

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 73 (1995)

Heft: 3

Artikel: Die Weiterentwicklung der Kerntechnologie für die Telekommunikation

Autor: Eisele, Hartmut / Hildebrand, Olaf / Lösch, Kurt

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875926>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 09.03.2025

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

Die Weiterentwicklung der Kerntechnologien für die Telekommunikation

Hartmut EISELE, Olaf HILDEBRAND, Kurt LÖSCH, Horst OHNSORGE und Bernd STAHL, Stuttgart

Zusammenfassung

Die Weiterentwicklung der Kerntechnologien für die Telekommunikation

Der enorme Fortschritt im Bereich der Telekommunikationsnetze und -dienste basiert auf Kerntechnologien wie Mikroelektronik, Optoelektronik, Glasfasertechnologie, Übertragungstechniken sowie Montagetechniken, die alle qualitativ hochwertige Werkstoffe und Prozesstechnologien benötigen. Die Signalverarbeitung ist eine Schlüsseltechnologie für eine wirtschaftliche Übertragung. Alle Telekommunikationsdienste erfordern einen hohen Softwareaufwand in den Netzen, in den zugehörigen Datenbanken sowie in Teilnehmerendgeräten. Die Software wird somit schrittweise zu einer der wichtigsten Technologien für die Telekommunikation. Wir haben bereits einen hohen Stand in den folgenden «Kerntechnologien für die Telekommunikation» erreicht: Mikroelektronik, Optoelektronik und Glasfasertechnologie, Montageverfahren, Signalverarbeitung, Softwaretechnologie. In allen diesen Technologien befinden wir uns noch in der Anfangsphase, es kann aber ein weiterer gravierender Fortschritt vorhergesagt werden, denn die physikalischen Grenzen sind noch weit entfernt vom erreichten Stand. Die fortschrittliche Organisation des Softwareentwicklungsprozesses dürfte der Schlüssel für erfolgreiche zukünftige Telekommunikationstechnologien sein.

Résumé

Perfectionnement des technologies de base dans le domaine des télécommunications

L'énorme progrès dans le domaine des réseaux et des services de télécommunication se fonde sur des techniques de base telles que la microélectronique, l'optoélectronique, les fibres optiques, les techniques de transmission et de montage, techniques exigeant toutes des matériaux et des processus hautement évolués. Le traitement des signaux est une technique clé pour une transmission économique. Tous les services de télécommunication exigent un logiciel très évolué dans les réseaux, dans les banques de données associées et dans les terminaux d'utilisateurs. Le logiciel devient ainsi peu à peu l'une des technologies les plus importantes de la télécommunication. Nous avons déjà atteint un niveau élevé dans les «technologies de base de la télécommunication»: microélectronique, optoélectronique, technologie des fibres optiques, procédés de montage, traitement des signaux, technologies des logiciels. Or, dans toutes ces technologies, nous n'en sommes encore qu'au début, mais l'on peut prédire qu'elles connaîtront un progrès spectaculaire, car l'état atteint est encore fort éloigné des limites physiques. Développer des logiciels selon des processus ultramodernes livrera sans doute la clé des technologies de télécommunication de demain.

Riassunto

Perfezionamento delle tecnologie nucleari per le telecomunicazioni

L'enorme progresso nel settore delle reti e dei servizi delle telecomunicazioni si basa sulle tecnologie nucleari come la microelettronica, la optoelettronica, la tecnologia delle fibre ottiche, le tecniche di trasmissione come pure le tecniche di montaggio, le quali hanno bisogno di materiali e di tecnologie di processi di alta qualità. L'elaborazione del segnale è una tecnologia chiave per una trasmissione economica. Tutti i servizi di telecomunicazione richiedono un grande dispendio a livello di software nelle reti, nelle relative banche di dati come pure nei terminali d'utente. Il software sta così diventando pian piano una delle più importanti tecnologie per le telecomunicazioni. Abbiamo già raggiunto un elevato standard nelle seguenti «tecnologie nucleari per le telecomunicazioni»: nella microelettronica, nella optoelettronica e nella tecnologia delle fibre ottiche, nelle procedure di montaggio, nell'elaborazione dei segnali e nelle tecnologie software. Per tutte queste tecnologie, che si trovano nella fase iniziale, si possono prevedere ulteriori progressi importanti poiché i limiti nel campo della fisica sono ancora lungi dall'essere raggiunti. L'avanzata organizzazione del processo di sviluppo del software dovrebbe essere la chiave del successo per le tecnologie di telecomunicazione future.

Summary

Further Development of Core Technologies for Telecommunications

The tremendous progress seen in the sphere of telecommunications networks and services is based on core technologies such as micro-electronics, optoelectronics, optical fibre technology, transmission technologies, all of which require materials and process engineering of the highest quality. Signal processing is a key technology for efficient and economical transmission. All telecommunications services require a great amount of software in the networks, in the appropriate data bases and in the subscriber terminals. So software is gradually becoming one of the most important technologies for telecommunications. We have already attained a very high standard in the following 'core technologies' for telecommunications: micro-electronics, optoelectronics and optical fibre technology, assembly methods, signal processing, software engineering. We are still in the initial phases of all these technologies but we foresee considerable further progress, as the physical limits are still far away from the levels we have currently attained. The key to future success in telecommunication technologies surely lies in the progressive organization of the software development process.

Einführung

Die Entwicklung von Telekommunikationssystemen wurde in den ersten Jahrzehnten der Einführung von Telefondiensten durch die Hardware beherrscht; mittlerweile gewinnt die Software jedoch immer mehr an Bedeutung.

Beginnend mit elektrischen und elektromagnetischen Bausteinen, wechselte die Entwicklung in den siebziger Jahren zur Elektronik [1] und erreichte in den achtziger Jahren den gesamten Anwendungsbereich der VLSI-Mikroelektronik (VLSI = Very Large Scale Integration) [2]. Vermittlung und Übertragung mit immer höheren Geschwindigkeiten (Mbit/s – Gbit/s – Tbit/s) fordern ständige Verbesserungen der Mikroelektronik, und der Weg führt von der Mikroelektronik zur Nanoelektronik.

Die *Optoelektronik* (OE) erlangte um 1970 [3–6] weltweite Aufmerksamkeit und eroberte in den achtziger Jahren den Bereich der Übertragungstechnik. In den achtziger und neunziger Jahren wurden gewaltige Fortschritte im Bereich der Bauelemente und Systeme erzielt: QW-DFB-Laser (Quantum Well Distributed Feedback Laser) [7], PIN-Detector [8], APD (Avalanche Photo Detector) [9], OEIC (Opto-Electronic Integrated Circuit) [10].

Der Fortschritt bei optischen Wellenleitern (*Glasfasern*) war mehr als beeindruckend [11, 12]. 1968 wurden Dämpfungswerte von 1000 dB/km gemessen, 1970 wurde der sensationelle Wert von 10 dB/km erzielt. 1980 waren die theoretischen Grenzen der Glasfaser aus Quarzglas (SiO_2) praktisch erreicht. Neue Werkstoffe auf der Basis von Fluor [13] könnten in Zukunft die nächste Ära der optischen Übertragung mit extrem geringer Dämpfung eröffnen. Weitere *passive optische Bauelemente* (Teiler, Weichen, Filter, Schalter usw.) wurden immer wichtiger für die Anschlusssysteme in der Telekommunikation: OPAL (Optical Access Line) [14], *optische Vermittlung* [15], OFDM (Optical Frequency Division Multiplexer – optisches Frequenz-Multiplex) [16], WDM (Wavelength Division Multiplex – Wellenlängen-Multiplex) [17].

Der Trend im Bereich der leitungsgebundenen Übertragung geht weiter in Richtung *hoher Geschwindigkeiten* mit TDM (Time Division Multiplex – Zeitmultiplex) und hoher Übertragungskapazität ($\text{bit/s} \times \text{Anzahl der Wellenlängen} = \text{TDM} + \text{WDM}$). Um das Jahr 2000 werden Glasfasern mit Übertragungskapazitäten im Bereich von Tbit/s pro Glasfaser erwartet, wobei OTDM + OFDM eingesetzt werden. Geeignete Sender und Empfänger in Form von OEIC sind das Ziel des weiteren Fortschritts, wozu Hochtechnologien im Bereich der Bauelementherstellung erforderlich sind.

Bei den Halbleitern erwartet man erhebliche Verbesserungen der Geschwindigkeit und der Komplexität; dafür ist zusätzlich eine *Montagetechnologie* (Verbindungstechnologie) auf der Ebene der Leiterplatten und Gestellrahmen erforderlich, welche die steigenden Fähigkeiten der OE- und Mikroelektronik-Chips unterstützt.

Auf der anderen Seite konkurriert die *Signalverarbei-*

tung (Sprache, Ton und Bilder) mit dem Anstieg der Übertragungskapazität durch Kompressionsverfahren zur Verringerung der für Telekommunikationsdienste erforderlichen Bandbreite oder Übertragungsgeschwindigkeit. Diese Aktivitäten begannen ungefähr 1960 und haben einen enorm hohen Stand erreicht (gute Sprachqualität mit 10 kbit/s und Fernsehqualität mit 6 Mbit/s) [18, 19].

Die *objektorientierte Kodierung* verspricht jedoch einen weiteren grossen Fortschritt [20]. Die Kodierung erfolgt durch Algorithmen, die durch Mikroprozessoren und Software ausgeführt werden können. Auch hier zeigt sich die Verlagerung des Schwerpunkts von der Hardware zur Software.

Die Miniaturisierung der Hardware führt zu einer weiten Verbreitung von Computern und damit zu grossen und heterogenen Computernetzen. Um diese Netze verwalten zu können, wird den folgenden Software-Technologien immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt:

- verteilte Rechner
- Technologien zur Verarbeitung von Transaktionen
- objektorientierter Entwurf und Entwicklung
- graphische, Multimedia- und Hypermedia-Anwenderschnittstellen
- Technologien für die virtuelle Realität
- Datenverwaltungsdienste
- Kommunikationsprotokolle mit standardisierten Schichten, die offene oder hardware- und softwarekompatible Systeme ermöglichen
- standardisierte API (Application-Programming Interface) für übertragbare Software

Daher muss die *Software-Technologie* ebenfalls als eine «Kerntechnologie» für die Entwicklung von Telekommunikationssystemen betrachtet werden.

Mikroelektronik

Stand der Technik

Seit der Einführung des ersten integrierten Schaltkreises im Jahr 1960 hat die Mikroelektronik ein Innovationspotential gezeigt, das einzigartig ist im Vergleich zu anderen Technologiezweigen. Dieser Trend scheint sich zumindest in der nächsten Zukunft fortzusetzen. Heute sind der Stand der Technik Halbleiterchips, auf denen mehrere Millionen Transistoren integriert sind und die mit Taktfrequenzen von einigen hundert Megahertz arbeiten, wie man sie beispielsweise in Datenübertragungssystemen mit Datengeschwindigkeiten von 622 Mbit/s findet. Systeme mit 10 Gbit/s sind entwickelt, und die Halbleitertechnik für 40 Gbit/s ist kurz vor der Produktionsreife.

Im Jahr 1993 umfasste der Halbleitermarkt weltweit ein Volumen von mehr als 80 Milliarden Dollar (in Europa mehr als 15 Milliarden Dollar), und es wird erwartet, dass er zum Ende dieses Jahrhunderts auf etwa 175 Milliarden Dollar ansteigen wird. Neben wirtschaftlichen und Wettbewerbsfaktoren werden die Chipkosten hauptsächlich durch technische Parameter bestimmt, wie beispielsweise Technologie, Struktur, Gehäuse und Testkosten. Im allgemeinen

fallen als Folge der grossen Produktionskapazitäten, zusammen mit drastischen Produktionsverbesserungen, die Chipkosten ständig. Eine Reduzierung von 12,5 % pro Jahr scheint realistisch zu sein.

Der Trend der letzten Jahre, komplette Systemfunktionen auf einem einzigen Chip zu integrieren, wird ein Hauptziel der Forschung im Bereich der Mikroelektronik bleiben. Man geht davon aus, dass sich die Komplexität von Chips im Mittel alle 1,5 Jahre verdoppelt (Schlüsselwort: «System auf einem Chip»). Die wichtigsten Halbleitertechnologien sind heute die unipolare CMOS-Technologie (CMOS = Complementary Metal Oxide Semiconductor) sowie die Bipolar- und die gemischte Bipolar-CMOS-Technologie (BiCMOS). Reine PMOS- und NMOS-Schaltkreise (P-channel/N-channel Metal Oxide Semiconductor) spielen keine wichtige Rolle mehr. Bei Telekommunikationsanwendungen wird die Bedeutung von BiCMOS weiter steigen, da nur diese Technologie eine hohe Komplexität, eine grosse Zahl von Anschlüssen, hohe Datengeschwindigkeiten und die Kombination präziser analoger und digitaler Funktionen ermöglicht.

Silizium wird in den nächsten Jahren – oder Jahrzehnten – das wichtigste Halbleitermaterial bleiben, obwohl III-V-Verbindungshalbleiter wie GaAs und InP in Sonderanwendungen, die beispielsweise ein geringes Rauschen, hohe Temperaturen und Strahlungssicherheit benötigen, sowie im Bereich der Optoelektronik das Silizium weiter ersetzen werden. Eine Grossintegration mit III-V-Verbindungshalbleitern stösst jedoch immer noch an die Grenzen des Machbaren. Der Geschwindigkeitsvorteil von III-V-Bauele-

menten gegenüber Silizium-IC (Integrated Circuit) liegt etwa bei einem Faktor 2. Neue Si/SiGe-Transistoren sind in der Geschwindigkeit den GaAs-Bauelementen vergleichbar oder sogar überlegen. Diese Technologie wird demnächst die Produktionsreife erreichen.

Zukünftige Trends

Die Weiterentwicklung der Halbleitertechnologie wird hauptsächlich durch folgende Schritte bestimmt werden:

- Verringerung der minimalen Strukturgrösse
- Ersatz von Diffusion und Implantation durch Epitaxie
- Vergrösserung der Chip-/Wafer-Abmessungen
- erhöhte Anzahl der Verbindungsebenen
- niedrigere Versorgungsspannung
- bessere Ausnutzung der dritten Dimension (vertikale Integration)

Mit Hilfe von verbesserten Produktionseinrichtungen und neuen Herstellungsverfahren wird es möglich werden, sogar noch grössere Halbleiterchips mit noch kleineren Strukturgrössen auf noch grösseren Wafern zu fertigen. Im Jahr 1998 werden Chips mit Strukturgrössen von 0,25 µm und Chipflächen bis zu 625 mm auf 12-Zoll-Wafern hergestellt werden. Die optische Lithographie (ferne UV-/Phasenverschiebungsmasken) erlaubt Strukturgrössen von bis zu 0,18 µm. Bei kleineren Abmessungen müssen Röntgen- oder Elektronenstrahl-Lithographie eingesetzt werden. *Figur 1* zeigt die Entwicklung der CMOS-Technologien von 1991 bis 2007.

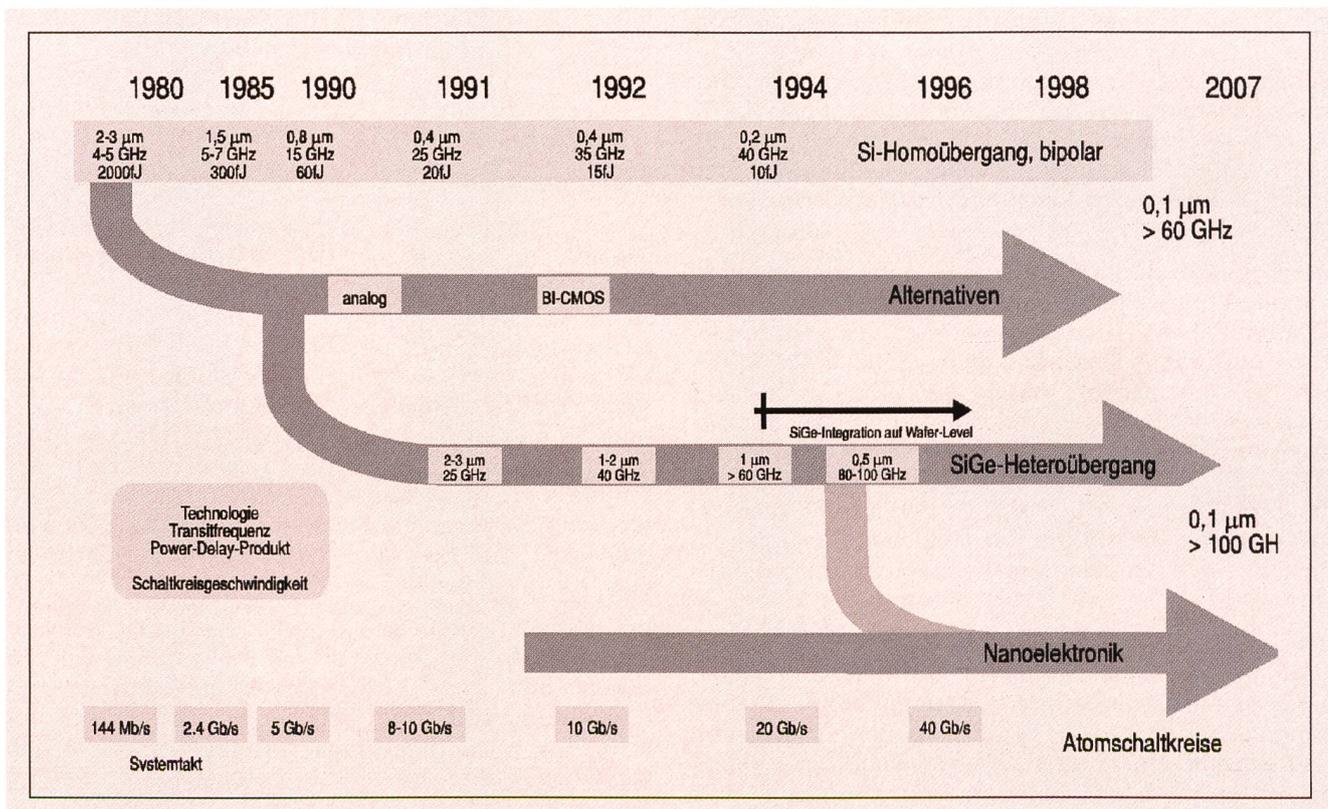


Fig. 1 Trends in der Bipolartechnologie

Die maximal nutzbare Chipgröße wird hauptsächlich durch die Defektdichte auf dem Chip und die thermischen Eigenschaften des Gehäuses bestimmt. Verbesserte Planarisierungsverfahren und Metallisierungssysteme werden bis zu sechs Verbindungsebenen mit Durchkontaktierungen erlauben. Als Folge der kleineren Abmessungen müssen jedoch auch die Stromdichte und darüber hinaus die heute allgemein verwendete Versorgungsspannung von 5 V auf rund 3,3 V und später auf ca. 1,5 V reduziert werden, wodurch neue Standards und Schnittstellenschaltungen erforderlich werden. Eine echte dreidimensionale Integration (mehrere Schichten mit aktiven Elementen) wird im nächsten Jahrhundert zu einer drastischen Erhöhung der Komplexität führen.

Ausblick

Die Grenzen der «herkömmlichen» Technologien der Mikroelektronik bezüglich der Komplexität und der Taktfrequenzen werden höchstwahrscheinlich Ende dieses Jahrhunderts erreicht sein. *Figur 2* zeigt die Entwicklung der Integrationsdichte und der Geschwindigkeit von integrierten Schaltungen von 1990 bis zum Jahr 2000. Die wichtigsten Vorteile der Si/SiGe-Technologie werden jedoch erst im Bereich der «Nanoelektronik» sichtbar werden, welche die technischen Möglichkeiten drastisch erweitern wird. Der Schlüssel zu solchen Verbesserungen sind das präzise, selektive epitaxiale Abscheiden (Molekularstrahl-Epitaxie) und die Strukturierung einzelner atomarer Schichten. Diese extrem dünnen Schichten werden die Ausnutzung von Quanteneffekten erlauben, wie beispielsweise Quantenpunkte und Quantenleiter. Halbleiterspeicher mit nur etwa 100 Elektronen pro Bit wurden bereits verwirklicht. Extrem hohe Schaltkreiskomplexitäten von mehreren hundert Transistoren pro Chip (16 Gbit RAM) und mit Taktfrequenzen von mehr als 100 GHz sind dann das Ziel für das nächste Jahrzehnt.

Optoelektronik

Optoelektronische Bauelemente sind unentbehrliche Schlüsselemente für die Telekommunikation. Die schnelle Entwicklung im Bereich der III-V-Halbleitertechnologie im letzten Jahrzehnt hat hochentwickelte Netze und Übertragungssysteme mit immer höherer Kapazität ermöglicht. Zukünftige Entwicklungen werden Querverbindungs- und Vermittlungsfunktionen mit optischen Bauelementen umfassen, und es werden vollständig optische, transparente und dienstunabhängige Durchschaltensysteme machbar sein. Der quaternäre Verbindungshalbleiter InGaAsP/InP ist das Ausgangsmaterial für diese Bauelemente, da er für die optischen Fenster der Glasfaser bei 1300 nm oder 1550 nm ideal ist. Für Spezialzwecke wird zusätzlich der neue Verbindungshalbleiter InGaAlAs verwendet. Der Schlüssel zu diesen Bauelementen sind sehr fortschrittliche Technologien des Kristallwachstums, wie GSMBE (Gas Source Molecular Beam Epitaxy) und MOVPE (Metal Organic Vapour Phase Epitaxy), zusammen mit Lithographieverfahren ultrahoher Präzision und Trockenätzverfahren, die bis in die Größenordnung von Nanometern beherrscht werden [21].

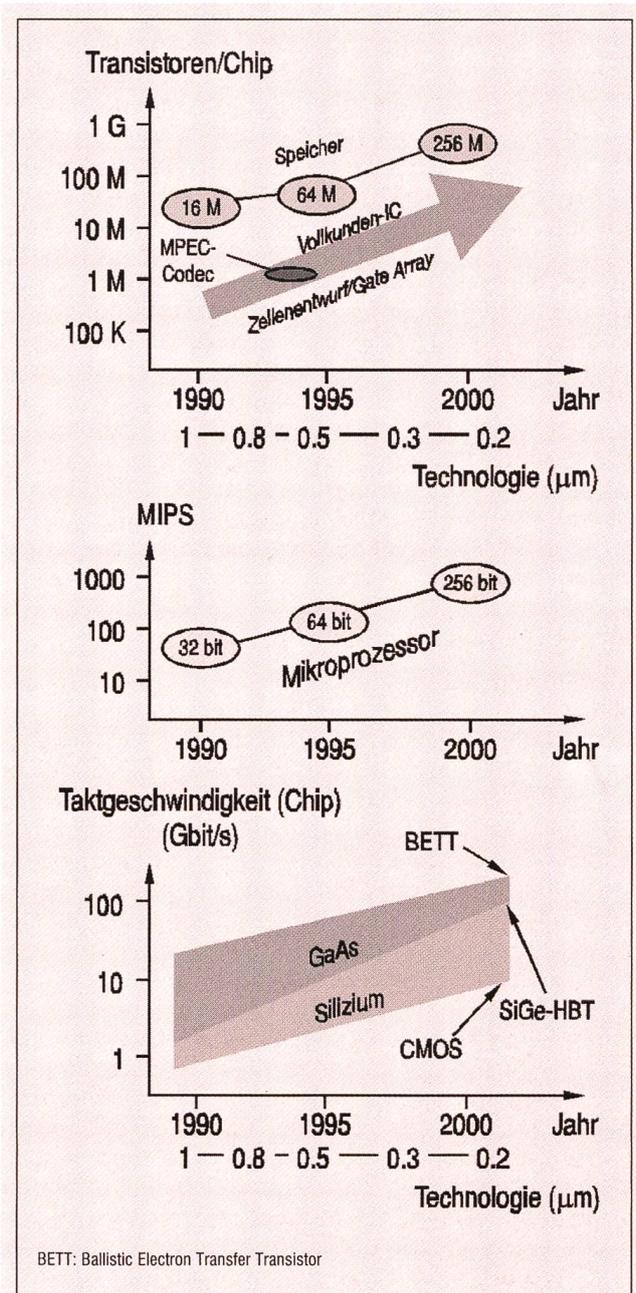


Fig. 2 Weiterentwicklung der Mikroelektronik

Diskrete Lichtquellen

Zurzeit werden direkt intensitätsmodulierte (IM) Laser als Lichtquelle für Glasfaser-Telekommunikationssysteme verwendet. Die ersten bei 1300 nm arbeitenden InGaAsP/InP-Laser wurden 1977 beschrieben [22], und die ersten 1-Moden-DFB-Laser (DFB = Distributed Feedback) mit 1550 nm wurden 1981 erwähnt [23]. Seither hat die Weiterentwicklung der Halbleitertechnologie eine ständige Verbesserung der Laserleistungsfähigkeit gebracht. Heute wird die MQW-Technologie (MQW = Multi Quantum Well) mit den oben beschriebenen hochentwickelten Epitaxieprozessen beherrscht, und sie ist die Grundlage für den Entwurf von Hochleistungslasern, die speziell an die System-spezifikationen angepasst sind [24].

Ein typisches Beispiel für die Leistungssteigerung durch die MQW-Technologie ist die Verbreiterung der Laserlinienbreite durch Modulation (Chirp). «Herkömmliche» Laser, die mit 10 Gbit/s moduliert werden, zeigen typischerweise eine Linienbreite von ungefähr 1,2 nm (20 dB Abfall), wogegen dieser Wert bei MQW-DFB-Lasern nach dem Stand der Technik auf 0,24 nm reduziert werden kann. Dies ist eine sehr wichtige Leistungsverbesserung, da Chirp zusammen mit der Dispersion der Glasfaser die mit direkt intensitätsmodulierten Lasern erreichbare Übertragungsentfernung begrenzt. Die in *Figur 3* gezeigte BRS-Laserstruktur (BRS = Buried Ridge Stripe) ist ein guter Kompromiss zwischen den Anforderungen an die Herstellbarkeit und einer angemessenen Leistung der Bauelemente. Es wurde gezeigt, dass diese Struktur für eine digitale Direktmodulation bis zu 10 Gbit/s sowie für eine direkte Modulation mit Analogsignalen bis zu 860 MHz für Fernsehverteilendienste eingesetzt werden kann.

Monolithisch integrierte Lichtquellen

Monolithisch integrierte Laser/Modulatoren sind der nächste Schritt zu weiteren Leistungsverbesserungen von Laserlichtquellen (*Fig. 4*). In diesem Fall arbeitet der MQW-DFB-Laser im Dauerbetrieb, und das Licht wird durch einen zweiten Abschnitt moduliert, wozu der Effekt der Elektroabsorption (EA) ausgenutzt wird. Bei dieser Lösung wird die Verbreiterung der Laserlinien minimiert. Jede Intensitätsmodulation verursacht jedoch einen Wellenlängen-Chirp, was auf die damit verbundene Phasenmodulation zurückzuführen ist. Wird aber ein spezieller quantenmechanischer Effekt (Quantum-confined Stark Effect) angewendet, ist die Kopplung zwischen Intensität und Phasenmodulation beeinflussbar, was wir zu unseren Gunsten ausnutzen können. Als Ergebnis ist die mit solchen optimierten Modulatoren maximal erreichbare Übertragungsentfernung sogar grösser als die theoretische Grenze für chirpfreie Übertragung. Durch Einsatz eines InGaAs/InGaAsP-EA-Modulators mit Rippenwellenleiter konnten wir die Übertragung mit 10 Gbit/s bei einer BER = 10⁻¹⁰ über eine Standard-1-Moden-Glasfaser von 101 km Länge erreichen [25]. Monolithisch integrierte MQW-DFB-Laser-/Modulator-PIC arbeiten mit einer Ausgangsleistung im Milliwattbereich, und es wird ein Extinktionsverhältnis von 25 dB bei 10 Gbit/s erzielt, wobei die angelegte Spannung nur 3 V beträgt [26].

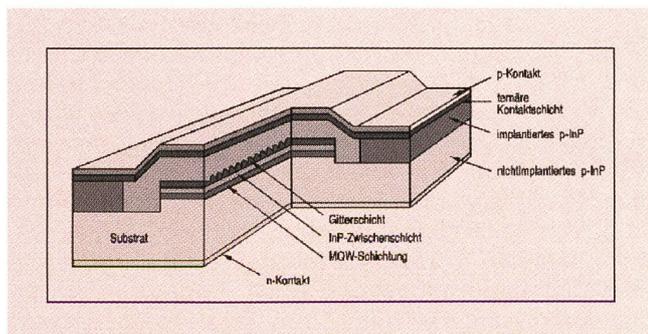


Fig. 3 Querschnitt eines BRS-DFS-Lasers

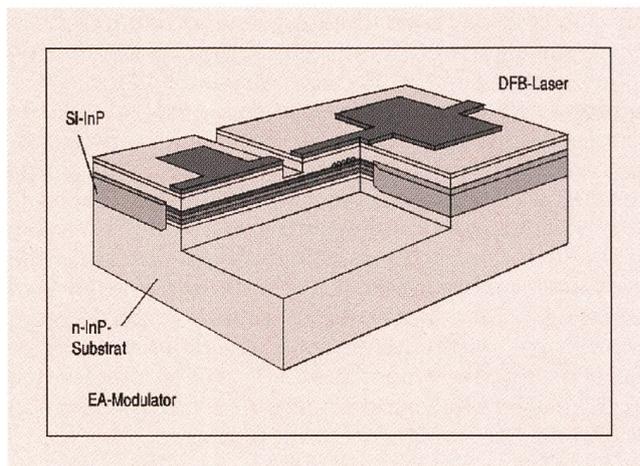


Fig. 4 Integrierter Laser und externer Absorptionsmodulator

Das obige Beispiel zeigt einen allgemeinen Trend bei InP-Lasern und in der InP-Technologie: 1-Funktions-Chips wie beispielsweise direkt modulierte Laser werden heute beherrscht, obwohl die fortschreitende Technologie weitere Leistungsverbesserungen und spezialisierte Entwürfe für besondere Systemanwendungen zulassen wird. Mehrfunktions-Chips mit geringer Komplexität, aber mit verbesserter Leistungsfähigkeit werden in zunehmendem Mass verfügbar sein. Beispielsweise sind derzeitige 1-Funktions-MQW-DFB-Laser mit direkter Modulation physikalisch auf eine Übertragungsgeschwindigkeit von ca. 10–16 Gbit/s begrenzt. Mehrfunktions-Chips werden diese Grenze überschreiten, entweder durch Integration mehrerer Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen (oder abstimmbarer Laser) und zusätzlicher Kombination von Wellenleitern auf dem Chip (WDM-Lösung) oder durch Anwendung des OTDM.

Monolithisch integrierte Empfänger-OEIC

Diese sind der nächste Schritt in der technologischen Weiterentwicklung bei Empfängern und werden die heutigen Standard-Empfängerschaltungen in Hybrid-Technologie ersetzen. Wir erwarten nicht nur eine Kostenreduktion durch die monolithische Integration, sondern wegen der geringeren parasitären Kapazitäten auch eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit.

Das in *Figur 5* gezeigte Integrationskonzept verwendet InGaAs/InAlAs-Schottky-Gate-HEMT (High Electron Mobility Transistor) auf der Basis von InP für die monolithische Integration des kompletten Vorverstärker-Schaltkreises. Der Photodetektor ist eine InGaAs/InP-PIN-Diode. Wegen der sehr hohen Beweglichkeit und Geschwindigkeit der Elektronen im InGaAs-Kanal (im Vergleich zu GaAs und Si) wird eine sehr hohe Steilheit von mehreren hundert mS/mm erreicht, wodurch sich diese HEMT sehr gut für Vorverstärker mit hohen Frequenzen und hoher Empfindlichkeit eignen.

Die Anordnung der Epitaxieschichten der HEMT und PIN-Dioden besteht aus zwei Schritten, die MOVPE verwenden. Der pn-Übergang der Diode wird durch

Diffusion hergestellt. Der gesamte Fertigungsprozess umfasst ungefähr zwanzig Technologieschritte von hoher Präzision. Der fertige InGaAs/InAlAs/InP-PIN-HEMT-Empfänger-OEIC enthält einen kompletten Transimpedanzverstärker mit einer PIN-Diode, vier HEMT, sechs Widerständen, zwei Kondensatoren und acht Pegelschieberdioden. Erste Tests zeigen eine 3-dB-Bandbreite von mehr als 5,5 GHz und eine Verstärkung von 14 dB bei 50 Ω Last sowie ein sehr deutliches Augendiagramm bei 10 Gbit/s. Die erwartete Empfindlichkeit bei 10 Gbit/s beträgt 21,4 dBm [10]. Wie bereits bei den Lichtquellen diskutiert, geht die Entwicklung bei den Empfängern ebenfalls von den beherrschten *1-Funktions*-Detektoren zu *Mehrfunktions*-Empfängern, die schliesslich nicht nur elektronische, sondern auch optische Funktionen enthalten, beispielsweise in Form eines WDM- oder OTDM-Empfängers.

Montageverfahren

Montageverfahren sind wichtig seit dem Beginn der Entwicklung der Telekommunikation. Heute gehören diese Verfahren, wie die Opto- und die Mikroelektronik, in den High-Tech-Bereich.

Multichip-Module (MCM)

MCM sind anwendungsspezifische Bauelemente, die unterschiedliche Silizium-Technologien und GaAs-Bauelemente auf einem miniaturisierten Verbindungsträger kombinieren können und als Weiterentwicklung der herkömmlichen gedruckten Leiterplatten zu betrachten sind. Sie haben im Bereich der Telekommunikation folgende Vorteile:

- Reduzierung des Volumens um den Faktor 4 bis 6, die sogar den Si-Integrationsgrad übersteigen kann
- Reduzierung des Gewichts (sehr wichtig bei Mobilkommunikation)
- Erhöhung der Arbeitsfrequenz (bis zu 60 GHz) und der Signalgeschwindigkeit (über 40 Gbit/s)
- Reduzierung des Leistungsverbrauchs (längere Batterie-Lebensdauer)
- Modularität (leichtes Hinzufügen von Systemfunktionen bei Nachfrage des Marktes)
- kostengünstig auf Systemebene

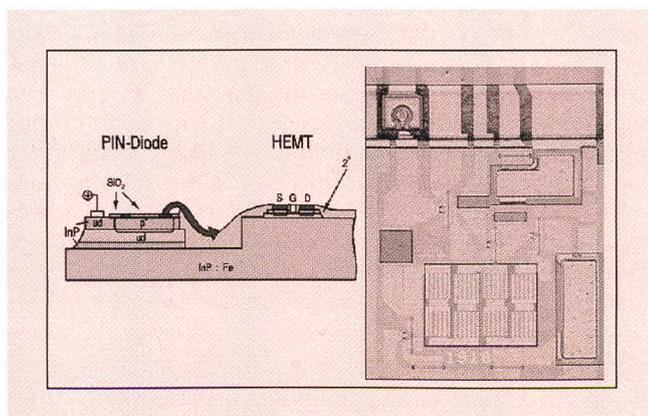


Fig. 5 Integrierter OE-Empfänger

Figur 7 zeigt ein Beispiel des ausgezeichneten Hardware-Potentials der MCM im Vergleich zu einer Lösung in herkömmlicher Technologie beim Multiport-Crossconnect von Alcatel. Durch Kombination von vier Vermittlungsbaulementen in einem MCM konnten die Aufsteckleiterplatte und die zusätzlichen Schaltungen leicht auf einer Systemleiterplatte untergebracht werden.

Optische Verbindungen

Bei komplexen Telekommunikationssystemen, die zurzeit bei Alcatel entwickelt werden, wie beispielsweise ATM-Systeme oder Crossconnects, muss ein beträchtlicher technischer Aufwand getrieben werden, um Übersprechen zwischen elektrischen Verbindungen sowie elektromagnetische Störungen und Strahlungen zu vermeiden. Bei zukünftigen Produkten mit erhöhten Datenraten werden diese Probleme vermehrt auftreten. Durch den Ersatz von elektrischen Verbindungen durch optische Verbindungen könnten nicht nur die vorhandenen Probleme gelöst werden, sondern auch neue Freiheitsgrade beim Systementwurf geboten werden. Die wichtigsten Vorteile optischer Verbindungen sind:

- fast kein Übersprechen wegen der sehr guten Wellenleitung
- keine elektromagnetischen Strahlungen oder Störungen
- geringe Signaldämpfung, unabhängig von der Datenrate
- hohe Bandbreite
- geringere Abmessungen und geringeres Gewicht im Vergleich zu Koaxialkabeln

Unterschiedliche Ebenen der optischen Verbindungen müssen betrachtet werden (angeführt in der voraussichtlichen Reihenfolge der Einführung):

- Gestellrahmen zu Gestellrahmen
- innerhalb der Gestellrahmen (Baugruppenträger zu Baugruppenträger)
- Leiterplatte zu Leiterplatte über Rückwandplatine
- auf der Leiterplatte (Chip zu Chip)
- auf dem Chip

Um die Kosten pro Verbindung zu reduzieren, werden Mehrkanalkonfigurationen folgen. Figur 6 zeigt ein Beispiel für einen Mehrkanalsender, der aus einem Siliziumsender mit zehn präzise geätzten V-förmigen Vertiefungen für die passive Glasfaserjustierung und dem Dünnschichtanschluss besteht. Die Treiber-IC sind drahtgebondet, während die Mehrkanal-Laseranordnung auf demselben Träger durch Flipchip-Bonden aufgebracht ist. Wegen der Treiber-IC ist dieses Modul auf 4 \times 155 Mbit/s begrenzt, die nächste Generation wird jedoch für 10 \times 2,5 Gbit/s entwickelt werden. Die Konvertermodule werden über Glasfaserbandkabel und Mehrkanal-Glasfaserstecker angeschlossen. Durch den Einsatz optischer Verbindungstechniken können die Packungsdichte und die Übertragungskapazität im Vergleich zu herkömmlichen elektrischen Verbindungen um mehr als den Faktor 100 erhöht werden. Daher wird der Verbindungspass nicht länger bestehen.

Passive integrierte optische Bauelemente

Neben preiswerten optoelektronischen Sendern und Empfängern ist eine neue Generation optischer Bauelemente erforderlich, wie beispielsweise integrierte Leistungsteiler und Wellenlängen-Multiplexer, welche die zurzeit verwendeten Bauelemente mit angeschmolzener Glasfaser ersetzen werden, um eine bessere Reproduzierbarkeit und geringere Kosten bei der Massenproduktion zu erreichen.

Die integrierte Optik mit Quarzglas auf Silizium ist die Schlüsseltechnologie für solche passiven optischen Bauelemente. Die grossflächigen Substrate erlauben die Ausführung sehr komplexer optischer Schaltkreise oder alternativ die Herstellung von Hunderten einfacher Bauelemente pro Wafer. Die Prozesse, wie beispielsweise Photolithographie, Abscheidung, Ätzen, Glühen usw., sind kompatibel zu den in der Silizium-Halbleiterindustrie entwickelten Prozessen und verwenden dieselben Einrichtungen, die für den Einsatz bei Silizium-Wafern optimiert wurden. Die durch Abscheidung von Quarzglas gebildeten Wellenleiter können mit sehr geringem Verlust hergestellt und sehr gut an die Glasfasern angepasst werden, wodurch sich die Verluste an den Schnittstellen reduzieren. Silizium erlaubt die Entwicklung von Glasfaserankopplungen mit passiver Justierung, wozu in das Siliziumsubstrat eingätzte Gruben zur Justierung der Glasfasern verwendet werden. Schliesslich kann Silizium als Substrat für die Hybridisierung der Elektronik und der Wellenleiter-Bauelemente zusammen mit den Justiervertiefungen für die Glasfaser verwendet werden, wodurch komplexe optoelektronische Teilsysteme erreicht werden.

Signalverarbeitung

Die Signalverarbeitung gehört ebenso zu den klassischen Schlüsseltechnologien der Telekommunikation wie Modulations-, Entzerrungs-, Filter-, Kompressions- und Korrelationsverfahren. Eine Kombination von Modulation, Kanalkodierung, Synchronisation und Fehlerkorrektur – «kodierte Modulation» genannt –, die im GSM (Global System for Mobile Communications) eingesetzt wurde, wird in Kombination mit Verschlüsselungsverfahren für VoD (Video on Demand) auf Koaxialkabeln und verdrehten Doppelleitungen verwendet werden. Darüber hinaus öffnet die Digitalisierung den Weg für eine Quell- und eine Kanalkodierung basierend auf der Informationstheorie von Shannon [27]. Die Kompression von Sprach- und Videosignalen hat in den letzten zehn Jahren unerwartet grosse Fortschritte gemacht, und die Grenzen sind noch lange nicht erreicht.

Sprachverarbeitung

Technologien der Sprachverarbeitung umfassen:

- Sprach- und Sprechererkennung
- automatische Umwandlung von Sprache in Text und von Text in Sprache
- Sprachsignal-Kompression

Die *Spracherkennung* hat bereits einen hohen Stand erreicht. Es können bereits automatisch erkannt werden:

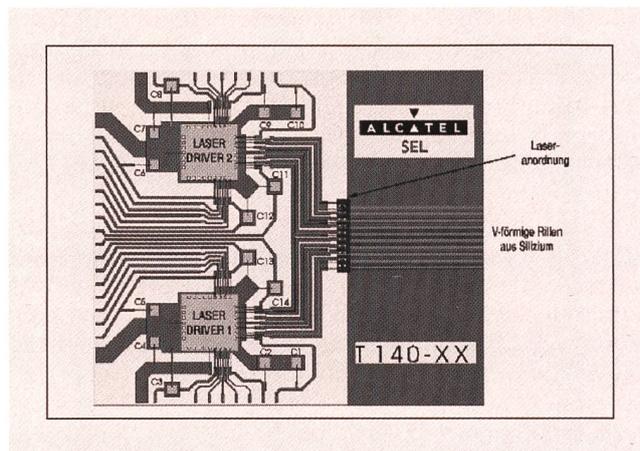


Fig. 6 Schematische Darstellung der Silizium-Mutterplatte für einen Mehrkanalsender (Abmessungen: 12,5 x 14,5 mm)

- sprecherabhängig mehrere tausend Wörter
- sprecherunabhängig etwa 1000 Wörter
- mehr als 100 Wörter mit hoher Erkennungsrate in stark gestörter Umgebung

Diese Technologie wird an Bedeutung zunehmen für den Bereich der «Sprachkommunikation mit Endgeräten», beispielsweise zur Benutzerführung, für sprachgesteuerte Systeme usw. bis hin zu automatischen Sprachübersetzungen. Die *Sprachsignalkompression* wird heute im Bereich der digitalen Mobilkommunikation eingesetzt (GSM-Standard 13 kbit/s für eine Bandbreite des Analogsignals von 3,4 kHz), und die «Kodierung mit halber Übertragungsgeschwindigkeit» (6 kbit/s) wird zurzeit standardisiert. Es wird erwartet, dass mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von unter 4 kbit/s ebenfalls eine gute Sprachqualität erzielt werden kann.

Komprimierung von Videosignalen

Für den Austausch von Fernsehprogrammen zwischen Studios wurde vom CCITT (Comité consultatif international télégraphique et téléphonique; heute: ITU-T, International Telecommunications Union) ein PCM-Videosignal mit 216 Mbit/s standardisiert. Eine einfache PCM-Übertragung mit ungefähr 140 Mbit/s liefert eine ausgezeichnete Fernsehqualität. Lange Zeit schien 34 Mbit/s die untere Grenze für die Übertragung von Fernsehprogrammen mit guter Qualität zu sein. Heute ist es bereits möglich, ein Videosignal mit 8 Mbit/s zu übertragen, dessen Bildqualität so gut rekonstruiert wird, dass selbst ein Experte es nicht vom Original unterscheiden kann. Ungeschulte Teilnehmer sind sogar nicht einmal in der Lage, die Verschlechterung eines Fernsehprogramms zu erkennen, wenn die Übertragung mit nur 2 Mbit/s erfolgt, vorausgesetzt, es wird ein optimierter Kodierungsalgorithmus angewendet (z. B. MPEG – Motion Picture Expert Group).

Der für die obengenannten Übertragungsgeschwindigkeiten angewendete Algorithmus beruht hauptsächlich auf Transformations-Kodierung (z. B. diskrete

Kosinus-Transformation), bedingter Bildregenerierung, Bewegungsvektorübertragung und Optimum-Kodierungs-Algorithmen, welche die statistischen Eigenschaften des Signals und die visuelle Wahrnehmung des menschlichen Beobachters ausnutzen (Irrelevanzreduktion bis zur Verzerrungsgrenze) [28].

In den Forschungslabors wird jedoch intensiv an objektorientierten Kodierungsverfahren gearbeitet [29] («fraktale Kodierung»), bei denen die «Semantik» der Bilder ausgenutzt wird, um höchste Komprimierungsraten zu erzielen. Die Wavelets-Kodierung ist ein anderes vielversprechendes Verfahren, um weitere Fortschritte zu erzielen [30].

Die Kombination der erwähnten Kompressionsverfahren wird mit grosser Wahrscheinlichkeit in Zukunft weitere bedeutende Fortschritte liefern – im Wettstreit mit dem Anstieg der Übertragungsgeschwindigkeiten und den sinkenden Übertragungskosten in modernen Übertragungssystemen. Für viele Anwendungen wird die Kompression der Sprach- und Videosignale von grosser Bedeutung bleiben (Speicherung von Signalen, Funkübertragung), aber dort, wo man es sich leisten kann, sollte die einfache PCM-Übertragung verwendet werden, um den maximalen Abstand des rekonstruierten Signals von der Verzerrungsgrenze zu erhalten. Hierdurch ergibt sich die grösste Unempfindlichkeit gegen Störungen und Rauschen, vorausgesetzt, die Übertragungskosten rechtfertigen dies.

Software-Technologie

Aktueller Stand der Technik und Trends

Obwohl die Software-Technologie noch sehr jung ist, hat sie bereits eine dramatisch verlaufende Geschichte, die durch folgende Trends gekennzeichnet ist [31]:

In einer grossen Zahl von Produkten der Elektronikindustrie ist Software der kostenbestimmende Faktor und – was noch wichtiger ist – der Schlüsselfaktor für den Wettbewerb. In den letzten Jahrzehnten ist der Prozentsatz des Software-Anteils von Produkten und Diensten ständig gestiegen. Die Komplexität der Software steigt ebenfalls ständig an, beispielsweise läuft die komplizierteste Software in Vermittlungssystemen, in denen der Entwicklungsaufwand für die entsprechende Software bei bis zu 6000 Mannjahren liegt.

Der Software-Markt ist gekennzeichnet durch eine wachsende Internationalisierung, eine Vielzahl von Varianten einschliesslich nationaler Versionen, eine sinkende Dauer der Software-Lebenszyklen (zurzeit zwei Jahre von der Marktanalyse oder ein Jahr von der Kenntnis der Anforderungen bis zur Auslieferung des Produkts) sowie durch die Anforderung, dass neue Software-Produkte in vorhandene Software-Systeme integriert werden müssen.

Die Struktur von Software-Systemen hat sich drastisch geändert: von grossen monolithischen Anwendungen, die in den fünfziger Jahren vollständig von Hardware-Herstellern gefertigt wurden, zu heutigen Systemen, die von vielen unterschiedlichen Herstellern erstellt werden, beispielsweise von Hardware-

Herstellern, von Herstellern von Anwendungs-Software und, was am wichtigsten ist, von Middleware-Software-Herstellern. Der Beitrag der Hardware-Hersteller ist ständig gefallen. Dieser Trend hat zu offenen, verteilten und übertragbaren Systemen geführt, die wiederum zu einer grossen und wachsenden Zahl von im Wettstreit stehenden und sich ergänzenden De-facto- und De-jure-Standards sowie ihren zugehörigen Institutionen geführt hat. Die Erstellung dieser Software-Standards entwickelte sich von einer retroaktiven zu einer proaktiven Arbeitsweise, um offene, verteilte und übertragbare Systeme zu ermöglichen. Offene Systeme erfordern bezüglich der Formate und Protokolle standardisierte Schnittstellen, um eine Zusammenarbeit zu gewährleisten. Übertragbare Systeme benötigen standardisierte API (Application Programming Interface) bezüglich der Funktionsaufrufe, um eine Übertragbarkeit der Software sicherzustellen. Verteilte Systeme beziehen sich auf Client/Server-, Peer-to-Peer-, Manager/Agent- und weitere Architekturen.

Zusammen mit den Software-Systemen veränderten sich die Software-Technologien selbst. Heute steht eine Fülle von spezialisierten Software-Technologien zur Verfügung: Multi-User/Multi-Tasking-Betriebssysteme, verteilte Rechnerumgebungen, Benutzerschnittstellen mit Fenstertechnik, Multimedia- und Hypermedia-Technologien, Datenbanktechnologien, Objektorientierung, künstliche Intelligenz, neuronale Netze, Kommunikationstechnologie, Technologien zur Verarbeitung von Transaktionen, Programmiersprachen, Sicherheitstechnologien usw.

Benutzerschnittstellen, die hauptsächlich durch Software bereitgestellt werden, sind der entscheidende Faktor für einen effektiven und wirksamen Betrieb und Einsatz von Telekommunikationsnetzen und -diensten. Wichtige Punkte sind die Erlernbarkeit, eine leichte Bedienbarkeit und der Durchsatz. Die Komplexität der Benutzerschnittstellen steigt schnell an (bereits heute Tausende von Formularen). Systeme mehrerer Hersteller werden unter einer gemeinsamen Benutzerschnittstelle integriert. Benutzerschnittstellen entwickeln multifunktionelle Eigenschaften, durch die ein Zugriff auf alle Aspekte von Telekommunikationssystemen möglich ist. Die Technologie der Benutzerschnittstellen unterstützt in steigendem Mass die Zusammenarbeit und die Kooperation mit abgesetzten Einheiten. Trotz dieser dramatischen Entwicklung sind die beiden folgenden elementaren Probleme der Software-Technologie noch nicht gelöst:

- Bis heute existiert noch keine vollständige, allgemeine und integrierte Technologie für die Produktion und Wartung grosser und komplexer Software-Systeme mit den erforderlichen hohen Standards der Qualität und Zuverlässigkeit.
- Die Software-Wartung (Fehlersuche, Software-Übertragung auf andere Systeme, Software-Aufrüstung) ist immer noch der bestimmende Kostenfaktor für grosse Software-Systeme.

Vorhersage zukünftiger Trends

Zukünftige Trends werden unter anderem bestimmt durch die Fortführung einiger bestehender Trends

Lösungen	Technologien zur Wiederverwendung	Bibliotheken erstellen	Software-Architekturen zur Wiederverwendung	Modellierung und Simulation	Re-Engineering	formale Methoden
Herausforderungen						
enormer Anstieg der Produktivität	X	X	X			
Beherrschung der wachsenden Komplexität		X	X	X		
externe Qualitätsanforderungen				X	X	X
Bedeutung	Dringend benötigte Lösungen: Zurzeit nicht verfügbar! Zu entwickeln durch intensive Forschung			Wichtig über einen längeren Zeitraum		

Fig. 7 Lösungen für derzeitige Softwareherausforderungen

und durch neue (mehr oder weniger erwartete) Lösungen für bekannte Herausforderungen und deren zukünftige Lösungen. Die folgenden bisherigen und gegenwärtigen Trends werden wahrscheinlich in Zukunft fortbestehen:

- Die Bedeutung der Software als wesentlicher, bestimmender Faktor für den Wettbewerb wird ständig weiter zunehmen.
- Der Prozentsatz der Software innerhalb der Produkte und Dienste wird ebenfalls beträchtlich steigen.
- Die Komplexität der Software wird zweifellos wachsen.
- Der vorhandene Trend der Marktcharakteristiken wird wahrscheinlich anhalten.
- Der aktuelle Trend für die Struktur von Software-

Systemen wird weiter in Richtung offener, verteilter und übertragbarer Systeme anhalten.

- Vorhandene Technologien werden verbessert und spezialisiert, und neue Technologien werden aufkommen.
- Der bestehende Trend bei der Benutzerschnittstelle wird anhalten.

Figur 7 zeigt die Verbindung von drei ungelösten Problemen zu Lösungsansätzen, von denen erwartet wird, dass sie zusammen mit Programmibliotheken einen Beitrag für die Zukunft liefern. Zurzeit sind keine überzeugenden Lösungen verfügbar. Daher müssen sie in intensiver (kooperativer) Forschung gefunden werden. Zusätzlich sind formale Verfahren zur Entwicklung und Verifizierung von Software langfristig relevant, wenn sie einen Durchbruch erleben.

Bibliographie

- [1] Shockley, W.: The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistor. Bell System Technical Journal, Nr. 28, 1949, S. 435.
- [2] Kilby, J. S.: U.S. Patent 3,138,743 (1959).
- [3] Hayashi, W.; Panish, M. B.; Foy, P. W.; Sumski, S. M.: Junction lasers which operate continuously at room temperature. Appl. Phys. Letters, Nr. 17, 1970, S. 109-111.
- [4] Kao, K. C.; Hockham, G. A.: Dielectric-fibre Surface Waveguides for Optical Frequencies. Proc. IEE, Band 113, Nr. 7, Juli 1966, S. 1151-1158.
- [5] Börner, M.: Mehrstufiges Übertragungssystem für in Pulsmodulation dargestellte Nachrichten. DBP, Nr. 1254513 vom 21. Dezember 1966.
- [6] Ohnsorge, H.: Neue Möglichkeiten für Nachrichtensysteme auf der Basis des Laser-Glasfaserkanals, ntz-Report 17, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1973.
- [7] Dütting, K.; Idler, W.; Wiedemann, P.: 10 Gbit/s MQW-DFB laser/monitor PICs for low cost high speed laser modules. Electron. Lett. 29, 24, 1993, S. 2145.
- [8] Zielinski, E.; Kuebart, W.; Schilling, M.; Hildebrand, O.: Very High Speed and Very Large Tuning Range Optoelectronic Components. Proc. 6th World Telecommunication Forum, Teil 2, Genf, Schweiz, Band 1, 1991, S. 121-125.
- [9] Kuebart, W.; Eisele, H.; Scherb, J.; Kimmerle, J.; Wiedemann, P.; Körber, W.: Continuous Graded 10 Gb/s Planar InGaAs/InP SAGM-APD Grown by LP-MOVPE. Proc. 17th ECOC & 8th IOOC 1991, Paris, Frankreich, Beitrag TuC 5-2, S. 253-256.
- [10] Kuebart, W.; Reemtsma, J. H.; Grosskopf, H.; Gyuro, I.; Kaiser, D.; Konrad, H.; Gross, H.; Grotjahn, F.; Eisele, H.: Monolithically Integrated 10 Gbit/s InP-Based Receiver OEICs: Design and Realisation. Proc. 19th ECOC 1993, Montreux, Schweiz, Beitrag TuP 6.4, S. 305-308.
- [11] Kapron, F. P.; Keck, D. B.; Maurer, R. D.: Radiation losses in glass-optical waveguides. Instn. Electr. Engrs. Conference Publication 71, 1970, S. 148-153.
- [12] Moriyama, T. et al. (Fujikura & ECL/NTT): Fabrication of ultra-low-OH content optical fibres with VAD method. Proc. of the 6th ECOC, York, UK, Sept. 1980, S. 18-21.
- [13] Goodman, C. H. L.: Devices and materials for 4 m-band fibre-optical communication. Solid-State and Electron. Devices, Band 2, Nr. 5, Sept. 1978, S. 129-137.
- [14] Tenzer, G.: The introduction of optical fibre in

- the subscriber loop in the telecommunication networks of the DBP Telekom. IEEE Communications Magazine, März 1991, S. 36–49.
- [15] *Burnett, J. M.; Smith, D. W.*: Future switching requirements for telecommunication networks: Challenges for photonics. Proc. ECOC '93, Montreux (CH), 1993, Band 1, S. 38–44.
- [16] *Spirit, D. M.; Blanc, L. C.*: Optical time division multiplexing for future high-capacity network applications. BT Technol. J., Band 11, Nr. 2, 2. April 1993.
- [17] *Brackett, C. A.*: Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications. IEEE J. Select Areas Commun., Band SAC-8, Nr. 6, August 1990, S. 948–964.
- [18] *Noll, P.*: Speech Coding for Communications. Proc. Eurospeech, Berlin, 1993.
- [19] *Hoffmann, T.; Müller, D.; Vogt, C.*: Video Compression for Multimedia Communication. Electr. Comm., IV 1993.
- [20] *Rinaldo, R.; Zakhor, A.*: Inverse Problem for Two-dimensional Fractal Sets Using the Wavelet Transform and the Moment Method. IEEE ICASSP, San Francisco, März 1992, IV-665.
- [21] *Hildebrand, O.; Erman, M.*: Entwicklung optoelektronischer Bauelemente bei Alcatel. Elektrisches Nachrichtenwesen, 4. Quartal 1992, S. 12–21.
- [22] *Hsieh, J. J.; Shen, C. C.*: Appl. Phys. Lett., 30 (1977) 429.
- [23] *Utaka, K.; Akiba, S.; Sakai, K.; Matsushima, Y.*: Electron. Lett., Nr. 17, S. 961–963, 1981.
- [24] *Speier, P.*: Proc. InP and related materials, Cardiff, S. 179–183 (1991).
- [25] *Zielinski, E.; Baums, D.; Haisch, H.; Klenk, M.; Kühn, E.; Satzke, K.; Schilling, M.*: Proc. InP and related materials, St. Barbara (1994).
- [26] *Schilling, M.; Baums, D.; Haisch, H.; Klenk, M.; Kühn, E.; Satzke, K.; Zielinski, E.*: Proc. InP and related materials, Cardiff, S. 5–8 (1993).
- [27] *Shannon, C. E.*: A Mathematical Theory of Communication. Bell System Tech. J., Band 27, 1948, Teil I, S. 379–423, Teil II, S. 623–656, nachgedruckt in Buchform mit Nachwort von Weaver, W., Univ. of Illinois Press, Urbana, 1949.
- [28] *Shannon, C. E.*: Coding Theorems for a Discrete Source with a Fidelity Criterion. IRE Nat. Conv. Rec., Teil 4, S. 142–163. Auch in Machol, R. E. (Hrsg.), Information and Decision Processes, McGraw Hill, New York, 1960.
- [29] *Rinaldo, R.; Zakhor, A.*: Fractal Approximation of Images. Data Compression Conference, Snowbird, USA, 1993.
- [30] *Rinaldo, R.; Calvagn, C.*: An Improved Wavelet-fractal Coder. Wurde präsentiert auf der ISCAS '94, London, 1994.
- [31] Technologien im 21. Jahrhundert. Positionspapier der deutschen Elektroindustrie, Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V., Mai 1994.



Hartmut Eisele wurde 1953 in Stuttgart geboren. Er legte 1979 das Diplom in Mathematik, 1980 in Physik an der Universität Stuttgart ab und promovierte dort 1985. Im selben Jahr kam er zum Forschungszentrum der Alcatel SEL in Stuttgart, wo er an optoelektronischen Bauelementen mit hoher Wellenlänge arbeitete. 1990 übernahm er die Leitung der Technologie in der Abteilung für Optoelektronik. Seit 1993 ist Dr. Eisele Leiter der Abteilung Mikroelektronik.



Olaf Hildebrand wurde 1948 in Hamburg geboren. Er legte 1973 an der Universität Stuttgart das Diplom in Physik ab und promovierte dort 1977, beidesmal mit «summa cum laude». Seine Diplomarbeit über weit abstimmbare Laser im nahen Infrarotbereich mit angewandten Forschungen zu GaAs- und InP-Lasern ging über in seine Doktorarbeit mit Grundlagenforschungen zu Lasern auf GaAs- und InP-Basis. 1978 begann er mit Arbeiten zu PIN- und Lawinen-Photodetektoren auf der Basis von GaSb und InP. Im Mai 1983 kam Dr. Hildebrand zum Forschungszentrum der Alcatel SEL in Stuttgart, wo er seit 1985 Leiter des Fachbereichs Optoelektronische Bauelemente ist.



Kurt Lösch wurde 1949 in Würzburg geboren. Er legte 1974 an der Universität Stuttgart das Diplom in Physik ab und promovierte dort 1977. 1978 kam er zum Forschungszentrum der Alcatel SEL in Stuttgart, wo er über zehn Jahre an optoelektronischen Bauelementen mit grosser Wellenlänge arbeitete. 1980 wurde er Leiter der Gruppe für Charakterisierung und 1984 Leiter für Bauelemente- und Modul-Technologie in der Abteilung Optoelektronik. 1988 wurde Dr. Lösch Leiter der Forschungsabteilung Mikrosysteme. 1992 und 1993 war er ausserdem Vorsitzender des Alcatel-Kompetenzzentrums für Multichip-Module. Seit 1994 leitet er die Abteilungen für Verbindungstechnologien und für passive optische Bauelemente des Forschungszentrums von Alcatel.



Horst Ohnsorge wurde 1933 in Waldenburg geboren. 1955 erwarb er den Grad eines Ing. (grad) der Elektrotechnik an der Technischen Fachhochschule in Giessen. Er arbeitete dann einige Jahre als Entwicklungsingenieur bei Telefunken, Ulm. Danach studierte er an der Technischen Hochschule Darmstadt, wo er den Grad eines Dipl.-Ing. der Elektrotechnik erwarb. 1967 promovierte er zum Dr.-Ing. an der Technischen Universität Aachen. 1961–1974 arbeitete er im Forschungszentrum von AEG-Telefunken, Ulm, und wurde dort 1968 Leiter der Forschungsgruppe für Telekommunikationssysteme. 1974–1980 war er Technischer Direktor des Heinrich-Hertz-Instituts in Berlin. Dr. Ohnsorge kam 1980 als Leiter des Forschungszentrums zu Alcatel SEL in Stuttgart und wurde 1985 zum Generalbevollmächtigten der Alcatel SEL AG ernannt. Zwischen 1987 und 1991 war er Direktor für Forschung und Technologie bei Alcatel, Paris. Seit 1993 ist er Honorarprofessor an der Universität Stuttgart. Seine beruflichen Aktivitäten beinhalten die Bereiche Filter, Spracherkennung, Videosignal-Kodierung, Datenübertragung, Fehlerkorrekturcodes, Glasfaserübertragung und Breitband-Kommunikationssysteme.



Bernd Stahl wurde 1957 in Dillenburg geboren. Er studierte Informatik an den Universitäten Stuttgart und Oregon, USA, und legte 1987 das Diplom in Informatik an der Universität Stuttgart ab. Im gleichen Jahr kam er zur Software-Abteilung des Forschungszentrums der Alcatel SEL in Stuttgart. Seither hat er an vielen RACE-Projekten und an internen Forschungs- und Entwicklungsprojekten im Bereich des Netzmanagements gearbeitet. Er hat ausserdem Beiträge zu TMN- und IN-Konferenzen verfasst.