Aktuelle Entwicklungen der Mikroelektronik[1]

S. Selberherr[2]

Mikroelektronik spielt heute in unserem Leben eine Schlüsselrolle. In wenigen Jahrzehnten haben mikroelektronische Produkte alle Bereiche unseres Alltags durchdrungen. Die Ursache für diese Entwicklung ist in technologischen Meisterleistungen zu sehen, die in ihren Fortschritten noch über die kommende Dekade ungebrochen vorangetrieben werden können. Der Markt wird begleitend mit beachtlichen 15 % pro Jahr wachsen. Es sind keine fundamentalen Engpässe zu erwarten.

Schlüsselwörter: Mikroelektronik; Halbleitertechnologie; Integrierte Schaltung; Miniaturisierung

Recent developments in microelectronics. Microelectronics plays a key role in our present life. Within a few decades microelectronic products have penetrated all areas of daily routine. The reason for this evolution can be seen in great technological feat, which will still be pressed ahead for the coming decade. The market will grow a remarkable 15 % per year. Fundamental bottlenecks are not to be expected.

Keywords: microelectronics; semiconductor technology; integrated circuit; miniaturization

1. Von der Elektronik zur Mikroelektronik

Unter Elektronik versteht man alle Anordnungen, deren Funktion auf kontrollierter Bewegung von elektrischer Ladung beruht. Mit einer zumindest dreipoligen Vorrichtung (Elektronenröhre, Transistor [17]) werden elektrische Ladungen, die von einer Quelle zur Verfügung gestellt werden und durch zumindest zwei der Pole fließen können, von den Spannungsverhältnissen an den Polen gesteuert. Diese als aktiv bezeichneten Bauelemente werden mit den klassischen passiven Bauelementen der Elektrotechnik (Widerstand, Kapazität, Induktivität) zu einer (elektronischen) Schaltung zusammengefügt, um eine bestimmte Funktion zu erwirken. So entstehen in Verbindung mit elektromagnetischen und/oder elektromechanischen Wandlern (Antennen, Mikrofone, Motoren, Lautsprecher usw.) beliebig komplexe Systeme zur Verrichtung praktischer Dienste.

In der klassischen Elektronik werden die Bauelemente auf einer Platte physisch montiert und elektrisch mit auf dieser Platte aufgebrachten Leiterbahnen zu einer Schaltung mit der gewünschten Funktion verlötet. In der Mikroelektronik beschäftigt man sich mit elektronischen Schaltungen, welche zur Gänze in einem festen Körper aus Leitern, Halbleitern und Isolatoren zusammengesetzt sind. Die Bauelemente und ihre Verbindungsstrukturen sind also in einer Struktur, die als „integrierte Schaltung" bezeichnet wird, vereinigt und werden auch in einem gemeinsamen Ablauf gefertigt. Die Verkleinerung der Strukturen unter Erhalt [4] oder sogar Verbesserung der elektrischen Funktion und der damit verbundenen Steigerung des Quotienten aus Leistung und Kosten schreitet seit der grundsätzlichen Idee vor nur vier Jahrzehnten und dem ersten Patent [10] für die integrierte Schaltung atemberaubend voran. Durch die Integration der Bauelemente mit ihren Verbindungsstrukturen sind Schaltungen mit einer Komplexität verwirklichbar, die in herkömmlicher Elektronik niemals funktionsfähig wären. Man stelle sich nur einen 256-Mbit-Speicher in diskreter Schaltungstechnik mit 268, 435, 456 Kondensatoren, ebenso vielen Selektionstransistoren und der nötigen Adressierungslogik vor. Der Preis einer integrierten Schaltung mit 256 Mbit Speicherkapazität beträgt heute etwa 25 €, Tendenz fallend, was pro Bauelement einen Preis von wenigen MikroCent bedeutet. Die Erhöhung der Integrationsdichte und die Verkleine-

[1] Einführungsvortrag zur Informationstagung Mikroelektronik ME 99 am 29. September im Rahmen der viet 99.

[2] O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Siegfried Selberherr, Dekan der Fakultät für Elektrotechnik, Institut für Mikroelektronik, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27–29, A-1040 Wien.

rung der Strukturen wird noch mehr als ein Jahrzehnt ungebremst vorangetrieben werden [14], [19].

In den letzten Jahren wird häufig von Nanoelektronik gesprochen. Damit meint man üblicherweise Elektronik mit Bauelementen, die zumindest eine charakteristische Abmessung aufweisen, die um Größenordnungen kleiner ist, als es bei entsprechend zeitgemäßen mikroelektronischen Strukturen üblich ist. Damit wird im Allgemeinen ein physikalischer Effekt konstruktiv einsetzbar (Tunneleffekt, Quanteneffekt usw.), der in der konventionellen Mikroelektronik nur eine parasitäre Rolle spielt. Neuartige Bauelemente werden auf diese Weise geschaffen (z. B.: resonant tunneling devices [9], single-electron devices [8]), die möglicherweise in weiter Zukunft auch eine kommerzielle Bedeutung erhalten könnten.

2. Zur Entwicklung der Technologie

Die Fertigungstechnologie integrierter Schaltungen wird in ihrer Entwicklung innerhalb der nächsten Dekade nicht an fundamentale Grenzen stoßen. Die Sicherheit von Prognosen, die Fortschritte in der Technologie betreffen, ist seit Jahren relativ gut, was auf intensive explorative Forschung und weltweit von Industrievertretern gemeinschaftlich kompilierte „Roadmaps" (vgl. [14]) zurückzuführen ist.

Die Dynamik der Entwicklung in der Technologie lässt sich mit einfachen empirischen Aussagen dokumentieren. Alle zehn Jahre erhöht sich die Integrationsdichte integrierter Schaltungen um den Faktor 100, die entsprechende Fertigungseinrichtung ist um einen Faktor 10 teurer, und die Preise bezogen auf die Einzelstruktur (Bit, Gatter usw.) fallen auf ein Hundertstel.

Die Erhöhung der Integrationsdichte fußt zum einem auf der Reduzierung der Strukturgröße. Heute haben die kleinsten tatsächlich in Produkten gefertigten Strukturen Abmessungen von etwa 0,2 μm, vor zehn Jahren war diese kleinste Strukturfeinheit noch 0,6 μm und vor 20 Jahren etwa 2 μm. Die Strukturfeinheiten von Prototypen in der Forschung sind jeweils noch um einen Faktor 2 bis 3 kleiner. Diese Abmessung bestimmt quadratisch die Integrationsdichte pro Fläche. Zum anderen steigt die Fläche der integrierten Schaltungen. So haben heute Muster des 1-Gbit-Speicherbausteins eine Fläche von etwa 500 mm^2, z. B. [5], die 4-Mbit-Speicherbausteine vor etwa zwölf Jahren nutzten eine Fläche von 90 mm^2, z. B. [11], die 64-kbit-Speicherbausteine vor etwa 20 Jahren waren nur etwa 10 mm^2 groß, z. B. [20]. In Abb. 1 sind diese Schaltungen maßstabsgetreu dargestellt. Der in [6] vorgestellte Prototyp eines 1-Gbit-Speicherbausteins war mit 570 mm^2 noch um 14 % größer als der ein Jahr später vorgestellte [5]. Es ist leicht einsichtig, dass möglichst kleine Flächen wünschenswert sind. Es passen mehr Schaltungen auf die Rohmaterialscheibe und bei gegebener Defektdichte pro Flächeneinheit steigt die Ausbeute. Man hätte auch schon früher gerne größere Flächen verwendet, war aber dazu aus mangelnder fertigungstechnischer Präzision nicht in der Lage. Die Defektdichte pro Flächeneinheit war einfach zu groß, um genügend defektfreie Schaltungen zu erhalten.

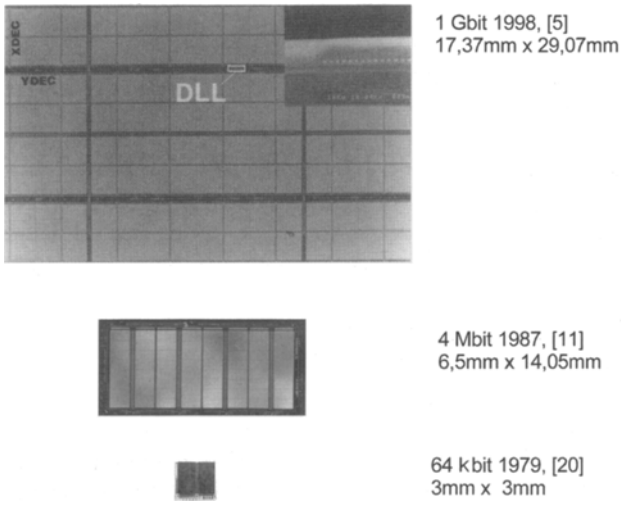

Abb. 1. Die Entwicklung der Speicherbausteine (Maßstab 2:1)

Mit der Vergrößerung der Fläche der integrierten Schaltungen geht die Vergrößerung der Rohmaterialscheiben, der Wafer, einher. Heutiger Industriestandard ist ein Scheibendurchmesser von 200 mm, Vorarbeiten für die nächste Scheibengröße mit 300 mm Durchmesser werden jedoch bereits äußerst erfolgreich durchgeführt [7]. Durch den Einsatz dieser größeren Scheiben erwartet man eine Reduktion der Fertigungskosten der einzelnen integrierten Schaltung von 15 bis 20 % und eine Reduktion der Investitionskosten für die Fertigungseinrichtung um 40 bis 45 % bei gleicher Kapazität. In etwa einem Jahr werden die ersten Fabriken mit 300-mm-Scheiben die Massenproduktion aufnehmen.

Nach den Untersuchungen von Dataquest [3] war die weltweite Fertigungskapazität 1998 bereits zu 50 % auf 0,35 μm kleine oder noch kleinere Strukturen vorbereitet. Dieser Trend zu immer kleineren Strukturen ist von fundamentaler ökonomischer Bedeutung, da bei Verwendung kleinerer Strukturen die für eine Schaltung benötigte Gesamtfläche eben kleiner ist. Es passen daher mehr Schaltungen auf eine Scheibe, wodurch die Kosten pro Schaltung verringert werden.

Eine weitere Notwendigkeit, in kleineren Strukturen zu fertigen, liegt in der Geschwindigkeit begründet, mit der eine Schaltung betrieben werden kann. Je kürzer die Kanallänge eines MOS-Transistors ist, umso schneller kann dieser schalten. Daraus folgt, dass manche geschwindigkeitsrelevante Funktionen einfach nur mit sehr kleinen Transistoren verwirklichbar sind.

Aus diesen Überlegungen kann man gesichert schließen, dass in 3 bis 4 Jahren die ersten Muster eines

4-Gbit-Speicherbausteins, gefertigt mit 0,13 μm Strukturen auf einer Fläche von etwa 600 mm^2, verfügbar sein werden. Logikschaltungen mit 75 Mio. Bauelementen (ohne Speicher) arbeiten bei Frequenzen bis zu 2 GHz.

In zehn Jahren sollten die ersten 64-Gbit-Speicherbausteine mit 70 nm kleinen Strukturen auf einer Fläche von etwa 1 100 mm^2 fabriziert werden. Logikschaltungen für Betriebsfrequenzen bis zu 6 GHz mit über 500 Mio. Bauelementen müssten Wirklichkeit geworden sein. Man wird die Fertigung auf Scheiben mit 450 mm Durchmesser einführen.

Um dies zu bewältigen, müssen große Herausforderungen gemeistert werden [16]. Die Organisation und die Finanzierung von Forschung und Entwicklung ist zu überdenken, wobei auch besonderes Augenmerk der Ausbildung geeigneter Arbeitskräfte zu schenken ist. Die Messtechnik und das Testen der integrierten Schaltungen müssen weiterentwickelt werden, wobei wahrscheinlich nur durch Verbesserungen in der Schaltungstechnik echte Fortschritte erzielt werden können [13]. Mehr Verständnis für die Schaltungstechnik für Systeme, die mit Frequenzen im Gigahertz-Bereich arbeiten, ist ebenfalls zu gewinnen. So zeigen heute bereits CMOS-Schaltungen, die mit 0,15 μm Strukturfeinheit gefertigt wurden, eine Inverterverzögerung unter 20 ps (Prototypen mit 0,12 μm Strukturfeinheit sogar nur 11,4 ps) [21]. Neue Materialien mit verbesserten Isolationseigenschaften oder verbesserter Leitfähigkeit, die mit dem wichtigsten Halbleitermaterial, Silizium, fertigungstechnisch verträglich sind, sollten untersucht werden. Die Verbindungsstrukturen der einzelnen Bauelemente in der integrierten Schaltung stellen Engpässe, die Geschwindigkeit und den Integrationsgrad betreffend, dar. In Abb. 2 ist ein kleiner Ausschnitt einer Verbindungsstruktur, die mit Kupferbahnen im PowerPC™-Schaltkreis [12] gefertigt wird, gezeigt. Einen noch kleineren Ausschnitt im Querschnitt dieser Struktur mit sechs Kupfermetallisierungsebenen und der lokalen Verbindungsebene zu unterst zeigt Abb. 3. Diese Ausschnitte stammen vom PowerPC™-Schaltkreis [12], vgl. Abb. 4. Es ist zu beachten, dass der 1-Gbit-Schaltkreis in Abb. 1 die 12,5-fache Fläche aufweist. Aus diesen Bildern ist klar ersichtlich, welche exorbitanten Anforderungen an die Präzision der Fertigung gestellt sind. Nicht zuletzt seien die beachtlichen Anforderungen an die Lithografie zitiert, welche durch die fortschreitende Strukturverkleinerung gestellt werden.

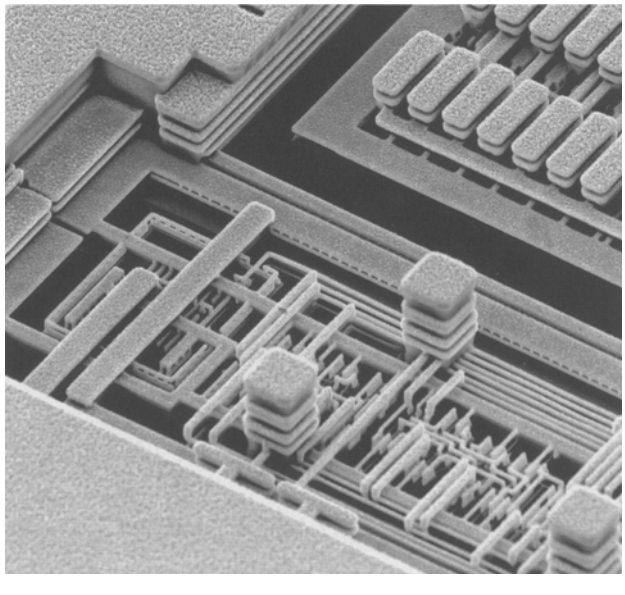

Abb. 2. Ausschnitt aus einer Verbindungsstruktur

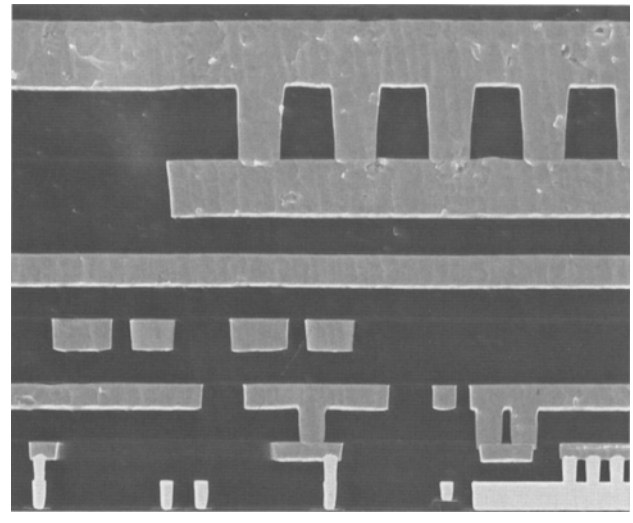

Abb. 3. Querschnitt durch eine Verbindungsstruktur

3. Zur Entwicklung des Marktes

Man kann in der Mikroelektronik zwei wesentliche Arten von integrierten Schaltungen unterscheiden. Diese sind die universell einsetzbaren und die sogenannten anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen. Bei den universell einsetzbaren integrierten Schaltungen differenziert man klassisch in die Speicherbausteine und die Logikbausteine, welche im Wesentlichen diverse Arten von Prozessoren darstellen. Speicher- und Logikbausteine existieren in eher wenigen unterschiedlichen Ausführungen, die in hohen Stückzahlen gefertigt werden; die anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen umfassen sehr viele verschiedene Typen, die zumeist eher niedervolumig gefertigt werden. Im Zuge der Entwicklung werden Speicherzellen auch in Logikbausteinen vermehrt benötigt. Dies gilt für die universell einsetzbaren Logikbausteine genauso wie für die meisten anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen [2]. Der PowerPC™-Schaltkreis in Abb. 4 beinhaltet zwei 32 kbyte statische Speicher als L1-Cache für Daten und Instruktionen, welche etwa ein Drittel der Fläche

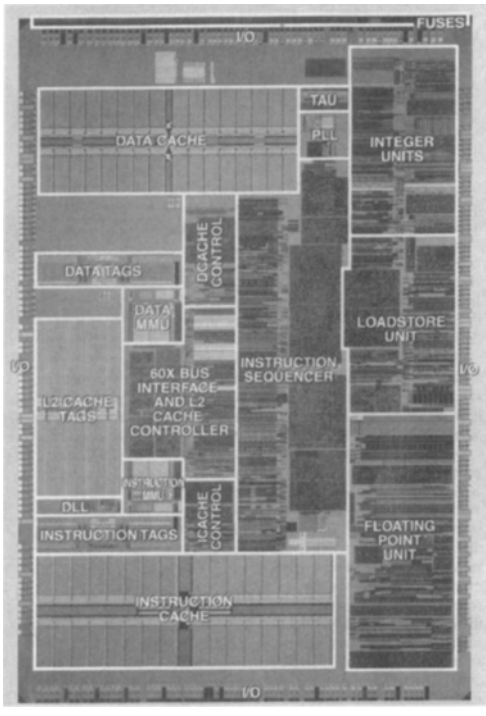

Abb. 4. Der PowerPC$_{TM}$-Schaltkreis von IBM; 6,4 Mio. Transistoren auf einer Fläche von 40 mm² mit einer minimalen Strukturfeinheit von 0,13 μm, Versorgungsspannung 1,8 V, Verlustleistung 3 W bei einer Betriebsfrequenz von 400 MHz

benötigen, was durchaus repräsentativ für einen modernen Mikroprozessorbaustein ist.

Nach dem Einsatzgebiet kann man fünf wesentliche Produktbereiche identifizieren. Es sind dies die Gebiete Computerelektronik (oft auch Datentechnik genannt), Telekommunikationselektronik, Konsumelektronik, Industrieelektronik und Automobilelektronik. In der Computerelektronik werden hauptsächlich universelle integrierte Schaltungen eingesetzt, in der Industrieelektronik liegt der Anteil des Einsatzes der universellen Bausteine bei etwa zwei Drittel und in den anderen Bereichen bei etwa der Hälfte.

Der Weltmarkt der integrierten Schaltungen, der sich auf die Regionen Amerika, Europa, Japan und das pazifische Asien aufteilt, ist vollständig vom globalen Wettbewerb in allen Geschäftsfunktionen bestimmt. Abb. 5 zeigt die Verteilung des Marktes auf die verschiedenen Produktbereiche. Man sieht, dass die Computerelektronik in Amerika und Asien über dem Weltmarktdurchschnitt etabliert ist, in Europa gilt das für die Telekommunikationselektronik und die Automobilelektronik, in Asien und Japan für die Konsumelektronik. Bemerkenswert gering ist der Weltmarktanteil an der Computerelektronik in Europa und Japan, der Telekommunikationselektronik und Automobilelektronik in Asien und der Konsumelektronik in Amerika und Europa. In Tabelle 1 sind diese Zahlen quantitativ zusammengefasst.

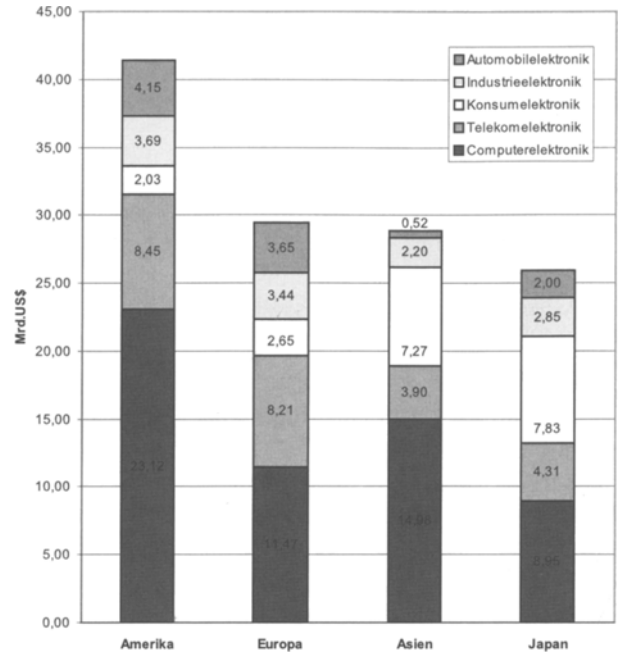

Abb. 5. Die Verteilung des Weltmarktes 1998 nach geografischen Regionen und Produktkategorien

Der Markt war 1998 durch wesentliche Verlagerungen innerhalb der genannten geografischen Regionen bestimmt. So konnte lediglich in Europa ein Zuwachs von 1,1 % verzeichnet werden, alle anderen Regionen litten unter starken Einbußen, vgl. [18]. Japan musste dramatische Rückgänge (19,2 %) verkraften. In Amerika waren die Rückgänge mit 9,6 % mehr als doppelt so hoch wie in Südostasien (4,4 %). Insgesamt ist der Weltmarkt 1998 gegenüber 1997 um 8,4 % gefallen, für 1999 wird jedoch eine klare positive Entwicklung mit einem Wachstum von 10 % einhellig vorhergesagt [1].

Dennoch wird der Markt in der kommenden Dekade mit etwa 15 % pro Jahr im Mittel wachsen, wobei die Produktbereiche Telekommunikationselektronik, Industrieelektronik und Automobilelektronik, in welchen die klassischen anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen liegen, etwas geringer wachsen werden (13 % bis 14 %). Die Anbieter von anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen versuchen daher heute weltweit, ihr Produktspektrum auf zusätzlichen Gebiete auszuweiten, z. B. integrierte Sensoren, System-on-Chip [2]. Im Jahr 2003 wird wahrscheinlich wieder ein temporärer Einbruch des Marktes, wie er 1997 zu beobachten war, stattfinden. Das bedeutet insgesamt eine Verdopplung des Marktvolumens auf etwa 265 Mrd. US$ im Jahre 2003, wobei Amerika mit 33 % und Europa mit 23 % den Marktanteil von 1998 halten werden können und Japan (1998 mit 21 %) zu Gunsten von Südostasien (1998 mit 23 %) etwa 3 % verlieren wird. Die Prognose für die Entwicklung des Marktes ist in Abb. 6 grafisch dargestellt.

Tabelle 1. Die Verteilung des Weltmarktes 1998 in Mrd. US$

	Amerika	Europa	Asien	Japan	Welt
Computerelektronik	23,12	11,47	14,98	8,95	58,51
Telekomelektronik	8,45	8,21	3,90	4,31	24,86
Konsumelektronik	2,03	2,65	7,27	7,83	19,77
Industrieelektronik	3,69	3,44	2,20	2,85	12,17
Automobilelektronik	4,15	3,65	0,52	2,00	10,31
Gesamt	41,43	29,41	28,86	25,92	125,61
Computerelektronik	55,80 %	39,01 %	51,90 %	34,51 %	46,58 %
Telekomelektronik	20,40 %	27,90 %	13,50 %	16,61 %	19,79 %
Konsumelektronik	4,90 %	9,00 %	25,19 %	30,19 %	15,74 %
Industrieelektronik	8,89 %	11,70 %	7,61 %	11,00 %	9,69 %
Automobilelektronik	10,00 %	12,40 %	1,80 %	7,70 %	8,20 %

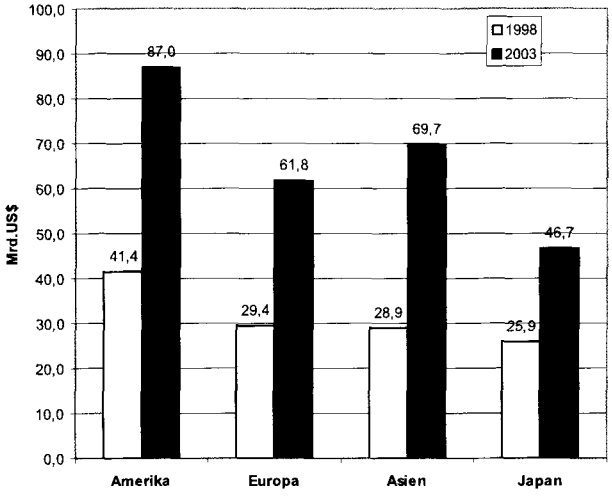

Abb. 6. Die Entwicklung des Weltmarktes für integrierte Schaltungen

Die weltweite Fertigungskapazität, die voll ausgelastet ist, beträgt zurzeit etwa das Äquivalent zu 837500 Scheiben mit 200 mm Durchmesser pro Woche [15]. Es ist eine einfache Schlussrechnung, die bei der erwarteten Entwicklung in zehn Jahren benötigte Fertigungskapazität abzuschätzen.

4. Ausblick

Die Mikroelektronik hat wohl die Geschicke der Menschheit so gravierend beeinflusst, wie niemals zuvor etwas von Menschen Geschaffenes. In Verbindung mit der Informationstechnik ist die Welt auch für den einzelnen Menschen eine sichtbare Einheit geworden, was wir als Globalisierung bezeichnen. Die Fortschritte in der Mikroelektronik werden sicher noch länger als eine Dekade ungebremst in Produkte eingehen, deren mögliche Funktionalität heute unsere Vorstellungskraft überfordern. Es ist spannend, diese Entwicklung mitzuverfolgen!

Schrifttum

[1] Business Week, 10. Mai (1999) S. 47.

[2] Chin, D.: Executing system on a chip – requirements for a successful SOC implementation. Proceedings International Electron Devices Meeting (IEDM), 1998, S. 3–8.

[3] Dataquest, http://www.dataquest.com/.

[4] Dennard, R. H., Gaensslen, F. H., Yu, H.-N., Rideout, V. L., Bassous, E., Leblanc, A. R.: Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions. IEEE Journal of Solid-State Circuits, SC-9 (1974), Nr. 5, S. 256–268.

[5] Eto, S., Matsumiya, M., Takita, M., Ishii, Y., Nakamura, T., Kawabata, K., Kano, H., Kitamoto, A., Ikeda, T., Koga, T., Higashiho, M., Serizawa, Y., Itabashi, K., Tsuboi, O., Yokoyama, Y., Taguchi, M.: A 1 Gb SDRAM with ground level precharged bitline and non-boosted 2. 1V word line. Proceedings International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 1998, S. 82–83.

[6] Kim, K. N., Lee, J. Y., Lee, K. H., Noh, B. H., Nam, S. W., Park, Y. S., Kim, Y. H., Kim, H. S., Kim, J. S., Park, J. K., Lee, K. P., Lee, K. Y., Moon, J. T., Choi, J. S., Park, J. W., Lee, J. G.: Highly manufacturable 1 Gb SDRAM, digest of technical papers. Symposium on VLSI Technology, 1997, S. 9–10.

[7] Komiya, H.: The 300 mm technology: Current status and future prospect. Proceedings Symposium on VLSI Technology, 1997, S. 1–3.

[8] Likharev, K. K.: Single-electron devices and their applications. Proceedings IEEE 87 (1999), Nr. 4, S. 606–632.

[9] Mathews, R. H., Sage, J. P., Sollner, G., Calawa, S. T., Chen, Ch.-L., Mahoney, L. J., Maki, P. A., Molvar, K. M.: A new RTD-FET logic family. Proceedings IEEE 87 (1999), Nr. 4, S. 596–658.

[10] Noyce, R. N.: U.S. Patent 2981877, Apr. 25, 1961.

[11] Pribyl, W., Bähring, M., Harter, J., Sommer, D.: Ein 4-Megabit dynamischer Speicher in Sub-μm-CMOS-Technologie. Berichte der Informationstagung Mikroelektronik, S. 59–66. Wien, New York: Springer. 1987.

[12] Rohrer, N., Akrout, C., Canada, M., Cawthron, D., Davari, B., Floyd, R., Geissler, S., Goldblatt, R., Houle, R., Kartoschke, P., Kramer, D., McCormick, P., Salem,

G., Schulz, R., Su, L., Whitney, L.: A 480 MHz RISC microprocessor in a 0.12 μm L_{eff} CMOS technology with copper interconnects. Proceedings International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), 1998, S. 240–241.

[13] Runyon, S.: Testing big chips becomes an internal affair. IEEE Spectrum (1999), Nr. 4, S. 49–55.

[14] Semiconductor Industry Association: The national technology roadmap for semiconductors, <http://notes.sematech.org/ntrs/PublNTRS.nsf>.

[15] Semiconductor International, <http://www.semiconductor-intl.com/>.

[16] Selberherr, S.: Die großen Herausforderungen in der Mikroelektronik in den nächsten zehn Jahren, e & i 115 (1998), H. 7/8, S. 344–348.

[17] Special Issue: 50th Anniversary of the Transistor! Proceedings IEEE 86 (1998), Nr. 1, S. 1–308.

[18] Mikroelektronik-Studie '99. Frankfurt: VDE. 1999.

[19] Wong, H.-S. P., Frank, D. J., Solomon, P. M., Wann, C. H. J., Welser, J. J.: Nanoscale CMOS. Proceedings IEEE 87 (1999), Nr. 4, S. 537–570.

[20] Yanagawa, F., Kiuchi, K., Hosoya, T., Tsuchiya, T., Amazawa, T., Mano, T.: A 1 μm Mo-Gate 64-kbit MOS RAM. Proceedings International Electron Devices Meeting (IEDM), 1979, S. 362–365.

[21] Yoshitomi, T., Saito, M., Ohguro, T., Ono, M., Momose, H. S., Morifuji, E., Morimoto, T., Katsumata, Y., Iwai, H.: Single-gate 0.15 and 0.12 μm CMOS with co salicide technology. Solid-State Electronics 43 (1999), Nr. 3, S. 543–546.