtechnik angegeben. Dennoch liegen aus unterschiedlichsten Gründen große Potentiale in den Bereichen Medizintechnik und Fahrzeugtechnik: Mit der Entwicklung der Mikrotechniken konnten neuartige Anwendungen im medizinischen Bereich realisiert werden, die zuvor aus Gründen mangelnder Zuverlässigkeit und zu großer geometrischer Abmessungen der realisierten Objekte nicht verwirklicht werden konnten. Die Fahrzeugtechnik gilt als eine wichtige Industrie für die Anwendung der Mikrosystemtechnik, da einerseits Einsatzfelder im Automobil vorhanden sind und andererseits die Marktgröße für die kostengünstige Massenproduktion integrierter Bauelemente ausreichend ist.

Bedingt durch die Mikrosensorik zeichnet sich die Mikromechanik innerhalb der Mikrostrukturtechniken durch den höchsten technologischen Entwicklungsstand aus. Dementsprechend ruht das Hauptinteresse für wirtschaftliche Anwendungen auf dem Bereich der Integrierten Mikromechanik, d.h. die Kombination von mikroelektronischen und mikromechanischen Komponenten auf einem gemeinsamen Trägermaterial. Neben der monolithischen Integration, z.B. in gemeinsamer Si-Planartechnik, bieten die Hybrid- und Heterointegration dort Vorteile, wo eine gemeinsame Integration aus wirtschaftlichen oder technologischen Gründen nicht möglich ist. Grundsätzlich kann man jedoch sagen, daß eine monolithische Integration stets eine kompaktere und zuverlässigere Lösung darstellen wird und bei der Verfügbarkeit geeigneter Technologien gegenüber der Hybridintegration vorzuziehen ist.

Ein entscheidender Vorteil integrierter Systeme gegenüber Makrosystemen ist die Zuverlässigkeit. Ebenso wie die Halbleitertechnik für Mikroelektronikanwendungen die Qualität elektronischer Schaltungen verbessert hat, so lassen sich durch die Integration von Mikrosystemen Produkte mit größerer Ausfallsicherheit herstellen. Die Gründe für diese Zuverlässigkeit sind vor allem auf die präzisen Bearbeitungstech-

⁶⁸ Gronau, M.: Technologien für Mikrosysteme. Düsseldorf 1993, S. 3.

⁶⁹ VDI/VDE-IT, „Statusbericht zur indirekt-spezifischen Maßnahme“; Berlin 1992. Gronau, M.: Technologien für Mikrosysteme. Düsseldorf 1993, S. 5.

nologien und auf das Fehlen von Steckverbindern und Kontakten⁷⁰ zurückzuführen, aber auch Faktoren wie die geringere Störeinstrahlung und die Verminderung der Ausfallwahrscheinlichkeit durch den Einbau gezielter Redundanz bei Teilfunktionen tragen zur Qualitätserhöhung bei.

Die Mikrosystemtechnik wird über längere Zeit vor allem durch Anwendungen der Sensorik dominiert sein. Mit integrierten Siliziumsensoren können stabile technologische Prozesse etabliert werden, die damit weiterführenden Anwendungen den Weg ebnen. Mit der Weiterentwicklung von Aktuatoren werden komplexere monolithische Gesamtsysteme möglich. Sie beinhalten dann eine vollständige Kette bestehend aus Sensorik, Wissenspeicher und Logik sowie Aktuatorik.

2.1.5 Die Entwicklung der Siliziumplanartechnologie für Mikrosysteme

Die Siliziumplanartechnologie verkörperte über viele Jahre eine Produktionstechnologie, die ausschließlich der industriellen Fertigung von elektronischen Bauelementen vorbehalten war. In diesem Rahmen fand auch ihre Weiterentwicklung statt und ihr derzeitiger technologischer Stand ist zu großen Teilen der Speichertechnologie als bestimmender Kraft zuzuschreiben. Seit Mitte der achtziger Jahre werden die zuvor beschriebenen Mikrostrukturtechniken zur Realisierung nicht-elektronischer Funktionsgruppen herangezogen. Zunächst nur in der Forschung jetzt seit einiger Zeit mit industriellen Anwendungen beginnen diese technologischer Ausstrahlungseffekte sich zu etablieren.

2.1.5.1 Die Entwicklung und wirtschaftliche Bedeutung der Mikrostrukturtechnik

Die Mikrostrukturtechniken haben sich aus dem mikroelektronischen Fertigungsumfeld entwickelt. Sie nutzen prinzipiell die gleichen Strukturierungstechniken der Lithographie und flächenhafte Bearbeitungsverfahren zur Form- oder Stoffeigenenschaftsveränderung wie in der Mikroelektronikfertigung.

Den Zeitpunkt der Entwicklung der Mikrostrukturtechniken läßt sich auf nur wenige Jahre nach der Patentanmeldung des Integrierten Schaltkreises datieren. Schon 1962 wurde ein erster integrierter Drucksensor mittels Planartechniken hergestellt, der die generelle Verwendungsmöglichkeit von Silizium für Sensorikanwendungen demonstrierte.⁷¹ Drei Jahre später entstand ein Schwingungsmesser in Silizium-

⁷⁰ Kontaktierungsfehler zählen zu den Hauptfehlerursachen elektronischer Systeme.

⁷¹ O.N. Tufte, P.W. Chapman, D. Long, „Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms“; aus „Journal of Applied Physics“, Jg. 33, Nov 1962, S. 3322.

Oberflächenmikromechanik. Hierbei wurde das Gate eines Feldeffekttransistors durch eine bewegliche Zunge mit einer definierten Resonanzfrequenz ersetzt. Nach längerer Pause in der Weiterentwicklung wurden 1977 anisotrope Ätzprozesse für Silizium entwickelt, die den Beginn der Bulk-Mikromechanik einleiteten.⁷² Erst in den achtziger Jahren wuchs das weltweite Interesse an den Mikrostrukturtechniken. 1983 wurde das Konzept des Opferschichtprozesses beschrieben und 1989 das LiGA-Verfahren vorgestellt.

Der wirtschaftliche Erfolg der Mikrostrukturtechniken begann gegen Ende der achtziger Jahre mit dem industriellen Einsatz von integrierten Drucksensoren in Kraftfahrzeugen. Seitdem sind vor allem in der Automobilindustrie weitere Einsatzfelder mikrotechnisch gefertigte Komponenten hinzugekommen. Integrierte Beschleunigungs- und Flußsensoren werden heute schon in vielen Kraftfahrzeugen verwendet. Dennoch ist die wirtschaftliche Entwicklung weit hinter den Erwartungen zurückgeblieben, da nur wenig weitere Märkte mit einem derartigen Volumenpotential wie die Automobilbranche existieren.

	Industrieverbrauch an Mikrosensoren 1994
Automobilindustrie	43 %
Medizintechnik	23,8 %
Industrietechnik	1,1 %
Luftfahrt- u. Militärtechnik	9 %
Prozeßkontrolle	19,4 %
Energie- und Umwelttechnik	1,4 %
Forschung & Lehre	0,6 %
Sonstige	1,7 %

Tabelle 2.1-13

Industrieller Verbrauch von Mikrosensoren nach Branchen, 1994, Marktvolumen 1,116 Mio.\$

Quelle: Maseeh, F.: Lack of manufacturing know-how is slowing the MEMS revolution. Solid State Technology. October 1995. S. 50.

Im Jahr 1995 betrug der Umsatz des weltweiten Mikrosystemmarkt etwa 1,5 Mrd. \$ und entsprach damit ca. 1% des Halbleitermarktes. Obwohl sie von den großen Fortschritten der Halbleitertechnik durch die Analogie der Technologie profitieren, ist eine Eigendynamik vergleichbar der Mikroelektronikindustrie noch nicht erkenn-

⁷² Petersen, K.E.: Dynamic Micromechanics on Silicon: Techniques and Devices. IEEE Transactions on Electron Devices. Vol. ED-25. Nr.10. 1978. S. 1241-1250.

bar.⁷³ Trotz des vielfach beschriebenen hohen Anwendungspotentials in vielen Bereichen ist die Produktvielfalt sehr eingeschränkt. Die wirtschaftliche Bedeutung wird nahezu ausschließlich vom Mikrosensormarkt bestimmt, wobei der Automobil- und der Medizinsektor die wirtschaftliche Nachfrage bestimmen.

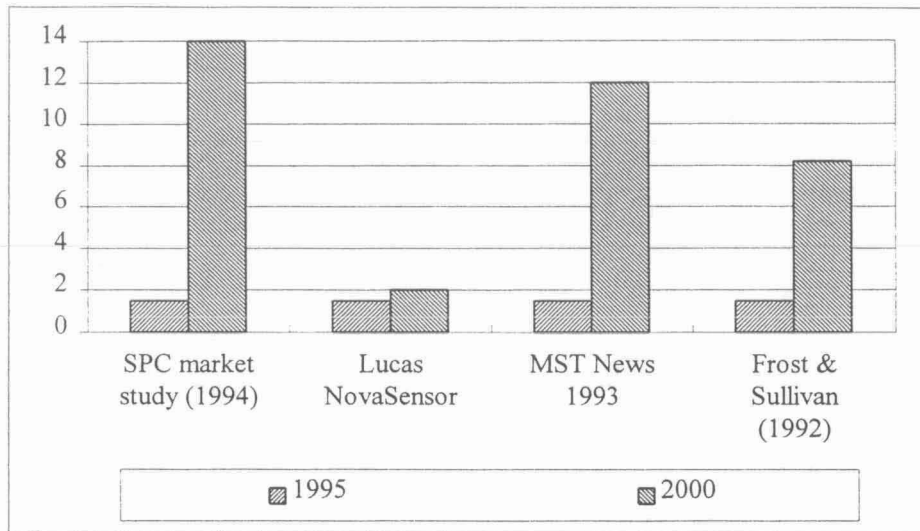


Abbildung 2.1-31

Prognosen für den Mikrosystemmarkt

Quelle: Maseeh, F.: Lack of manufacturing know-how is slowing the MEMS revolution. Solid State Technology. 10/1995. S. 50.

In der Druckschrift „Mikrosystemtechnik 1994-1999“ wird das wirtschaftliche Potential der Mikrosystemtechnik als hoch angegeben. Danach wird der größte Teil der Umsätze bei systemfähigen Mikrosensoren erzielt, die einer Schätzung zufolge bis zum Jahr 2000 etwa 40 Mrd. DM erreichen könnten. Als die wichtigsten, die weitere Entwicklung nachhaltig bestimmende Industriesektoren werden die Automobilindustrie und Umwelttechnik angegeben.⁷⁴ Durch die Miniaturisierung von Systemen

⁷³ Maseeh, F.: Lack of manufacturing know-how is slowing the MEMS revolution. Solid State Technology 10/1995.

⁷⁴ „Mikrosystemtechnik 1994-1999, Programm im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik“, Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1994, S. 57.

erhofft man sich ähnlich wie in der Elektronik Energie- und Materialeinsparung, Verringerung der Produktionskosten und steigende Leistungsfähigkeit.⁷⁵

Die Prognosen der weiteren wirtschaftlichen Entwicklung fallen sehr unterschiedlich aus. Weitaus gemäßigter schätzen amerikanische Unternehmen die Aussichten der Mikrosystemtechnik ein. Neben verhaltenen jährlichen Wachstumsraten von ca. 10% p.a. werden der Mikrosystemtechnischen Industrie teilweise auch Umsatzsteigerungen von 56% p.a. auf ca. 14 Mrd. \$ im Jahr 2000 vorausgesagt.⁷⁶

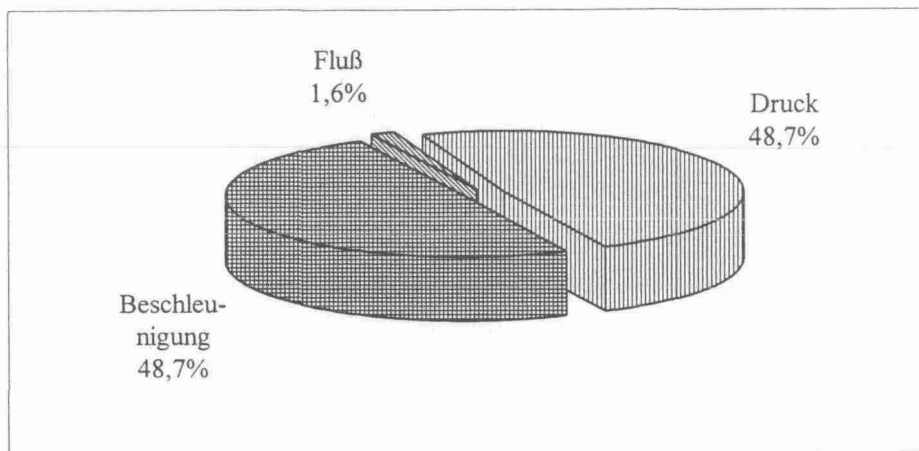


Abbildung 2.1-32

Marktanteile von Mikrosensorkomponenten

Quelle: Maseeh, F.: Lack of manufacturing know-how is slowing the MEMS revolution. Solid State Technology. 10/1995. S. 50.

Mikroaktuatoren und mit Mikrotechniken gefertigte feinmechanische Elemente haben bisher nur in Einzelfällen oder in sehr geringen Stückzahlen die praktische Anwendungsreife erlangt. Glaubt man den Vorhersagen einiger Unternehmen, so werden in Kürze Mikroaktuatoren in Festplattenspeichern zum Einsatz kommen. Dabei sollen die z.Z. noch handverdrahteten Schreib-/Leseköpfe durch integrierte ersetzt

⁷⁵ Brauch, I.H.: Wissensbasierte Modellierung des LiGA-Fertigungsprozesses. Karlsruhe 1994.

⁷⁶ Maseeh, F.: Lack of manufacturing know-how is slowing the MEMS revolution. Solid State Technology. 10/1995. S. 50.

werden und damit einen Marktanteil am gesamten Mikrosystemtechnikmarkt von ca. 6% im Jahr 2000 erlangen (siehe Abbildung 2.1-33).

Die Anteile der einzelnen Mikroprodukte werden sich den optimistischen Vorhersagen zufolge radikal verschieben. Neben den dominierenden Mikrosensoren werden nun auch Mikroaktuatoren einen großen Marktanteil besitzen. Hier werden insbesondere mikrooptische Systeme, z.B. in Displays, Scannern und faseroptischen Schaltern usw., integrierte fluidische Systeme, z.B. Einspritzsysteme für Treibstoff, Druckköpfe in Druckern und Flußregulatoren, sowie Mikroaktuatoren für Festplattenmassenspeicher genannt.⁷⁷

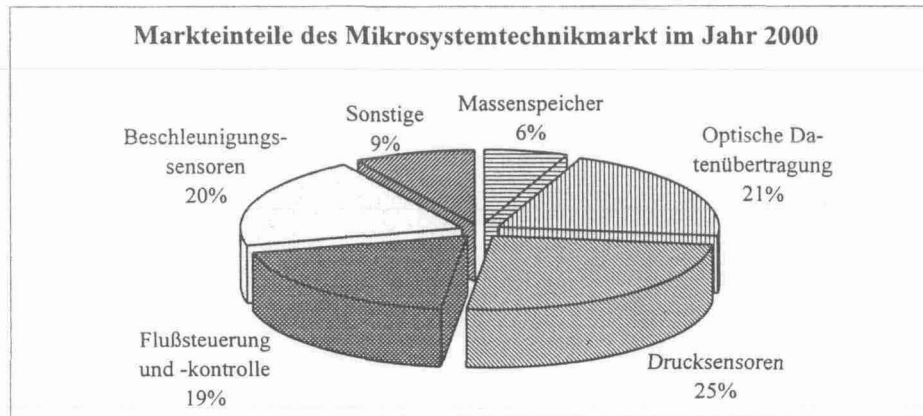


Abbildung 2.1-33

Eine Prognose für die Marktanteile des Mikrosystemtechnikmarkt im Jahr 2000

Quelle: „Microelectromechanical Systems Opportunities; A Department of Defense Dual-Use Technology Industrial Assessment“; 1995; S. 25.

2.1.5.2 Die Strukturen in der Mikrosystemtechnikindustrie

Derart ausgeprägte Strukturen, wie wir sie in der Mikroelektronikindustrie finden, existieren in der Mikrosystemtechnik-Branche verständlicherweise nicht. Unter den etwa 200 Unternehmen, die weltweit in diesem Bereich tätig sind, sind größtenteils

⁷⁷ „Microelectromechanical Systems Opportunities; A Department of Defense Dual-Use Technology Industrial Assessment“; 1995; S. 27.

kleine und mittelständige Unternehmen. Allein 75% von den ca. 80 amerikanischen Firmen haben einen Jahresumsatz von weniger als 10 Mio. \$.⁷⁸ Die Situation in anderen Ländern dürfte ähnlich sein, wenngleich sich die Anteile der öffentlichen Einrichtungen (Universitäten, Forschungseinrichtungen), die auf diesem Gebiet forschen, regional unterscheiden.

Im Unterschied zur Mikroelektronik, die mit einer vergleichsweise geringen Anzahl an grundsätzlichen Herstellungsprozessen auskommt, benötigt man für die Herstellung von Mikrosystemen aufgrund ihrer vielfältigen Interaktion mit ihrer Umwelt eine weitaus größere Vielfalt an technologischen Verfahren und Materialien. Die Bauelementfunktion und ihre Realisierung in der jeweiligen Technologie bestimmen die Wahl der Bearbeitungsmethoden. So nutzt beispielsweise die Oberflächen-Mikromechanik Dünnschichtstrukturen, die für die Messung von kleinen Kräften bei Beschleunigungssensoren gut geeignet sind. Dagegen sind diese für mikrofluidische Elemente, Mikroventile oder Flußregulatoren, aufgrund der dort auftretenden größeren Kräfte nicht zu verwenden. Hier sind robustere Strukturen, die man z.B. mit Waferätzen und Verbindungstechniken herstellt, besser geeignet.

Auffallend ist zudem, daß nur wenig kleine und mittelständige Unternehmen die Technologie der Oberflächen-Mikromechanik verwenden. Bevorzugt werden die Bulk-Mikromechanik-Technologie, weil diese zum einen technologisch relativ gut beherrscht werden und sie zum anderen kostengünstig sind. Dagegen besteht die Absicht von Forschungseinrichtungen und einigen Großunternehmen darin, eine Standardisierung mit der CMOS-Technologie der Mikroelektronik zu erreichen, um Mikrostrukturen mit Mikroelektronik monolithisch zu integrieren. Ziel ist es, mit den zur Verfügung stehenden CMOS-Prozessen mechanisch oder optisch aktive Strukturen zu erzeugen.

Die Fertigungsgeräteindustrie für die Mikrostrukturtechnik ist nahezu identisch mit der der Mikroelektronik. Die Verwandtschaft der Technologien und die Beschränktheit des Marktes zwingen die Mikrotechnikunternehmen hierbei auf die Ausstattungspotentiale der Halbleitertechnik zurückzugreifen. Die geringe Marktgröße läßt ein Entstehen einer angepaßten Fertigungsgeräteindustrie nicht zu. Lediglich die neuen Technologien der Verbindungstechnik und der Ätztechnik haben in Europa (Frankreich, England und Deutschland) einige wenige neue Unternehmen hervorgebracht. Durch diese Abhängigkeit von den Produktionsausstattungen üben die Anforderungen der Chipfertigung, denen die Fertigungsgeräteindustrie gerecht werden muß, einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluß auf die Technologieentwicklung der Mikrotechniken aus.

Die staatliche Förderung der Mikrosystemtechniken ist sehr ausgeprägt und betrug 1995 fast ein Drittel des weltweiten Umsatzes. Der europäische Anteil an den öf-

⁷⁸ Batelle Institute Study, 1992.

fentlichen Forschungsinvestitionen ist bemerkenswert hoch. Mit Kooperationen wie NEXUS (Network of Excellence in Multifunctional Microsystems) sollen die europäischen Anstrengungen im Bereich der Mikrosystemtechnik zwischen Unternehmen und Forschungsinstituten koordiniert werden. Hervorzuheben ist die führende Rolle der deutschen Forschung und Entwicklung. Deutsche Forschungs- und Universitätsinstitute (z.B. die Institute der Fraunhofergesellschaft FhG-IZM Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration in Berlin sowie das FhG-ISiT: Institut für Siliziumtechnologie in Itzehoe, das Institut für Mikrotechnik Mainz IMM u.a.) haben in der Vergangenheit die Fortschritte in der Mikrosystemtechnik in führender Position wesentlich mitgeprägt (z.B. durch die Entwicklung der LiGA-Technik).

Trotz dieser hohen Unterstützung werden Fortschritte nur langsam gemacht. Fehlende geeignete Entwurfssysteme und Herstellungsgeräte zwingen die Hersteller zu empirischen Vorgehensweisen, die hohe Kosten ihrer Ergebnisse verursachen. Insbesondere die industrielle Forschung hält sich daher mit der Veröffentlichung von Forschungsergebnissen zurück, und eine Vielzahl von entwickelten technologischen Prozessen werden als Unternehmensgeheimnisse behandelt. Dieses Verhalten hemmt den Entwicklungsprozeß, da im ungünstigsten Fall Sachverhalte mehrfach erforscht werden.

	(Mio. \$ / Jahr)		
	Staatl. Forschung	Industrieforschung	Gesamt
USA	35 ARPA:27 NSF:3 TRP:5	90	130
Japan	30 MITI:25 Medu:5	80	110
Europa	45 Deutschland:15 Schweiz:15 EU:10	70	115

Tabelle 2.1-14

Weltweite Investitionen in die Mikrosystemtechnik 1995

Quelle: Frazier et al.: The Miniaturization Technologies: Past, Present and Future. IEEE Transactions of Industrial Electronics. Vol. 42. Nr. 5, October 1995. S. 429.

2.1.5.3 Die Erweiterung des Siliziumplanarprozeß durch planare Mikrotechniken

Der Halbleiter-Planarprozeß hat sich seit seiner Erfindung konsequent weiterentwickelt. Große wirtschaftliche Konkurrenz und kurze Produktlebenszyklen zwangen zur Optimierung der Prozesse hinsichtlich Produktionsmenge und Ausbeute und haben die Planartechnologie derart geprägt, daß deren technologische Leistungsfähigkeit nur sekundäre Bedeutung hatte. Im Vordergrund der Bestrebungen stand stets die Eignung zum Einsatz in der Volumenproduktion von Halbleiterbauteilen.

Die Tatsache, daß man sich jetzt vorwiegend Planartechniken bedient, um Mikrostrukturen herzustellen, hat zwei Gründe.

1. Der Mikrosystemtechnik wird ein großes wirtschaftliches Potential bescheinigt. Man erwartet, durch Batch-Processing und Scheibenfertigung, d.h. hohe Produktivität, eine der Mikroelektronik vergleichbare wirtschaftliche Entwicklung zu erreichen, sobald die neuen planaren Mikrotechniken *zuverlässig* und *flexibel* einsetzbar sind. Es ist daher naheliegend, diese nach Aspekten auszuwählen, die sie für die Volumenproduktion auszeichnen. Serielle Verfahren, wie Verdampfungsverfahren, Erosionstechniken u.a., sind leistungsfähige Mikrotechniken, die sich je nach Entwicklungsstand für die Herstellung von Mikrobauelementen eignen, sich jedoch aus produktionswirtschaftlichen Gesichtspunkten nachteilig auf Kosten und Durchsatz auswirken.
2. Mit der teilweisen Übernahme von etablierten Prozessen aus der Siliziumtechnologie besitzt man eine sehr weit entwickelte, durch die Mikroelektronikindustrie verfügbar gemachte, technologische Ausgangsbasis, auf der aufbauend neuartige planare Mikrotechniken angewendet werden können.

Die Planartechnologie hat sich evolutiv in Richtung der Mikrostrukturtechniken erweitert. Die Lithographie stellt für alle planaren Aufbautechniken das eigentliche Kernelement dar. Sie ist das eigentliche Verfahren der Strukturbildung, in dem durch Bestrahlung einer photoempfindlichen Schicht selektiv Bereiche für eine Bearbeitung ausgewählt werden. Sie wird mit zusätzlichen Prozessen kombiniert, die eine großflächige Bearbeitung erlauben. Mikroelektronikprozesse, wie Ätztechnik, Schichtabscheideverfahren, Temperaturbehandlung und Dotierung aber auch die Reinigungsverfahren, sind solche flächenhafte Behandlungsschritte, mit denen sich mehrere Waferscheiben gleichzeitig behandeln lassen.⁷⁹

⁷⁹ Die Verwendung der Photolithographie orientiert sich soweit möglich an der flächenhaften Bearbeitung des Wafers. Obwohl die beschränkte Leistungsfähigkeit abbildender optischer Systeme den Halbleiterunternehmen Modifikationen der Lithographieverfahren aufzwang, wurde das grundlegende Prinzip, nämlich die gleichzeitige Belichtung einer Fläche mit einer großen Anzahl an Strukturen, beibehalten. Die belichtete

Zusätzliche Prozesse, die zur Realisierung von nichtelektronischen Strukturen notwendig geworden sind, ähneln in dieser Eigenschaft denen der Mikroelektronik. Naßchemisches, anisotropes Ätzen, Tiefätzen, Waferverbindungstechniken u.a. sind flächenhafte Verfahren, die sich zur gleichzeitigen Bearbeitung mehrerer Funktionselemente eignen. Auch das LiGA-Verfahren läßt sich in diese Kategorie einteilen. Galvanische Abscheidungsverfahren und Abformtechniken zeichnen sich ebenfalls durch die Möglichkeit der großflächigen Anwendung aus.

2.1.6 Optionen der Halbleitertechnologie

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Halbleitertechnik, insbesondere die Siliziumtechnologie, eine bemerkenswerte Entwicklung vollzogen hat. Das frühzeitige Einsetzen des staatlichen Engagements sorgte für die notwendige wirtschaftliche Entfaltung, ohne die der eigentliche Durchbruch der Halbleitertechnik wahrscheinlich erst einige Zeit später stattgefunden hätte. Die Rolle der staatlichen initiierten Förderung auf die Technologieentwicklung muß demnach als hoch eingeschätzt werden. Sie erstreckte sich auf zahlreiche breitangelegte Förderungsprogramme und erleichterte kleineren Firmen durch Aufhebung von Patentmonopolen und Zugang zu Forschungsergebnissen aus staatlich finanzierter Forschung den Eintritt in dieses Marktsegment.

Auch heute ist der Einfluß staatlicher Maßnahmen zur Unterstützung der nationalen Halbleiterindustrien sehr groß. Wie anhand der sich schnell verschiebenden Weltmarktanteile gezeigt werden konnte, reagiert die Halbleiterindustrie sehr empfindlich auf staatliche Förderung und Interventionen. Auch die Verschiebung der Weltmarktanteile zugunsten der südostasiatischen Länder ist eine Folge von zielgerichteter intensiver Industriepolitik der Regierungen dieser Region.

Die technische und wirtschaftliche Entwicklung gehorchte bis heute nahezu konstanten Entwicklungsparametern, die bei nahezu allen Kenngrößen ein exponentielles Wachstum hervorrufen. Mechanismen wie Demand-Pull und Technology-Push sowie die stark ausgeprägte Globalisierung und Arbeitsteilung in der Halbleiterindustrie begünstigen die weiteren Fortschritte, so daß eine Abschwächung des Wachstums z.Z. nicht zu erwarten ist.

Fläche wurde zwar reduziert, dennoch konnte die mit diesem Prozeßschritt hergestellte Zahl der Bauelemente vergrößert werden. Immerhin trägt jeder Lithographieschritt mittlerweile zur Herstellung von mehreren Millionen Transistoren bei. Der Übergang zum Step-and-Repeat-Verfahren hat die Dauer des Belichtungsprozeß verlängert, der damit zum kostenintensivsten Faktor der Chipfertigung geworden ist. (siehe 1993 IEEE/SEMI S.65).

Die Mikrosystemtechnik ist die technologische Weiterschreibung der Mikroelektronik. Sie entstand durch den Transfer der Planartechnologie in andere Technikbereiche und sollte der Mikroelektronik geeignete miniaturisierte Peripherieelemente zur Verfügung stellen. Es entstanden die Mikrosensorik und -aktuatorik, die sich vorrangig mit der planaren Fertigung von miniaturisierten nichtelektronischen Baugruppen befassen.

Trotz einiger erfolgreicher Beispiele, wie z.B. Druck- und Beschleunigungssensoren in Automobilanwendungen, ist ein sich selbst tragender wirtschaftlicher Durchbruch der Mikrostrukturtechniken noch nicht erfolgt. Da man jedoch in allen Wirtschaftsregionen die künftige Bedeutung der Mikrosystemtechnik als hoch einschätzt, ist die staatliche Förderung dieser Technologie ausgeprägt.

2.1.6.1 Das Potential der Halbleitertechnologie für die Mikroelektronik

Die Siliziumplanartechnologie hat die moderne Produktionstechnik verändert. Die Mikroelektronik als Ergebnis der gemeinsamen Integration von Bauelementen und deren Verbindungen auf einem Substrat revolutionierte den Produktionsprozeß durch Automatisierung; Rationalisierung und Veränderung der Organisationsstrukturen von Produktionseinrichtungen. NC-Maschinen (NC: numerically controlled), CAD (Computer Aided Design) und Computersimulation, sowie Flexible Fertigungssysteme stellen die Meilensteine bei der Fabrikautomatisierung durch die Elektronik dar. Die Leistungsfähigkeit der Computers bewirkte nicht nur bei Fertigungsanlagen einen Produktivitätsschub, sie machte auch den Einsatz menschlicher Arbeit effizienter.

Vom heutigen Standpunkt gesehen stellt die Entwicklung des Planarprozesses eine prozeßtechnologische Basisinnovation dar. Der zuvor beschriebene Erfolg der Mikroelektronik ist anfänglich auf die Substitution herkömmlicher Röhren- und Transistorschaltungen aber dann zunehmend auf die Durchdringung neuartiger Anwendungsfelder für mikroelektronische Schaltungen zurückzuführen. Vornehmlich zwei wichtige Eigenschaften waren hierfür ausschlaggebend. Die Miniaturisierung und die Erhöhung der Zuverlässigkeit ermöglichten den integrierten Schaltungen in neuen Anwendungsfeldern eingesetzt zu werden, die ihnen zuvor aus Gründen mangelnder Leistungsfähigkeit, hoher Größe oder einer nichtausreichenden Zuverlässigkeit (z.B. in sicherheitsrelevanten Bereichen) verschlossen geblieben sind. Auf der anderen Seite revolutionierte der Planartechnologieprozeß die Herstellung integrierter Schaltkreise und bedingte wesentliche Fortschritte durch Flexibilisierung und Produktivitätserhöhung im Produktionsprozeß elektronischer Schaltkreise.

Diese Wirkungen auf Produkt- und Produktionsverbesserungen werden auch heute noch durch die stetige Miniaturisierung erreicht. Das Potential der Planartechnologie,

Strukturen zu verkleinern, ist daher eine treibende Kraft des Erfolgs der Mikroelektronik. Solange die Integration von elektronischen Bauteilen in einer Erhöhung der Zuverlässigkeit oder der Komplexität resultiert oder die Kostensenkung in der Produktion eines Chips zur Folge hat, können noch immer neuartige Anwendungsfelder erschlossen werden. Aus diesem Grund ist auch in nächster Zeit keine Abschwächung der wirtschaftlichen Entwicklung mikroelektronischer Bauelemente zu erwarten, zumal die theoretischen, physikalischen Grundlagen zum Aufbau noch kleinerer Transistoren für die nächsten Generationen vorliegen.

Technologische Trends orientieren sich heute an den Anforderungen der Speichertechnologie. Der Anteil von ca. 32% (1994) am gesamten Welthalbleitermarkt und ihr überproportionales Wachstum gegenüber anderen Halbleiterbauelementen macht das Segment der Speicher auf dem Gesamthalbleitermarkt dominierend. Das hat in der Vergangenheit zu einer hohen Spezialisierung der Technologie geführt und damit gleichzeitig zu ihrem Erfolg beigetragen. Die Fokussierung des F&E-Potentials auf die Speichertechnologie bewirkte die Einengung der technologischen Basis geführt und führte zu einer Optimierung der existierenden Verfahren hinsichtlich der spezialisierten Fertigungstechnik.

Die spezifische industrielle Struktur der Halbleitertechnik ist maßgeblich aus der Wechselbeziehung von technologischen Eigenschaften, hohen Investitions- und Technologiekosten sowie kurzen Produktlebenszyklen hervorgegangen. Die Bewältigung dieser Herausforderungen hat zu Kompromissen bei der Weiterentwicklung der Halbleitertechnologie geführt. Die Optimierung und Anpassung der Produktionstechnik, d.h. der planaren Prozesse, hat dabei stets Vorrang behalten. Grundsätzliche Veränderungen des technologischen Systems werden aus Gründen ungewisser Lernkurvenverläufe und hohen Einführungskosten weitestgehend vermieden. Erst in jüngster Zeit läßt sich ein Trend zur Umstellung der Produktionssysteme der Halbleitertechnik beobachten, nachdem die Investitionssummen für neue Produktionsanlagen die Finanzkraft vieler Unternehmen überfordern.

Diese Entwicklungen werden für die Mikroelektronik auch in Zukunft Bestand haben. Der nahezu ungebremst wachsende Bedarf an Datentechnik wird die Richtung des technischen Fortschritts maßgeblich bestimmen. Miniaturisierung ist auch bei der Weiterentwicklung von Speicher- und Prozessorbausteinen zur Steigerung der Funktionskomplexität und Verarbeitungsgeschwindigkeit sowie bei anderen Halbleiterbauelementen letztendlich der ausschlaggebende Faktor.

2.1.6.2 Das Potential der Halbleitertechnologie für die Mikrostrukturtechniken und die Mikrosystemtechnik

Die Mikrostrukturtechniken sind aus dem Transfer der Produktionstechnologie mikroelektronischer Bauteile in andere Technikbereiche entstanden. Die Siliziumplanartechnik ist daher auch für die Mikrostrukturtechniken die dominierende Produktionstechnologie. Planare Verfahren der Halbleitertechnologie wurden übernommen, modifiziert und durch weitere Technologieprozesse ergänzt, die sich grundsätzlich durch die charakteristische, flächenhafte Bearbeitungsweise auszeichnen.

Obwohl parallel dazu noch weitere, nichtplanare Verfahren zur Mikrostrukturierung bestehen, ist die führende Position der Planartechnologie bei der Mikrosystemtechnik durch den Erfolg der Mikroelektronik vorgezeichnet. Dennoch gibt es einige gravierende Nachteile, die sich aus ihrer Verwendung für nichtelektronische Strukturen ergeben (z.B. die Schwierigkeiten bei der Strukturierung der dritten Dimension u.a.). Während die Miniaturisierung die Leistung elektronischer Schaltungen fast generell verbesserte, ist diese Erwartung auf anderen Gebieten nicht ohne weiteres gerechtfertigt. Von einer generellen Leistungsverbesserung bei der Integration nichtelektronischer Baugruppen kann man nicht sprechen, dennoch sind in bestimmten Fällen dadurch Vorteile zu erwarten. Die Integration von Baugruppen ist dann sinnvoll, wenn durch die Miniaturisierung Leistungsmerkmale des Produkts verbessert werden oder in der Produktion Kostenvorteile entstehen. Die möglichen Einsatzfelder der Mikrostrukturtechniken sind dadurch eingeschränkter als in der Mikroelektronik, da durch die Miniaturisierung und Integration nicht ausschließlich Vorteile erzielt werden können. Die Entstehung von neuen Produkten auf der Grundlage der planaren Mikrotechniken ist daher von positiven und negativen Effekten geprägt. Die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Packungsdichte von Strukturen sowie die Vorteile planarer Verfahren in der Produktion stehen der Verschlechterung von charakteristischen Produkteigenschaften (z.B. die abnehmende Empfindlichkeit von Sensoren oder die abnehmende Leistungsdichte von Aktuatoren durch die Miniaturisierung) gegenüber.

Der technologische und damit auch der wirtschaftliche Erfolg der Mikrostrukturtechniken wird sich je nach realisiertem Produkt auf zwei Wegen vollziehen. Vergleichbar den schon bestehenden Strukturen in der Mikroelektronikindustrie für Massen- und Spezialanwendungen werden sich mikrosystemtechnische Produkte wahrscheinlich aus Bereichen entwickeln, in denen entweder große Stückzahlen und/oder eine besondere Funktionalität bzw. Zuverlässigkeit benötigt werden.

Ähnlich den Speicherchips bei der Mikroelektronik sind auch in der Mikrostrukturtechnik Massenanwendungen Technologietreiber. So konnten die Mikrosensoren-

wendungen vor allem im Massenmarkt des Automobilssektors die Leistungsfähigkeit der mikrotechnischen Prozesse erhöhen und bei hohem Produktionsvolumen die Herstellungskosten teilweise unter die der konventionell gefertigten Sensoren senken. Auch in einigen anderen Bereichen konnten sich mikrotechnisch geformte Bauelemente auf Massenmärkten durchsetzen, z.B. Ink-Jet-Technologie bei Tintenstrahldruckern in der Konsumelektronikbranche u.a.. Die Erschließung derartiger Anwendungsfelder verläuft verhältnismäßig langsam. Erst nach und nach entstehen neue erfolgversprechende Produkte, z.B. die monolithische Fertigung von Schreib-/Leseköpfen für Festplattenmassenspeicher.

Die Medizintechnik gilt aus zwei Gründen als weiteres chancenreiches Einsatzgebiet. Zum einen werden für Implantate oder chirurgische Eingriffe höchstzuverlässige, miniaturisierte Komponenten oder Instrumente benötigt. Der technologische Stand der Siliziumplanartechnologie garantiert auch bei der Mikrosystemtechnik, höheren Zuverlässigkeitsanforderungen gerecht zu werden. Die Vermeidung oder die Verringerung der Zahl von Fügeprozessen bei einer Integration trägt zur Steigerung der Qualität solcher Komponenten bei, die vor allem in sicherheitsrelevanten Bereichen besondere Bedeutung hat. Zum anderen können im Bereich der Gesundheitsvorsorge Produkte entstehen, die aus Gründen der Hygiene nur zur einmaligen Verwendung geeignet sind (z.B. Drucksensoren zur Messung des Blutdrucks, integrierte chemische Sensoren für die Bestimmung von Blutwerten u.a.). Die Anforderung nach hoher Qualität und Zuverlässigkeit und eine hohe Stückzahl nachfrage kann in diesem Bereich der Weiterentwicklung der Mikrosystemtechnik neue Impulse geben.

Dank gezielter staatlicher Förderung befindet sich die europäische und deutsche Forschung im Bereich der Mikrosystemtechnik in einer Spitzenposition. Vor allem einige Institute der Fraunhofergesellschaft und das Institut für Mikrotechnik in Mainz (IMM) konnten in der Vergangenheit durch eigene Schwerpunkte den Fortschritten der Mikrostrukturtechniken neue Impulse geben. Eine weiterhin abgestimmte staatliche Projektförderung kann dazu beitragen, in diesem Kerngebiet künftiger industrieller Produktionstechnik die vorhandenen Optionen zu nutzen und eine Führungsrolle europäischer Unternehmen in diesem Technologiegebiet zu behaupten.

2.1.7 Ausblick

Die Siliziumplanartechnologie ist eine universelle Produktionstechnik für miniaturisierte Systeme. Obwohl die Verwendung der Planartechnologie gewisse Einschränkungen bei der Topologie von Mikrobau-elementen mit sich bringt, überwiegen doch klar die Vorteile, die sich aus dem über mehr als drei Jahrzehnte kumulierten Forschungs-Knowhow, der ausgeprägten Zuliefer-Infrastruktur und der Produktionstechnik ergeben.

Richtungsweisend für den Erfolg der Halbleitertechnik war die Standardisierung des Entwurfs, der Produktion und der Anwendung von integrierten Schaltkreisen. Sie wurde wesentlich dadurch vorangetrieben, komplexe elektronische Funktionen durch nur wenige von einander verschiedene Bauelemente zu realisieren. Insbesondere durch die digitalen CMOS-Schaltkreise, die nur aus zwei Typen komplementärer Transistoren bestehen, kam diese Vereinfachung den Fortschritten in der Produktionstechnik zugute.⁸⁰

Der Grundgedanke der Mikrosystemtechnik, verschiedenartige Mikrostrukturtechniken zu kombinieren, steht diesem Prinzip entgegen. Der Kontakt von Mikrosystemen mit einem nicht-digitalen Umfeld macht die Anwendung zahlreicher angepaßter Wirkprinzipien unumgänglich. Diese müssen je nach Funktion gesondert integriert werden, um den unterschiedlichsten Anforderungen gerecht zu werden. Eine künftige Reduktion der zahlreichen Grundelemente der Sensorik und Aktuatorik auf einige wenige Basis-Bauelemente, mit deren Hilfe ein hoher Anteil aller Mikrosystemfunktionen gewährleistet werden kann, wird einen technischen Durchbruch einleiten. Diese Vereinfachung ermöglicht dann auch die standardisierte Massenfertigung von komplizierten autonomen Mikrosystemen. Auf diese Weise kann der Erfolg der Mikroelektronik durch die Mikrosystemtechnik fortgesetzt werden.

2.1.8 Weiterführende Literatur

- [1] Angel, D.: Restructuring for Innovation- The Remaking of the U.S. Semiconductor Industry. New York 1994.
- [2] Baltes, H.: Future of IC microtransducers. *Sensors and Actuators A* 56, 1996, S. 179-192.
- [3] Bao, M., Wang, W.: Future of microelectromechanical systems (MEMS). *Sensors and Actuators A* 56, 1996, S. 135-141.
- [4] Benz, M., Fatikow, S., Großmann, B.: Mikrorobotik für die Mikrosystemtechnik. Teltow 1995.
- [5] Berg, H.: Marktphasen, Zeitwettbewerb und Strategische Allianzen: Die Beispiele Mikroelektronik und Personal Computer. *Dortmunder Diskussionsbeiträge zur Wirtschaftspolitik*. Dortmund 1995.
- [6] Bezzaoui, H.: Integrierte Optik und Mikromechanik auf Silizium. Dortmund 1993.
- [7] Biebel, H.: Innovationsmotor Mikrosystemtechnik Teil 1. *Elektronik* 22/1990, S. 114-126.
- [8] Biebel, H.: Innovationsmotor Mikrosystemtechnik Teil 2. *Elektronik* 23/1990, S. 86-91.
- [9] Blancke, W.: Evolution und Strategische Allianzen: der Einfluß strategischer Allianzen auf den Wettbewerb. Bayreuth 1994.

⁸⁰ Grundsätzlich läßt sich feststellen, daß Standardisierung und die Entwicklung von Prozeßabläufen umso einfacher ist, je weniger verschiedenartige Komponenten integriert werden müssen.

- [10] Bley, P., Menz, W.: Aufbruch in die Mikrowelt. Physikalische Blätter Vol. 49 (1993) Nr. 3, S. 179-184.
- [11] BMFT: Dokumentation zur Prognose und Bewertung von perspektivischen Technologien in der Informationstechnik. Bonn 1994.
- [12] BMFT: Technologie am Beginn des 21. Jahrhunderts. Diskussionspapier. Bonn 1993.
- [13] BMFT: Unterstützung kleiner und mittlerer Unternehmen im Rahmen der Mikroelektronik-Anwendungen JESSI. Zwischenbericht zur Hauptphase des Fördervorhabens“, April 1995.
- [14] BMFT: Zukunftskonzept Informationstechnik. Bonn 1989.
- [15] Bonfig, K.W.: Sensoren und Mikroelektronik. Böblingen 1993.
- [16] Brendley, K., Steeb, R.: Military Applications of Microelectromechanical Systems. National Defense Research Institute. Santa Monica 1993.
- [17] Bryzek, J.: Impact of MEMS technology on society. Sensors and Actuators A 56, 1996, S. 1-9.
- [18] Bryzek, W., Petersen, K.: Micromachines on the march. IEEE Spectrum, May 1994, S. 20.
- [19] Burger, R.: The SIA'S Roadmap: Consensus for cooperation. Solid State Technology, February 1995; S. 38.
- [20] Büttgenbach, S.: Mikromechanik. Stuttgart 1994.
- [21] Castrucci, P.: The future fab: Changing the paradigm. Solid State Technology, January 1995, S. 49.
- [22] Dario, P.: Non-traditional technologies for microfabrication. Journal of Micromechanics and Microengineering, 5/1995; S. 64-71.
- [23] Department of Defense: Microelectromechanical Systems Opportunities. A Department of Defense Dual-Use Technology Industrial Assessment. 1995.
- [24] Doering, R.: The fab of the future. Solid State Technology, January 1995, S. 60.
- [25] Dörrenbächer, C., Oesterheld, W.: Prognosen zu technisch-wirtschaftlichen Potentialen neuer Technologien. FAST-Studien. Berlin 1988.
- [26] Dosi G., Pavitt, K., Soete, L.: Technological change and high-tech competition. London 1990.
- [27] Dötzel, W., Kiehnscherf, R., Ziegler, T.: Mikromechanische Aktoren mit magnetischer Betätigung. VDI Berichte 960. Kongressbericht Gerätetechnik und Mikrosystemtechnik. Bd. 1, 1992, S. 179-202.
- [28] DRI/McGraw-Hill: The Globalisation of the Semiconductor Industry. 1995.
- [29] Economic Planning Agency: Technologieprognose für das Jahr 2010. Berlin 1992.
- [30] Forster, R., Diamond, D.: Miniaturized Chemical Sensors. Analytical Communication, January 1996, Vol. 33, S. 1H-4H.
- [31] Freedman, J.: 21st Century Microelectronic Technology trends. Smart Electronics, SPIE Proceedings, San Diego 1995, S. 182-192.
- [32] Fuhr, G., Hagedorn, R., Müller, T. et al.: Pumping of Water Solutions in Microfabricated Electrohydrodynamic Systems. IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems. Travemünde 1992. S. 25- 30.
- [33] Gabriel, K., Trimmer, W.: Small machines, large opportunities: a report on the emerging field of microdynamics. Report on the Workshop on Micro Electro Mechanical Systems Research. Salt Lake City, Princeton 1987-1988.
- [34] Gabriel, K.: Progress and Prospects. MicroElectromechanical Systems User/Supplier Workshop, Cambridge 1994.

- [35] Gerstenberger, W.: Die Bedeutung einer nationalen/europäischen Halbleiterindustrie für die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und insbesondere als Standortfaktor für Anwenderindustrien der Mikroelektronik. Ifo Institut für Wirtschaftsforschung. München 1992.
- [36] Gianchandani, Y., Najafi, K.: Batch fabrication and Assembly of Micromotor-driven Mechanisms with Multi-Level Linkages. IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems. Travemünde 1992. S. 141-146.
- [37] Gruber, H.: Modelling the Learning Curve for the Production of Semiconductors. Cahiers BEL. EIB Papers. No. 20 September 1993, S 43-68.
- [38] Gruber, H.: The Learning Curve for the Production of semiconductors. Applied Economics. Vol 24, 1992, S. 885-894.
- [39] Hayashi, T.: Micromechanisms and Their Characteristics. IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems. Oiso 1994. S. 39-44.
- [40] Heinzlmann, E.: Mikrotechnische Komponenten und Systeme. Technische Rundschau Transfer, Nr. 27/28, 1994, S. 14-18.
- [41] Heuberger, A.: Mikromechanik. Berlin 1989.
- [42] Hilleringmann, U.: Mikrosystemtechnik auf Silizium. Stuttgart 1995.
- [43] Hogan, H.: Invasion of the Micromachines. New Scientist, June 1996, S. 28.
- [44] Hölzle, R., Schmitz, W.: Festkörperforschung für die Informationstechnik. Vorlesungsskript. Jülich 1990.
- [45] Hurley, R., Gamble, H.: Some recent advances in silicon microtechnology and their dependence on processing technique. Journal of Vacuum Science, Vol. 46, 3/1995; S. 287-293.
- [46] Hutcheson, G.: Technology and Economics in the Semiconductor Industry. Scientific American, January 1996; S. 40.
- [47] IBON Databank Phil, Inc.; „The Semiconductor Industry“; Manila 1990.
- [48] Irwin, D., Klenow, P.: Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry. Journal of Political Economy, 1994, Vol. 102, No. 6, S. 1200-1227.
- [49] Jerman, H.: Recent Trends in Silicon Micromachining technology. Proceedings Micromachining and Microfabrication Process Technology; Austin 1995; S. 3-8.
- [50] Kachejian, K.: MEMS Market Study - Industries, Applications and Components. MicroElectromechanical Systems User/Supplier Workshop. Cambridge 1994.
- [51] Kanz, J.: Strategy evolution and structural consequences in the US semiconductor industry. Technovation. Vol. 14, 1994, S. 221-241.
- [52] Klaasen, F.M.: Design and Performance of micron-size devices. Solid State Electronics, Vol. 21, 1978, S. 565-571.
- [53] Ko, W.: The future of sensors and actuator systems. Sensors and Actuators A 56, 1996, S. 193-197.
- [54] Kohyama, S.: Semiconductor technology crisis and challenges towards the year 2000. 1994 Symposium on VLSI Technology, New York 1994, S. 5-8.
- [55] Kota, S., Ananthasuresh, G., Crary, S., Wise, K.: Design and Fabrication of Microelectromechanical Systems. Journal of Mechanical Design. Vol. 116, December 1994, S. 1081-1088.
- [56] Kroy, W.: Mikrosystemtechnik auf dem Weg in neue Dimensionen und Anwendungen. etz, Bd. 113 1992 Heft 16, S. 1014-1019.
- [57] Kulcke, W.: Wirtschaftliche Gesichtspunkte zur Mikrosystemtechnik. Microengineering 1994: Kongress und Ausstellung für Mikrosysteme und Präzisionstechnik. Stuttgart 1994.

- [58] Larrabee, G.: The Intelligent Microelectronics Factory of the Future. IEEE, International Semiconductor Manufacturing Science Symposium. Burlingame 1992. S. 30-34.
- [59] Luryi, S., Xu, J., Zaslavsky, A.: Future Trends in Microelectronics - Reflections on the Road to Nanotechnology. Dordrecht 1995.
- [60] Madou, M.: Si Microengineering: The newest Precision Engineering Tool. Electrochemical Society Proceedings, Vol. 95-18, 1995, S. 236-252.
- [61] Malerba, F.: The Semiconductor Business- The Economics of Rapid Growth and Decline. London 1985.
- [62] Manck, O.: Design komplexer Systeme- Verkürzung der Entwicklungszeiten durch paralleles Entwickeln. Aus Forum Hewlett Packard, Cadence. Böblingen 1994.
- [63] Manck, O.: Von der innovativen Produktentwicklung zur Innovation in der Produktentwicklung. Unveröffentlichtes Manuskript. Berlin 1994.
- [64] Marek, J., Möllendorf, M.: Mikrotechniken im Automobil. Sonderdruck aus mikroelektronik 1995, Heft 3, S. 10-13.
- [65] Marek, J.: Mikrosystemtechnik im Kfz. Mikroelektronik, Vorträge der GME-Fachtagung in Baden-Baden. Berlin 1995, S. 291-304.
- [66] Mayo, J.S.: Materials for Information and Communication. aus Scientific American, 10/1986, S. 58-65.
- [67] Mehregany, M., Tai, Y.: Surface micromachined mechanisms and micromotors. Journal of Micromechanics and Microengineering. Nr. 1, 1991, S. 80.
- [68] Mehregany, M.: Microelectromechanical Systems, IEEE Circuits and Devices, 7/1993.
- [69] Mehregany, M.: Microfabricated Silicon Electric Mechanisms. PhD-Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 1990.
- [70] Meindl, J.: Prospectus for Gigascale Integration. Proceedings International Semiconductor Manufacturing Science Symposium. San Francisco 1993, S. 39-41.
- [71] Meindl, J.D.: Opportunities for Gigascale Integration. Solid State Technology. December 1987, S. 85-89.
- [72] Meindl, J.D.: Ultra-Large Scale Integration. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-31, No. 11, November 1984, S. 1555-1561.
- [73] Meusel, E.: Mikrosystemtechnik- eine Herausforderung für die Aufbau- und Verbindungstechnik. Mikroelektronik, Vorträge der GME-Fachtagung in Dresden. Berlin 1993, S. 337-343.
- [74] Muller, R. S.: From IC's to microstructures: materials and technologies. IEEE Proceedings of Microrobots and Teleoperators Workshop. Hyannis 1987.
- [75] Najafi, K.: Smart Sensors. Journal of micromechanics and microengineering. 1991, Vol. 1, S. 86-102.
- [76] OECD: Globalisation of industrial activities. Four case studies: Auto Part, Chemicals, Construction and Semiconductors. Organisation for Economic Co-Operation and Development. 1990.
- [77] Offenberg, H., Münzel, H.: Acceleration sensor in Surface micromachining for airbag applications with high signal/Noise Ratio. Sensors and Actuators, 1996; S. 35-41.
- [78] Olckers, P., Hanneborg, A., Nese, M.: Batch Processing for micromachined devices. Journal of Micromechanics and Microengineering, 5/1995; S. 47-56.
- [79] Petersen, K.: From microsensors to microinstruments. Sensors and Actuators A 56, 1996, S. 143-149.

- [80] Petersen, K.: Silicon as a mechanical material. Proceedings IEEE, Vol. 70, 1982, S. 420-457.
- [81] Queisser, H.J.: Industrieforschung - Mikroelektronik - Anwendung. Dokumentation des 4. BDI Technologiegesprächs vom 22. Juni 1989, S. 20-45.
- [82] Richter, F.: Strategische Allianzen zwischen deutschen und japanischen Firmen-Kooperation oder Konfrontation?. Soziale und wirtschaftliche Studien über Japan/Ostasien; Berlin 1994.
- [83] Scherer, F.M.: International High-technology competition. London 1992.
- [84] Schmidt, L.: A Vision of Vision in the gigabit era.; Semiconductro International; June 1993; S. 120-124.
- [85] Schmutz, W., Schraft, R.: Forschung und Entwicklung für die Halbleitergeräte-Industrie. Halbleiterfertigung. Neue Trends bei Produktionsstrukturen und Fertigungsgeräten. GME-Fachbericht. Berlin 1989. S. 101-113.
- [86] Schoot, B. van der: Interfacing micro and macromechanical worlds. Journal of Micromechanics and microengineering, 5/1995, S. 72-73.
- [87] Schopmann, J.: 'Philips' Antwort auf die neue Halbleiterära. aus Technikgeschichte, Bd. 50, 1983, S. 151.
- [88] Seitz, D.: Reinraumtechnik. Ehningen bei Böblingen 1988.
- [89] Semiconductor Industry Association: The National Technology Roadmap for Semiconductors. SEMATECH 1996.
- [90] Senturia, S.: The future of microsensors and microactuator design. Sensors and Actuators A 56, 1996, S. 1125-1127.
- [91] Sniegowski, J.: Moving the world with surface micromachining. Solid State Technology, February 1996, S. 83.
- [92] Stix, G.: Towards „Point one“. Trends in Semiconductor Manufacturing. Scientific American, February 1995, S. 90-95.
- [93] Streck, W.R.: Marktpotentiale neuer Werkstoffe, ifo-Schnelldienst 32/94, S. 10-20.
- [94] Svedberg, B.: Microelectronics in today's industrial revolution. Engineering Management Journal, April 1995, S. 89.
- [95] Sydow, W.: High-Tech-Trends. Technik und Technologie der Stoffveränderung. Berlin 1990.
- [96] System Planning Cooperation: Market Study: Microelectromechanical Systems (MEMS). 1994.
- [97] Tai, Y., Ho, C.: Silicon micromachining and its applications. Proceedings- SPIE The International Society for Optical Engineering. 1995, S. 141-151.
- [98] Trimmer, W.: Microrobots and micromechanical systems. Sensors and Actuators 1989; S. 267-287.
- [99] Valette, S.: Micro-optics, a key technology in the race to microsystems. Journal of micromechanics and microengineering. Vol. 5, Nr. 2, June 1995, S. 74-76.
- [100] VDE-Trendanalyse 1995, Mikroelektronik 4/1995, S. 43-49.
- [101] VDI/VDE Technologiezentrum Informationstechnik GmbH: Mikrorobotik für die Mikrosystemtechnik. Kurzstudie; Teltow 1995.
- [102] Vintro, L.: Can micromachining deliver. Solid State Technology, April 1995; S. 57.
- [103] Vogel, C.: Mikrosystemtechnik: Miniaturisierung nicht nur in der Elektronik. technologie+management 2/1995, S. 89-93.

- [104] Wallrabe, U., Bley, P., Krevet, B. et al.: Theoretical and Experimental Results of an Electrostatic Micro Motor with Large Gear Ratio Fabricated by the LiGA Process. IEEE Proceedings of Micro Electro Mechanical Systems. Travemünde 1992. S. 139-140.
- [105] Wartmann, G.: Mikrosystemtechnik- Ein Technologiekonzept mit großem Anwendungspotential in der Informationstechnik. etz Bd.111 1990 Heft 16, S. 832-837.
- [106] Warwick, C.A.: Toward Gigascale Silicon Integrated Circuits. Microelectronic Engineering 23/1994, S. 57-61.
- [107] Weiss, M.: Semiconductor factory automation. Solid State Technology, January 1996; S. 89.
- [108] Whitehouse, D.J.: Micromechanics in Systems. Mechatronics, Vol.1, Nr. 4, 1991, S. 427-437.
- [109] Wieder, A.W.: Mikroelektronik-Quo vadis?. Siemens Zeitschrift Spezial Frühjahr 1996.
- [110] Yamasaki, H.: The future of sensor interface electronics. Sensors and Actuators A 56, 1996, S. 129-133.
- [111] Zappe, H.: Introduction to semiconductor integrated optics. Norwood 1995.
- [112] Zappe, H.: On the Nature of future MEMS-A Perspective. Applications to storage and microelectromechanical systems (MEMS): proceedings of the Fourth International Symposium on Magnetic Materials, Processes and Devices. Chicago 1995, S. 223-235.
- [113] Zinner, H.: Microsystems- the European approach. Sensors and Actuators A 46-47, 1995, S. 1-7.
- [114] ZVEI: Technologien im 21. Jahrhundert. Positionspapier der deutschen Elektroindustrie. Frankfurt am Main 1993.