

Dear ITG Members,

70 years of Information Technology Society (ITG) in VDE – the future is on! First and foremost, this is a reason to celebrate – celebrate the many achievements and milestones of what has been a remarkable journey from 1954 onwards in Information Technology (r)evolution and with many of our ITG luminaries and members at large having played a key role in this. Information Technology will continue to have great enabling impact for society and across all sectors of the economy, it has become one of the fundamental pillars of our daily life and a key driver of economic growth. Contribution from ITG luminaries in the last 70 years have been instrumental in shaping and driving the innovation journey across Information Technology domains from electron tubes to transistors, in semiconductor, opto-electronics and superconductivity, optical communications, moving picture and audio (MPEG), automotive radar and SAR, mobile communications, high-capacity fiber-optic network fabric as well as Artificial Intelligence.

The average life expectancy of companies is fifteen years or so – how come that ITG has reached the age of 70 and is still thriving? True, ITG is a non-profit organization, and I think it is because of who we are and what we do. The ITG is a powerful platform of leading nationally and internationally renowned experts in Information Technology. Members and stakeholders from research and academia, service providers and industry work on a joint agenda of driving innovation in Information Technology. Our vision is about assuring economic, societal and environmental sustainability for the future. Security, technology sovereignty and digital inclusion are prominent objectives of societal relevance. Given the context of geo-political change, the increased role of government for Information Technology funding and

investment, given the many challenges and obstacles we face in Europe and Germany as regards economic growth and innovation, ITG needs to give trusted advice and play its role in the years ahead: Beyond research and technology innovation, a favorable industry and global standardization environment will be a key prerequisite to make our vision happen.

I feel that we at ITG should drive an agenda of 12 key recommendations in going forward: (1) The transfer of research into industrial context needs full attention, Important Projects of Common European Interest such as Microelectronics and Communication Technology need to be continued. (2) A fair, reasonable, and non-discriminatory licensing environment remains a key success factor for the German and European Information Technology industry. (3) The legal environment needs to be simplified. (4) We need to keep momentum with industry-lead Standard Defining Organizations of national and international relevance to avoid fragmentation of standards. (5) Vehicles of cooperation and Public Private Partnership (PPP) should be fostered. (6) It will be crucial to provide dedicated and licensed radio spectrum in timely fashion. (7) Security and resilience need to move to the center of Information Technology system design. (8) Academia, research institutions, and industry need to keep up the joint engagement of driving “green by design” and circularity transformation. (9) Reach-out to the public on why and how Information Technology can help in leveraging relevant opportunities and challenges of the future. (10) Education, training, recruitment, and retention of young talent within and from outside Germany needs to be strengthened. (11) A sufficient level of Technology Sovereignty in the provision of Information Technology components and the



Bild: Nokia

operation of its systems must be secured. (12) Full digital inclusion needs to be fostered by simplifying the software and user interfaces for the public and by supporting interaction such as speech or gestures in conjunction with Artificial Intelligence.

The future is on – our ITG Technology Vision 2035 starts from the ambition to connect physical and digital worlds, to help unlock and drive the potential of future Information Technology across the stack from Foundational Technology Enablers to Systems and Applications&Services. Our ITG conferences will continue to be impactful vehicles in this regard. At the same time, our ITG white papers are testament to our joint ambition to share technology insight and improve framework conditions for industry and research by strengthening public awareness and government support. Our ITG vision motivates me for voluntary engagement with ITG and I am sure this is true for the many volunteers actively engaged in ITG.

Finally, this is a moment of joy, a moment to celebrate 70 Years of VDE ITG and its achievements. Now is the time to build on our strong heritage and leverage across the value chain and the various sectors of the economy our world leading position in Information Technology research in Germany – the future is on!

DR.-ING. VOLKER ZIEGLER

Vorsitzender der VDE ITG



Bild: Martitz

PROF. DR.-ING. WOLFGANG MATHIS

Professor i. R. in der Fakultät Elektrotechnik
und Informatik der Leibniz Universität Hannover



Bild: Deutsches Museum

DR.-PHIL. FRANK DITTMANN

Kurator am Deutschen Museum, München

GESPRÄCH

Von der Elektronenröhre zum Transistor

Als die NTG (seit 1986 ITG) am 6. April 1954 als Fachgesellschaft im VDE gegründet wurde, hatte die Nachrichtentechnik bereits eine stürmische Entwicklung hinter sich. So konnte man bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mit der drahtgebundenen elektrischen Telegraphie kommerzielle und private Nachrichten weltweit und zeitnah übersenden. Das Telefonsystem ermöglichte die Sprachübertragung, was spätestens seit den 1920er-Jahren von vielen Bürgerinnen und Bürgern auch privat genutzt wurde. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts stand mit der drahtlosen Übertragung eine neue Technologie zur Verfügung, die auch die drahtgebundene Nachrichtentechnik beförderte. Die entsprechende Grundlagenforschung war bereits 1911 Gegenstand des Konzernprogramms der auf Alexander Graham Bell zurückgehenden AT&T Company. Der Erste Weltkrieg beschleunigte die Entwicklung nicht nur in den USA. Nach Kriegsende entwickelte sich daraus das zivile Konzept des Radio Broadcasting (Rundfunk), welches in den 1920er-Jahren zu einem neuen Massenmedium führte. Beim Fernsehen reichen erste Anfänge bis in die 1920er-Jahre zurück, führten aber erst nach dem Zweiten Weltkrieg zu einem neuen elektronischen Massenmedium.

Die Gründung der NTG in den 1950er-Jahren fiel in die Zeit eines erneuten technologischen Wandels: Den Übergang von der Elektronenröhre zum Transistor in der Nachrichtentechnik. In dem folgenden Gespräch diskutieren Frank Dittmann (FD), Kurator am Deutschen Museum in München, und Wolfgang Mathis (WM), Professor i. R. in der Fakultät Elektrotechnik und Informatik der Leibniz Universität Hannover, einige technik-historische Aspekte dieses Wandels. Dabei werden neben den technischen auch die damit einhergehenden gesellschaftlichen Veränderungen angesprochen.

1950er-Jahre: Transistortechnologie

Die Vorteile des Transistors gegenüber der Elektronenröhre
Elektronenröhren und Transistoren sind beides Verstärkerbauelemente. Bei Röhren treten die Elektronen von einer geheizten Kathode in ein Vakuum aus. Dort wird der Elektronenstrom zur Anode mittels eines Gitters elektrostatisch gesteuert. Bei Transistoren hingegen werden für den gesteuerten Ladungstransport die Elektronen in den dotierten – also gezielt verunreinigten – Halbleitermaterialien genutzt. Da die Transportvorgänge im Inneren der Halbleiter stattfinden, sind kom-

plementäre Transistortypen möglich, was die Schaltungstechnik vereinfacht. Dies eröffnet auch den Weg zu monolithisch integrierten Schaltungen, was eine enorme Kostenreduktion zur Folge hat. Halbleiterbauelemente arbeiten zudem bei weit geringeren elektrischen Spannungen als Röhren, sodass der Aufwand zur Erzeugung der Betriebsspannungen viel kleiner ist. Transistoren benötigen auch kein Vakuumgefäß, was den Platzbedarf

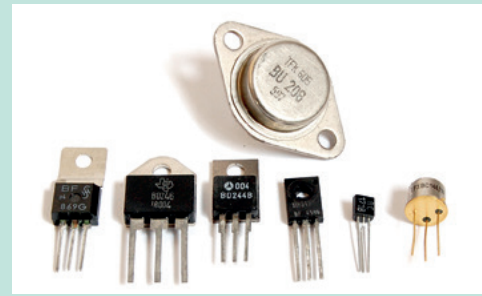


Bild: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Transistor>

drastisch verringert, und da keine Heizleistung aufgebracht werden muss, sind Transistorschaltungen sofort betriebsbereit.

FD: Wo wurde der Transistor erstmals eingesetzt?

WM: Stabile Germanium-Flächentransistoren standen in größerem Umfang erst nach dem AT&T-Bell-Symposium von 1952 zur Verfügung, das auch Firmen außerhalb der USA (u. a. Philips, Siemens & Halske sowie Telefunken) motivierte, Lizenzen für das neue vielversprechende Bauelement aufzunehmen. Bereits ab 1950 untersuchte man den Einsatz von Transistoren als steuerbares Schaltelement, aber schon bald wurde auch dessen Verstärkerfunktion in Hörgeräten und Kofferradios genutzt, bei denen man bisher Miniaturelektronenröhren einsetzte. Das 1952 in den USA hergestellte Hörgerät Sonotone 1010 war das erste Transistorgerät der Welt. Der Wunsch nach Miniaturisierung entstand bereits in der Röhrenzeit, allerdings zeigten sich hier rasch technische Grenzen, während die Vorteile der Transistoren auf der Hand lagen: Halbleiterbauelemente waren viel leichter als Röhren, benötigten keine Energie zur Kathodenheizung und arbeiteten bei einer viel geringeren Betriebsspannung. Die faszinierenden Möglichkeiten der Transistortechnik stieß beim US-amerikanischen Militär auf größtes Interesse und so wurden entsprechende Finanzmittel für die Erforschung der vielversprechenden Technologie bereitgestellt.

Das führt WM direkt auf die folgende Frage: Welchen Einfluss hat-

ten die Möglichkeiten einer militärischen und zivilen Nutzung von Transistoren auf die Entwicklung dieser neuen elektronischen Technologie?

FD: Waren die Ergebnisse der Grundlagenforschung zunächst allen Wissenschaftlern zugänglich, änderte sich die Situation, als das amerikanische Militär in die Forschung einstieg, schließlich befanden sich die USA und die Sowjetunion im Kalten Krieg. Die USA war durchaus gewillt, die Forschungsergebnisse weiterzugeben, aber nur an befreundete Staaten. Das zeigt sich etwa an den beiden Internationalen Transistor-Symposien, die im September 1951 und im Mai 1952 in den Bell Labs stattfanden. Dort sollten die Teilnehmer über die neue, strategisch wichtige Zukunftstechnologie informiert sowie Lizenzen an potente Firmen vergeben werden. Ansonsten war strenge Geheimhaltung angesagt, damit keine Informationen über die Wirkungsweise des Transistors, die Herstellungsverfahren sowie erste Anwendungen in den Ostblock gelangen. An der zweiten Konferenz 1952 nahmen vier Siemens-Mitarbeiter teil. Dies waren Paul Ludwig Günther, Karl Siebertz, Karl Heinrich Welker und Paul Henninger. Die Teilnahmegebühr betrug zusammen 25 000 US-Dollar, aber man erhielt dafür auch einen Transistor als Geschenk – jener von Siemens ist als Transistor Nr. 9 erhalten. Noch im gleichen Jahr beschloss Siemens, am

Standort München eine Transistorfabrik aufzubauen. Aber auch in der DDR hatte man die Entdeckung des Transistoreffekts und die Aktivitäten um dessen Nutzung zur Kenntnis genommen. 1953 nahm ein Forschungsteam in der Entwicklungsstelle des Werks für Bauelemente der Nachrichtentechnik in Teltow unter der Leitung von Matthias Falter seine Arbeit auf. Allerdings waren hier die vorhandenen Mittel bescheidener als im Westen und der Zugang zu Know-how viel schwieriger.

Mit der weiteren Entwicklung der Herstellungstechnologie, insbesondere durch den Übergang vom Spitzenzum Legierungstransistor und dann zum Diffusionsverfahren, war es möglich, die Ausbeute – das ist die Zahl der funktionsfähigen Bauelemente bezogen auf die Gesamtproduktion – zu steigern, was zu sinkenden Preisen führte. Da aber die Zuverlässigkeit zu gering war, kamen Transistoren zunächst nicht in militärischen Geräten oder in der Automatisierungstechnik zum Einsatz, sondern in Konsumgütern, wie etwa in Transistorradios.

WM: Taschenradios auf der Basis von Miniaturröhren gab es bereits in den 1940er-Jahren, sodass der technologische Übergang von den Röhren- zu den Transistorradios auf der Hand lag. Der Regency TR-1 war in den USA das erste kommerziell verfügbare Transistorradio, das ab Januar

1955 ausgeliefert wurde. Taschenradios waren zwar billiger und zuverlässiger, aber der Hauptfaktor für den wirtschaftlichen Erfolg war kultureller Natur. Anders als in Europa wurde Anfang der 1950er-Jahre das Radio in den USA durch das Fernsehen verdrängt und zwang die Radiomanager dazu, einen neuen Zweck und ein neues Format zu finden. Man wandte sich zunehmend an bestimmte Zielgruppen, wobei der Jugend mit ihrer wachsenden Kaufkraft bald an die erste Stelle rückte. Für weiße Jugendliche, die auf der Suche nach etwas Neuem und Aufregendem waren, war es eine Offenbarung, abends schwarze Plattenprogramme mit ihren Jive-Talking-Moderatoren zu hören. Dieser Trend wurde aufgegriffen und im

ße Erfolg und die damit verbundene Durchdringung der USA mit diesen hochwertigen japanischen Produkten war so ausgeprägt, dass viele Menschen (fälschlicherweise) Japan (und insbesondere Sony) mit der Geburt des Transistorradios in Verbindung bringen.

Die nächste, von FD aufgeworfene Frage zielt auf weitere Anwendungsgebiete: Von der Miniaturisierung durch die Transistortechnik konnten sicherlich auch die Computertechnik und die Raumfahrt profitieren?

WM: Die wichtigsten Leistungsmerkmale von Transistoren, darunter der niedrige Stromverbrauch, das geringe Gewicht und die lange Lebensdauer,

der ab 1962 entwickelt wurde. Die Forcierung der Raumfahrt nach dem sogenannten Sputnik-Schock vom 4. Oktober 1957 beförderte die noch junge Transistorindustrie in den USA außerordentlich, insbesondere weil sie die Finanzierung der wissenschaftlich anspruchsvollen und deshalb teuren Halbleitertechnologie sicherte.

FD: Ein Bereich, der von der Halbleitertechnik profitierte, war zweifellos die Computertechnik. Zwar war bereits 1946 mit dem ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) an der University of Pennsylvania der erste elektronische Universalrechner in Betrieb gegangen. Er konnte addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren und Quadratwurzeln ziehen, aber der

Die wichtigsten Leistungsmerkmale von Transistoren, darunter der sehr geringe Stromverbrauch, geringes Gewicht und lange Lebensdauer, passten sehr gut zu den Anforderungen der Raumfahrt und unterstützten die rasante Entwicklung der Raumfahrzeug- und Raketentechnologie in den 1950er- und 1970er-Jahren.

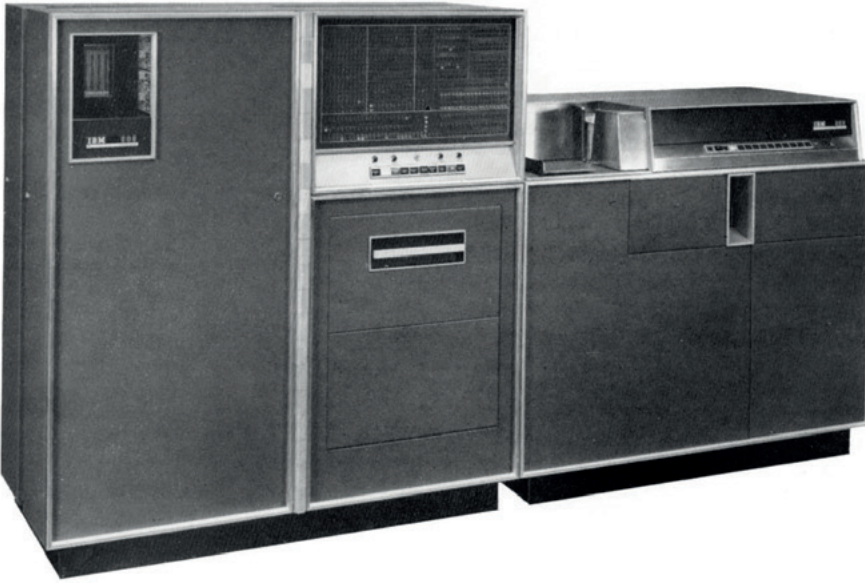
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Mathis

Radioprogramm von „Disk-Jockeys“ in einer Art präsentiert, wie man es von ihren Vorbildern kannte. In diesem Sinne reagierte das Radio nicht nur auf die Geburt des Rock'n'Rolls, sondern es erfand den Rock'n'Roll geradezu.

In Europa folgte man technisch gesehen und mit einiger Verzögerung dem amerikanischen Vorbild des Transistorradios, jedoch ohne Bezug auf die dortige kulturelle Situation. Übrigens war die Grundlage der neuen Hörkultur die tragbare Technologie, die im Rahmen der japanischen industriellen und technischen Erneuerung nach dem 2. Weltkrieg zu voller wirtschaftlicher und funktionaler Rentabilität entwickelt wurde. Dieser gro-

passten sehr gut zu den Anforderungen der Raumfahrt und unterstützten die rasante Entwicklung der Raumfahrttechnik in den 1950er- und 1970er-Jahren. Ein historisches Beispiel für diese bemerkenswerte Kombination von Technologien war der erfolgreiche Start des ersten US-Satelliten Explorer 1 im Januar 1958, dessen Elektronik ausschließlich aus Halbleitertransistoren bestand. Dabei wurde der Siliziumtransistor 2N335 von Texas Instruments für die Impulszählschaltung des Geiger-Müller-Zählers genutzt. Übrigens erfolgte auch der erste Einsatz integrierter Logikschaltungen (Fairchild Micrologic Type G NOR Gates) im On-Board-Computer der Apollo-Raumschiffe,

Aufwand war enorm: Der ENIAC bestand aus 17 468 Elektronenröhren, 7 200 Dioden, 1 500 Relais, 70 000 Widerständen und 10 000 Kondensatoren, beanspruchte eine Fläche von 10 m × 17 m und wog 27 t. Die Leistungsaufnahme summierte sich auf 140 kW, wovon allein 80 kW auf die Röhrenheizung entfiel. Es liegt auf der Hand, dass die Entwickler von Computern träumten, die Transistoren als Schaltelement nutzen. Der erste amerikanische Transistorrechner (TRADIC) wurde im Januar 1954 in den Bell Labs in Betrieb genommen. Entwickler der IBM stellten im Oktober 1954 eine Halbleiter-Ausführung der elektronischen Tabelliermaschine IBM 604 vor. Als erstes kommer-



IBM 608 Calculator

zielles Produkt gilt der IBM 608, der im Dezember 1957 auf den Markt kam.

Nach der Diskussion über die ersten Anwendungsgebiete von Transistoren geht es im Folgenden um die historische Entwicklung des neuen Bauelements.

FD: Was war der Antrieb, Halbleiterbauelemente zu entwickeln?

WM: Erste Ansätze gab es in den 1920er-Jahren. Ausgangspunkt war dabei, die Funktion von Gleichrichterbauelementen (sog. Detektoren) zu

der Funk- und Radartechnik, eingesetzt. In den 1930er-Jahren gab es bei Bell ein Programm, um den Gleichrichtereffekt von Halbleitern zu klären. Am Ende dieser intensiven Arbeit stand dann die Entdeckung des Transistoreffekts durch John Bardeen und Walter Brattain.

FD: War damit das Bauelement „Transistor“ erfunden, den wir heute kennen?

WM: Nein, denn der Spitzentransistor, der die Technologie des Spitzendetektors fortsetzte, war elektronisch instabil. Eigentlich war die Lösung

Meilenstein der Elektronik, was dadurch unterstrichen wird, dass der Nobelpreis bereits 1956, also neun Jahre nach der Entdeckung, vergeben wurde. Allerdings war noch eine intensive Forschungsarbeit notwendig, um zu einem zuverlässigen Bauelement zu kommen. Vor allem galt es, die Halbleiterphysik zu verstehen – und das war keineswegs einfach, veränderten doch kleinste Mengen an Verunreinigungen die Eigenschaften der Halbleitermaterialien. So waren sehr genaue Analysemethoden nötig, um geringste Verunreinigungen messen und deren Effekte studieren zu können. Eine weitere Hürde bestand in der Produktion von extrem reinen Ausgangsmaterialien in größeren Mengen, die im Fall von Germanium und später Silizium auch noch als Einkristall zur Verfügung stehen müssen. Weiterhin benötigte man eine geeignete Technologie, die sog. Lithografie, um die notwendigen Strukturen auf das Halbleitermaterial aufzubringen. War der Transistor fertig, musste er noch sicher verkapselt und vermessen werden.

Aber damit waren noch nicht alle Probleme gelöst. Röhren waren spannungsgesteuerte Bauelemente, Bipolartransistoren – das waren die ersten, die auf dem Markt kamen – wurden durch einen kleinen Basisstrom gesteuert. Das hatte natürlich Auswirkungen auf die Schaltungstechnik.

FD: Aber wie ging es weiter?

WM: William Shockley gründete 1955 das Shockley Semiconductor Laboratory in Mountain View (Kalifornien) und begründete damit den Ruf des späteren Silicon Valley. Allerdings gelang es dem menschlich schwierigen Shockley nicht, seine hochtalentierten Mitarbeiter an seine Firma zu binden. 1957 verließen acht Mitarbeiter („Traitorous Eight“) das Lab und gründeten Fairchild Semiconductor, das zum Ausgangspunkt der weiteren Entwicklung der Transistortechnik und wenig später auch der integrierten Schaltungstechnologie wurde – aber das ist eine andere Geschichte.

Ein Bereich, der von der Halbleitertechnik profitierte, war zweifellos die Computertechnik.

Dr. phil. Frank Dittmann

verstehen. Solche Detektoren wurden bereits in ersten Radios eingesetzt, aber man verstand die Physik dahinter nicht. Untersuchungen dazu erfolgten in vielen Ländern; da nicht zuletzt das Thema von militärischem Interesse war, wurde solchen Dioden zunehmend in neuen Geräten, etwa

der sogenannte Flächentransistor, den William Shockley erfunden hatte. Daher ging 1956 der Nobelpreis für Physik an alle drei Bell-Mitarbeiter.

FD ergänzt an dieser Stelle:

Natürlich war die Entdeckung des Transistoreffekts ein bedeutender



Bild: Privat

PROF. DR. TECHN. DR. H. C. PETER RUSSE

ist ehemaliger Ordinarius für Hochfrequenztechnik der TUM School of Computation, Information and Technology. Nach einer Promotion über den Wechselstrom-Josephson-Effekt arbeitete er ab 1971 im AEG-Telefunken-Forschungsinstitut Ulm an der breitbandigen optischen Nachrichtenübertragung. 1981 folgte Peter Russer dem Ruf an die Technische Universität München. Seine theoretischen und experimentellen Arbeiten umfassen ein großes Gebiet, das von der Entwicklung von Methoden zur Berechnung elektromagnetischer Felder über integrierte Mikrowellen- und Millimeterwellenschaltungen und statistische Rauschanalysen in Mikrowellenschaltungen bis hin zu Methoden für den rechnergestützten Entwurf von Mikrowellenschaltungen und Antennen reicht. Peter Russer ist Autor von über 800 wissenschaftlichen Publikationen und ist in über 60 Patenten als Erfinder genannt. Darüber hinaus wirkte er bei zwei Spin-Off-Unternehmen auf den Gebieten der Mikrowellentechnik und der Störemissionsmesstechnik erfolgreich als Firmengründer.

WISSENSCHAFTSBEITRAG

Neue physikalische Technologien für Bauelemente und System-Ideen

Auf den Gebieten der Halbleiterelektronik, der Optoelektronik und der supraleitenden Elektronik sind in den 1960er Jahren bahnbrechende Fortschritte erzielt worden, die im folgenden Technik und Gesellschaft geprägt haben. Die Entwicklungen dieses Jahrzehnts, die dazu führenden technisch-wissenschaftlichen Voraussetzungen und daraus folgende technische Entwicklungen werden beschrieben.

Einleitung

Die Sechzigerjahre des 20. Jahrhunderts können wir als die Achsenzeit der Festkörperelektronik bezeichnen, da hier in vielfacher Hinsicht auf Basis der damals vorhandenen physikalisch-technischen Grundlagen Basis- und Schlüsseltechnologien für weite Bereiche der industriellen Produktion geschaffen wurden [1–3]. In den Bereichen der Halbleiterelektronik sowie

auf den Gebieten der Optoelektronik und der supraleitenden Elektronik wurden in diesem Jahrzehnt wesentliche Fortschritte erzielt. Hochintegrierte Halbleiterschaltkreise und moderne Lichtleitfaser-Kommunikationssysteme sind aus unserer modernen Welt nicht mehr wegzudenken. Supraleitende Systeme stehen an der Schwelle der Entwicklung der Quanten-Informationsverarbeitung.

Halbleiterelektronik

Die Entdeckung der unipolaren Leitung von Metall-Halbleiter-Übergängen durch Ferdinand Braun (1850–1918) im Jahr 1874 ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Festkörperelektronik [4–8]. Es dauerte mehr als fünfzig Jahre von Ferdinand Brauns Entdeckung bis durch die Arbeiten von Arnold Sommerfeld (1868–1951) und Felix Bloch (1905–1983) im Jahr

1928 ein Verständnis der elektronischen Eigenschaften von Festkörpern auf Basis der Quantentheorie erzielt wurde [9, 10]. Davon ausgehend entwickelte Walter Schottky eine Theorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter, die grundlegend für das Verständnis aller modernen Halbleiterbauelemente ist [11].

Der Durchbruch der Festkörperelektronik kam mit dem Transistor. Julius Edgar Lilienfeld (1882–1963) entwickelte Mitte der 1920er-Jahre an der Universität Leipzig Konzepte von Feldeffekttransistoren, die er später in den USA zum Patent anmeldete, jedoch nicht realisierte [12–14]. Als W. H. Brattain, John Bardeen und Robert Gibney später Patente auf ihre Bauelemente anmeldeten, wurden die meisten ihrer Ansprüche aufgrund von Lilienfelds Patenten abgelehnt [15]. Ein weiteres Konzept eines Feldeffekttransistors wurde von Oskar Ernst Heil (1908–1994) zum Patent angemeldet [16]. In den Bell Labs entwickelten John Bardeen (1908–1991), William Shockley (1910–1989) und Walter Brattain (1902–1987) den ersten funktionierenden Bipolartransistor in Form eines Spitzentransistors und meldeten dafür am 17. Juni 1948 ein Patent an [17]. Unabhängig davon entwickelten Heinrich Welker (1912–1981) und Herbert Franz Mataré (1912–2011) in Frankreich einen Bipolartransistor und meldeten dafür am 13. August 1948 ein Patent an (Bild 1) [18]. Die ersten Bipolartransistoren waren Spitzentransistoren [7]. Diese wurden im nächsten Entwicklungsschritt 1951 durch den von der Gruppe um Gordon Teal, Morgan Sparks und William Shockley in den Bell Labs entwickelten Flächentransistor, der aus nur einem Kristall be-

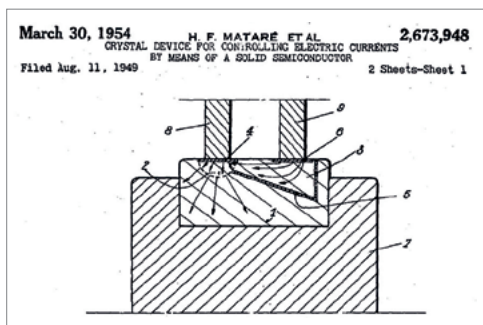


Bild 1: Bipolartransistor von H. F. Mataré und H. Welker [18]

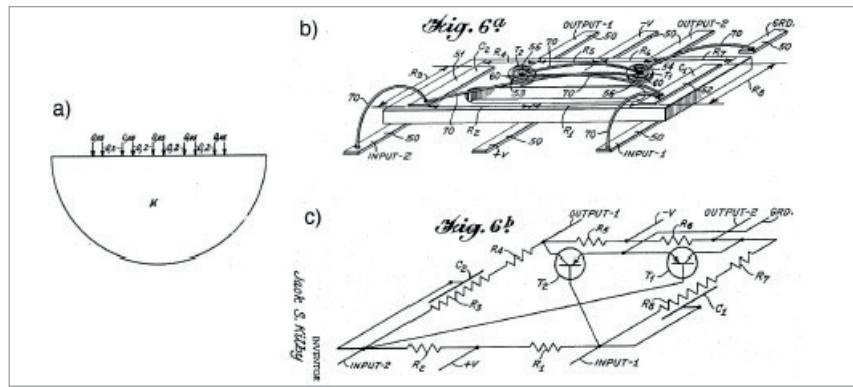


Bild 2: a) Integrierter Schaltkreis von W. Jacobi [29]; b) integrierter Schaltkreis; c) Schaltung von S. Kilby [30]

steht, abgelöst [19, 20]. Ab Mitte der 1950er-Jahre begannen Bipolartransistoren, zunächst auf Germanium-Basis, später auf Silizium-Basis schrittweise Elektronenröhren in einzelnen Anwendungen zu ersetzen. Die Anwendungsbereiche der Bipolartransistoren waren wegen der niedrigen Transitfrequenzen sehr begrenzt [21]. Die geringe Größe, der geringe Energiebedarf und die zunehmenden Transitfrequenzen der Transistoren führten im Laufe der 1960er-Jahre dazu, dass die Elektronenröhren als Signalverstärker auf fast allen Gebieten durch Transistoren abgelöst wurden.

Im Jahr 1959 entwickelten Martin M. Atalla und Dawon Kahng bei Bell Labs den ersten Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET), der die Grundlage der CMOS-Technik darstellt [22]. Der MOSFET ermöglicht dank seiner Skalierbarkeit, geringer Leistung und hoher Dichte die Entwicklung von hochintegrierten Schaltungen.

Ein bipolarer Transistor mit einem Emitter mit größerer Energielücke als die Basis wurde bereits in William Shockleys Originalpatent explizit erwähnt [23]. Der Heterobipolartransistor (HBT) wurde erstmals von Alfons Hähnlein vorgeschlagen [24]. Im Juli 1954 formulierte Herbert Kroemer (1928–2024) das Konzept des Breitbandemitter-Transistors [25]. Die praktische Realisierung scheiterte an Problemen der Gitter-Fehlanpassung. Zur Lösung dieses Problems schlugen Erich Kasper und Peter Russer im Jahr 1977 einen Heterobipolartransistor (HBT) auf der Basis eines monokristallinen Silizium-Germanium-Mischkristallsystems vor [26, 27]. Nach diesem Prinzip wurde der erste

SiGe-HBT 1987 von IBM-Forschern realisiert [28]. Später wurden SiGe-HBTs mit Transitfrequenzen und maximalen Schwingfrequenzen über 300 GHz und darauf basierende monolithisch integrierte Millimeterwellenschaltungen von mehreren Gruppen entwickelt [27].

Die in den 1960er-Jahren entwickelten planaren Halbleitertechnologien ermöglichten die in diesem Zeitraum einsetzende stürmische Entwicklung der Integration der Halbleiterbauelemente. Das erste Patent für einen integrierten Schaltkreis stammt von Werner Jacobi (1904–1985?) und wurde von Siemens & Halske am 15. April 1949 eingereicht (Bild 2a) [29]. Patentanspruch 1 dieser Erfindung lautet: „Halbleiterverstärker, dadurch gekennzeichnet, daß auf den Halbleiter mehrere in verschiedenen Schalt- und Verstärkerstufen wirkende Elektrodensysteme aufgesetzt werden.“ Jacobis Patent blieb weitgehend unbekannt und wurde nicht kommerziell genutzt. Der erste integrierte Schaltkreis mit nur zwei Transistoren wurde 1958 von Jack S. Kilby (1923–2005) bei Texas Instruments realisiert (Bild 2b,c) [30, 31]. Kilbys Erfindung war allerdings kein monolithischer integrierter Schaltkreis (IC), sondern ein hybrid-integrierter Schaltkreis (Hybrid-IC), da die Bauelemente noch mit externen Drähten verbunden waren. Robert Noyce (1927–1990) erfand ein halbes Jahr nach Kilby den ersten echten monolithischen IC-Chip [32]. Sein Chip bestand aus Silizium, während Kilbys Chip aus Germanium vorschlug.

Das heute wichtigste Substratmaterial für integrierte Schaltkreise ist Silizium. Die VLSI-Technologie (very

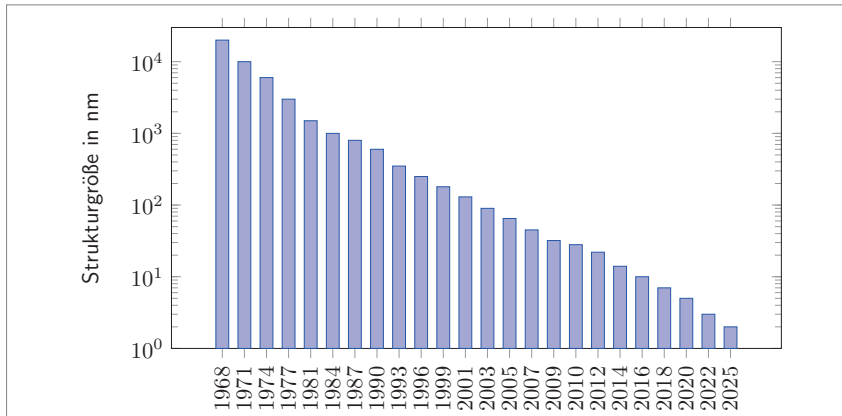


Bild 3: Die Skalierung der MOSFET

large scale integration) ermöglicht es, auf einem einzigen Chip Rechenleistung unterzubringen, die die von Großrechnersystemen der 1960er-Jahre um mehrere Größenordnungen übertrifft. Während der letzten 60 Jahre folgte die Entwicklung der Mikroelektronik dem Mooreschen Gesetz, einem vom Intel-Gründer Gordon Moore 1965 aufgestellten empirischen Gesetz, das vorhersagt, dass sich die Bauteildichte und Leistungsfähigkeit monolithischer integrierter Siliziumschaltkreise etwa alle 18 Monate verdoppelt [33–36]. Im Zeitraum von 1968 bis 2022 verringerten sich die Strukturgrößen von MOS-Transistoren von 20 Mikrometer auf etwa 3 Nanometer (Bild 3). Die Bauteildichte ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Strukturgröße. Der Zeitraum für die Verdopplung der Bauelementedichte ist in diesem Fall 25,5 Monate.

Die Resistor Transistor Logic (RTL), die älteste Klasse transistorisierter digitaler Logikschaltkreise, ist mit Widerständen als Eingangsnetzwerk und Bipolartransistoren als Schaltelemente aufgebaut. Es folgten Dioden-Transistor-Logik (DTL) und Transistor-Transistor-Logik (TTL). RTL-Schaltkreise wurden zunächst diskret aufgebaut und wurden 1961 die erste digitale Logikfamilie, die als monolithisch integrierte Schaltkreise hergestellt wurde [37].

Die TTL-Technik wurde 1961 von James L. Buie bei TRW entwickelt [38]. Nach ihrer Einführung im Jahr 1963 wurden TTL-ICs von mehreren Halbleiterunternehmen hergestellt und fanden breite Anwendung in Computern und industriellen Steue-

rungen. Die emittergekoppelte Logik (ECL) basiert auf einem übersteuerten Differenzverstärker mit bipolarem Sperrschichttransistor (BJT) und zeichnet sich durch kurze Schaltzeiten aus [39].

Bei Bell Labs wurde der erste Silizium-Gate-MOS-IC mit selbstausharichtenden (self aligned) Gates 1968 von Federico Faggin entwickelt [40]. Die Entwicklung des integrierten Mikroprozessors Intel 4004 auf MOS-Basis [41] führte zu einer starken Zunahme der kommerziellen und privaten Nutzung von Computern. Moderne monolithische ICs sind überwiegend integrierte MOS-Schaltkreise [42–44].

Silizium galt lange Zeit nicht als geeignetes Material für Mikrowellen- und Millimeterwellenanwendungen. Mitte der 1980er-Jahre stellte sich jedoch heraus, dass hochohmiges Silizium mit einem spezifischen Widerstand von über 2000 Ωcm hervorragend für die monolithische Integration von Millimeterwellenschaltkreisen – SIMMWICs (silicon millimeterwave integrated circuit) geeignet ist [45–47].

Optoelektronik

Die Übertragung von Informationen mittels Licht kam seit der Antike immer wieder zur Anwendung [48, 49]. In der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde optische Kommunikation nur in geringem Umfang und für die mobile Übertragung über kurze Distanzen und mit geringer Bandbreite verwendet [50, 51]. Die Situation änderte sich rasch mit der Erfindung des Lasers. Im Jahr 1958 schlugen Schawlow und Townes die

Ausweitung des Maserprinzips auf den optischen Bereich vor [52]; 1960 berichtete Maiman von der Erzeugung kohärenter Lichtimpulse durch einen Rubinlaser [53] und ein Jahr später realisierten Javan und Mitarbeiter einen kontinuierlich arbeitenden Helium-Neon-Laser mit einer Linienbreite von nur einigen zehn Kilohertz [54]. Die Verfügbarkeit kohärenter Lichtquellen stimulierte die Forschung im Bereich der optischen Kommunikation aus folgenden Gründen enorm. Trägerfrequenzen zwischen 10^{13} und 10^{15} Hz ergeben eine hohe verfügbare Bandbreite für die Signalübertragung, vorausgesetzt allerdings, dass der Träger kohärent ist [55].

Frühe Vorschläge für Lichtwellenleiter waren hohle metallische und dielektrische Wellenleiter [56–58]. Da die Dämpfung jedes Modus in solchen Wellenleitern umgekehrt proportional zur dritten Potenz des Innendurchmessers ist, darf der Innendurchmesser nicht zu klein sein. Für eine He-Ne-Laser-Lichtwelle mit $0,6328\ \mu\text{m}$ Wellenlänge und einem Strahldurchmesser von 1 mm beträgt der minimale Biegeradius eines Hohlrohr-Wellenleiters 600 m [59]. Für einen dielektrischen Wellenleiter aus Glas mit einem Brechungsindex von 1,5, einem Innendurchmesser von 2 mm und einer Wellenlänge von $1\ \mu\text{m}$ haben Marcatili und Schmelzer eine Dämpfung von 1,85 dB/km für den EH_{11} -Modus berechnet, die sich allerdings bereits bei einem Biegeradius von 10 km verdoppelt [57].

Alle oben genannten Konzepte für optische Wellenleiter litten unter den Nachteilen hoher Präzisionsanforderungen und damit hoher Herstellungs- und Installationskosten aufgrund ihrer großen Mindestkrümmungen. Der Durchbruch der leitungsgeführten optischen Kommunikation kam mit der Entwicklung von Glasfaser-Lichtwellenleitern. Die Fähigkeit eines dielektrischen Stabs, elektromagnetische Wellen zu leiten, war schon lange bekannt. Im Jahr 1910 lösten Hondros und Debye die Maxwell-Gleichungen für die Wellenausbreitung in einem kreiszylindrischen dielektrischen Stab [60]. Erste experimentelle Untersuchungen zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in einem dielektri-

schen Wellenleiter wurden 1920 von Schriever veröffentlicht [61]. Van Heel schlug erstmals vor, Fasern mit einer Schicht mit niedrigerem Brechungsindex zu überziehen, um eine Totalreflexion an der Kern-Mantel-Grenzfläche zu gewährleisten und auf diese Weise einzelne Fasern innerhalb eines Bündels optisch von ihren Nachbarn zu isolieren [62].

Im Jahr 1965 entwarf Manfred Börner (1929–1996) ein breitbandiges optisches Weitverkehrs-Übertragungssystem auf der Basis einer Laserdiode als Sendeelement, einer einwelligen Glasfaser als Übertragungsmedium und einer Photodiode als Empfangselement. Das Patent DE 1254 513 (Anmeldetag 21. Dezember 1966) „Mehrstufiges System für in Pulsmodulation dargestellte Nachrichten“ [63–65] ist das weltweit erste Patent für ein Glasfaser-Datenübertragungssystem. Alle optischen Weitverkehrsübertragungssysteme arbeiten noch heute nach diesem von Börner vorgeschlagenen Prinzip (Bild 4). Gleichzeitig mit Börner und unabhängig von ihm wurden von Kao und Hockham [66] und Werts [67] Vorschläge gemacht, Glasfasern als Übertragungsmedium für die optische Kommunikation zu verwenden. Alle Autoren schlugen die Verwendung von Glasfasern mit einem Kern mit höherem Brechungsindex und einem Mantel vor. Eine solche Faser fungiert als offener optischer Wellenleiter. Das elektromagnetische Feld wird nur teilweise innerhalb des Kernbereichs geleitet, während das elektromagnetische Feld außerhalb des Kerns in einer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verlaufenden Richtung exponentiell abklingt. Der zur einwelligen Übertragung der Lichtwelle verwendete HE_{11} -Modus hat keine Grenzwellenlänge [68].

Die auf Manfred Börners Erfindung folgende Entscheidung bei AEG-Telefunken, die Entwicklung eines breitbandigen digitalen Lichtleitfaserübertragungssystems in Angriff zu nehmen, war außerordentlich mutig. Noch Anfang der 1970er-Jahre stellten sich die Voraussetzungen wie folgt dar: Halbleiterinjektionslaser hatten bei Raumtemperatur im kontinuierlichen Betrieb eine Lebensdauer von einer Minute und hatten einen zu hohen

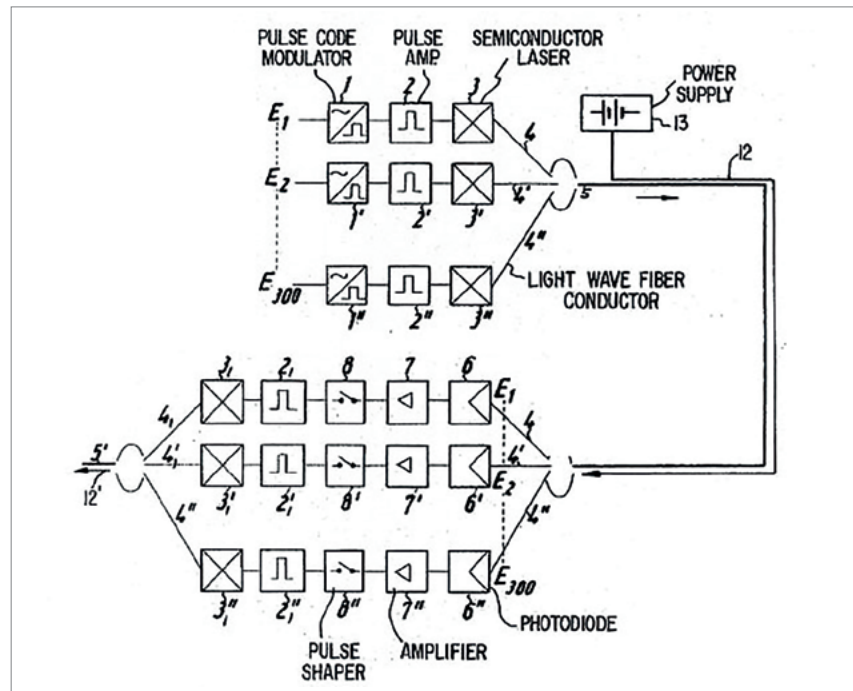


Abb. 4: Lichtleitfaser-Übertragungssystem von M. Börner [64]

Schwellenstrom und ein unzureichendes Modulationsverhalten und wiesen nicht die erforderliche Modenreinheit auf. Die einwelligen Lichtleitfasern wiesen eine viel zu hohe Einfügungsdämpfung auf und ermöglichten nur eine Übertragung über wenige Meter. Schnelle empfindliche Photodioden waren nicht verfügbar. Eine Schaltungstechnik für Gigabitraten war nicht existent.

Bald wurde in Deutschland an verschiedenen Stellen auf diesem Gebiet gearbeitet [65, 69, 70]. Die Firmen Schott und Siemens sowie das Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Braunschweig haben Forschung auf diesem Gebiet betrieben [71]. International fanden erhebliche Forschungsanstrengungen auf dem Gebiet der Lichtleitfaserkommunikation statt [72–75].

Unter Manfred Börner arbeiteten etwa dreißig Mitarbeiter in der Abteilung Physik und Bauelemente des AEG-Telefunken-Forschungsinstituts in Ulm. Im Laufe der Siebzigerjahre wurden dort Halbleiterinjektionslaser, Lichtleitfasern, Photodioden und Schaltungen entwickelt, die alle Anforderungen erfüllten.

Die Bandbreite einer Glasfaserübertragungsverbindung wird durch die Faserdispersion begrenzt. Im Monomodebereich wird die Dispersion

hauptsächlich durch die Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex des Fasermaterials verursacht. Bei einer optischen Quelle mit einer Mittenwellenlänge von $0,85 \mu\text{m}$ weisen Singlemodfasern eine Pulsdispersion von 80 ps pro Kilometer Faserlänge und pro Nanometer Spektralbreite der optischen Quelle auf [77]. Im Wellenlängenbereich von $1,27 \mu\text{m}$ weisen Monomodefasern ein Dispersionsminimum auf [77]. Als Kapron, Keck und Maurer 1970 mit Quarzfasern Faserdämpfungswerte von nur 20 dB/km erreichten, war die Barriere gegen den Einsatz von Glasfasern in Kommunikationsverbindungen durchbrochen [78]. Im Vergleich zu anderen Lichtwellenleitern sind Glasfasern kostengünstig herzustellen und zu verlegen.

Heute ist der Halbleiterinjektionslaser die wichtigste kohärente Lichtquelle für die Glasfaserkommunikation. Seine Hauptvorteile sind einfache Konstruktion, kleine Abmessungen, hohe Effizienz und direkte Modulationsfähigkeit bis in den GHz-Bereich. Der Halbleiterinjektionslaser nutzt stimulierte Emission aufgrund der Rekombination von Ladungsträgern, die in Vorwärtsrichtung über einen Halbleiter-p-n-Übergang injiziert werden. Dieses Prinzip wurde erstmals von Nikolay Basov (1922–2001) et al. im

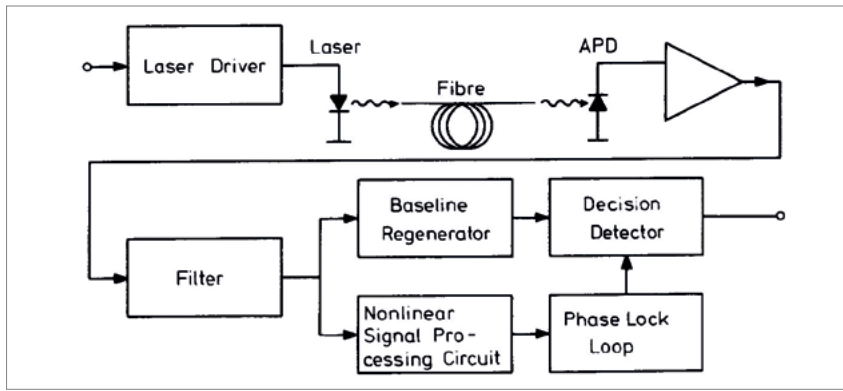


Abb. 5: Blockdiagramm des 1 Gbit/s Glasfaser-Übertragungssystems [92]

Jahr 1961 vorgeschlagen [79]. Im Jahr 1962 wurde von drei verschiedenen Forschungsgruppen eine Laserwirkung mit Halbleiterinjektionslasern erreicht [80–82]. Die ersten Halbleiterinjektionslaser wurden in den folgenden Jahren aus Galliumarsenid hergestellt. Diese Injektionslaser wiesen Schwellenstromdichten von bis zu 10^5 A/cm^2 bei 300 K auf, sodass ein Dauerstrichbetrieb bei Raumtemperatur unmöglich war. Im Jahr 1963 schlug Herbert Kroemer Heterostrukturen vor, bei denen auf den aktiven Bereich des p-n-Übergangs eine Halbleiterschicht mit höherer Bandlücke und niedrigerem Brechungsindex folgte, um eine bessere räumliche Begrenzung (confinement) sowohl der Ladungsträger als auch des optischen Felds zu erreichen und somit die Schwellenstromdichte zu senken [83]. Im Jahr 1970 realisierten I. Hayashi und M. B. Panish Einfachheterostrukturlaser mit Schwellenstromdichten von 10^4 Acm^{-2} bei Raumtemperatur [84] und Doppelheterostrukturlaser mit einer Schwellenstromdichte von nur 2300 Acm^{-2} bei Raumtemperatur [85]. Dabei wurden durch Flüssigphasenepitaxie hergestellte GaAs-Ga_xAl_{1-x}As-Heterostrukturen verwendet. Die schmale aktive GaAs-Schicht des Doppelheterostrukturlasers mit einer Dicke von deutlich unter $1 \mu\text{m}$ wird von zwei Ga_xAl_{1-x}As-Schichten begrenzt. Der Schwellenstrom von Injektionslasern konnte durch Einführung der Streifengeometrie weiter gesenkt werden. Mit einer Laserlänge von $400 \mu\text{m}$ und einer Streifenbreite von $13 \mu\text{m}$ erreichten Ripper et al. Schwellenströme von nur 300 mA bei Raumtemperatur [86].

Als Dauerstrichlaser Anfang der 1970er-Jahre verfügbar wurden, begannen experimentelle Untersuchungen zur direkten Modulierbarkeit bei hohen Modulationsfrequenzen [87]. Für digitale Kommunikation mit hohen Bitraten von mehreren 100 Mbit/s bis in den Gbit/s-Bereich müssen Laser eine geringe spektrale Bandbreite aufweisen, transversal monomodig sein, geringe Modulationsverzerrungen und keine hohe spektrale Verbreiterung durch direkte Modulation aufweisen [88]. Das Bestreben, alle diese Anforderungen zu erfüllen, führte in den Siebzigerjahren zur Entwicklung einer Vielzahl von Strukturen von Injektionslasern.

Im Glasfaserempfänger ist ein Photodetektor mit ausreichend großer Bandbreite und hoher Empfindlichkeit erforderlich. Lawinphotodioden wurden erstmals 1965 von A. Johnson beschrieben und ermöglichen eine beträchtliche Signalverstärkung aufgrund des Lawinendurchbruchs, wenn sie zwischen 100 V und 300 V in Sperrrichtung vorgespannt werden [89, 90]. Mit Silizium-Lawinphotodioden wurden Verstärkungs-Bandbreite-Produkte von über 200 GHz erreicht [91].

1978 wurde im AEG-Telefunken-Forschungsinstitut Ulm die weltweit erste Lichtleitfaserübertragungsstrecke mit einer Datenrate von 1 Gigabit pro Sekunde realisiert [92–94]. Bild 5 zeigt das Blockdiagramm des 1-Gbit/s-Glasfaser-Übertragungssystems. Die Übertragungsstrecke enthält einen Multiplexer auf der Sendeseite sowie Demultiplexer und Taktrückgewinnung auf der Empfangsseite. Der Lasertreiber moduliert den Injektionslaser direkt mit dem PCM-Signal. Auf die Lawinen-Photodiode (APD) folgen der Frontend-Verstärker, ein Filter zur linearen Signalverarbeitung und Rauschbandbreiten-Reduzierung, eine nichtlineare Signalverarbeitungsschaltung und eine Phasenregelschleife zur Takt-Rückgewinnung sowie der Basislinien-Regenerator und Entscheidungs-Detektor zur Signalregeneration. Die Schaltungen wurden im Forschungsinstitut in hybrider Integration realisiert, da integrierte Schaltkreise für die hohen Takt-raten damals nicht verfügbar waren [93]. Zwölf Jahre nach der Erfindung von Manfred Börner war die Forschung an einem wichtigen Zwischenziel angelangt und die Überleitung in die Entwicklung erfolgte.

Supraleitende Elektronik

Gemäß der 1957 veröffentlichten BCS-Theorie von John Bardeen (1908–1991), Leon Cooper (*1930) und John Schrieffer (1931–2019) entsteht Supraleitung durch eine Bose-Einstein-Kondensation von Elektronen in eine Fermionische Quantenflüssigkeit aus sogenannten Cooper-Paaren, wobei beide Elektronen eines Cooper-Paares entgegengesetzten Spin und entgegengesetzten Wellenvektor auf-

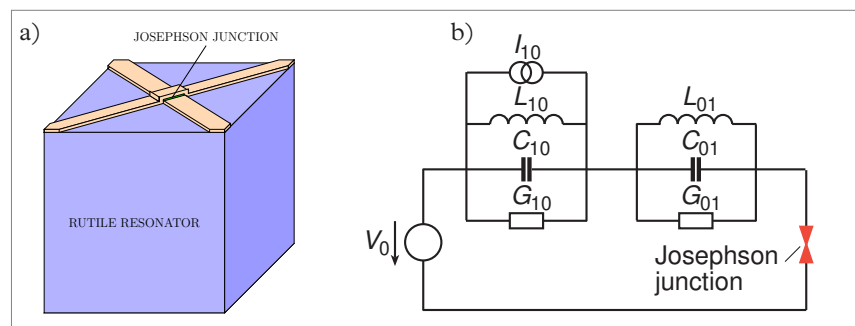


Bild 6: a) Josephson-Kontakt auf Rutil-Resonator [117], b) Josephson-Parametrischer Verstärker – Schaltung [118]

weisen [95]. Supraleitende Tunnelströme wurden bereits 1932 von R. Holm und Walther Meißner (1882–1974) [96] und 1952 von Isolde Dietrich (1920–2017) [97] experimentell nachgewiesen. 1960 untersuchte Ivar Giaever (*1929) experimentell supraleitendes Quasiteilchentunneln durch SIS-Übergänge [98, 99]. Eine detaillierte Analyse der Tunnelströme zwischen Supraleitern auf der Grundlage der BCS-Theorie findet sich in [100, S.326–346].

Im Jahr 1962 sagte Brian Josephson (*1940) die Möglichkeit des Tunnelns gepaarter Elektronen voraus, was später als Josephson-Effekt [101–102] bekannt wurde. Der Josephson-Effekt ist ein makroskopischer Quanteneffekt, der durch supraleitenden Stromfluss zwischen zwei schwach gekoppelten Supraleitern entsteht. Die schwache Kopplung der beiden Supraleiter kann entweder durch einen Tunnelübergang [103, 104] oder eine schmale Brücke [104] bewirkt werden. Josephson-Kontakte können in Dünnschichttechnologie realisiert werden [104, 105]. Nachdem Josephsons Vorhersage supraleitender Tunnelströme zum ersten Mal bestätigt wurde, beobachteten Philip W. Anderson (1923–2020) und John M. Rowell (*1935) supraleitendes Tunneln durch Tunnelübergänge, die aus 200 nm dicken Sn- und Pb-Schichten bestehen, die durch Zinnoxid getrennt sind [106]. Diese Fortschritte auf dem Gebiet der Supraleitung führten zu einer Vielzahl von Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Supraleiter-Elektronik [107].

In den Sechzigerjahren galt das Kryotron als vielversprechendes supraleitendes Bauelement für logische Schaltkreise [108]. Beim Kryotron wird durch einen Strom in der Steuerwicklung ein Magnetfeld erzeugt, das einen zentralen Draht von seinem supraleitenden Zustand in seinen normalen Zustand versetzt. Dabei steuert ein kleiner Strom einen größeren Strom. Kryotrons können als aktive Elemente in logischen Netzwerken miteinander verbunden werden. Juri Matisoo realisierte im Jahr 1966 ein Kryotron mit einem Josephson-Kontakt als Gate mit Schaltzeiten unter 800 ps [109].

1963 zeigte Sidney Shapiro, dass die I/V-Kennlinie von Josephson-

Kontakten eine Stufenstruktur aufweist, wenn der Kontakt mit Mikrowellen bestrahlt wird [110, 111]. Dieser Shapiro-Effekt ist die Grundlage für die Anwendung von Josephson-Kontakten als Hochfrequenzdetektoren [112]. Das von Robert Jaklevic, John J. Lambe, James Mercereau und Arnold Silver erfundene superconducting quantum interference device (SQUID) ist eine Anordnung von zwei Josephson-Kontakten in einem supraleitenden Ring [113, 114]. SQUIDs ermöglichen höchstempfindliche Messungen magnetischer Flüsse und sind auch Grundbausteine supraleitender Schaltungen.

In den Sechzigerjahren setzte eine rege Forschungstätigkeit im Hinblick auf die Anwendung von Josephson-Kontakten als empfindliche Magnetfeld- und Hochfrequenzdetektoren ein [105, 115, 116]. Josephson-Kontakte arbeiten bei Temperaturen von flüssigem Helium und bei Spannungen im Mikrovolt- bis Millivoltbereich. Die Verlustleistung von Josephson-Schaltungen ist um Größenordnungen geringer als die von Halbleiterschaltungen. Josephson-Kontakte können als HF-Oszillatoren, Detektoren, Mischer und parametrische Verstärker bis in den THz-Bereich eingesetzt werden.

Der erste experimentelle Hinweis auf die Möglichkeit der parametrischen Verstärkung mit Josephson-Kontakten wurde 1967 mit einem auf einem Rutilresonator aufgebrachten Josephson-Tunnelkontakt (Bild 6) erbracht [117]. Im Jahr 1969 erfolgte die erste theoretische Untersuchung eines gleichstromgepumpten parametrischen Verstärkers mit einem Josephson-Kontakt [105, 118, 119]. Bild 6 zeigt das Ersatzschaltbild eines gleichstromgepumpten Josephson-Parametrischen Verstärkers (DC pumped Josephson parametric amplifier – DCPJPA) [118]. Der Verstärker weist einen Signalkreis, bestehend aus L_{10} , C_{10} , G_{10} und der Signalquelle I_{10} , und einen Hilfskreis, bestehend aus L_{01} , C_{01} und G_{01} auf. Mit dem Josephson-Kontakt kann Leistung bei Gleichstrom und den Frequenzen f_1 und f_2 ausgetauscht werden.

Allgemeine Energiebeziehungen für Josephson-Kontakte wurden in [120] aufgestellt. Gegenüber den Manley-

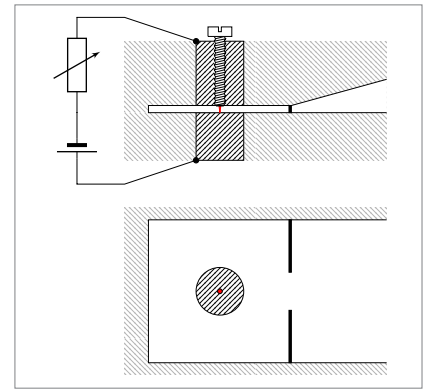


Bild 7: DC-pumped 9 GHz Josephson parametric amplifier [123]

Roweschen Beziehungen [121] weisen diese einen zusätzlichen Term für die Umsetzung von Gleichstromleistung in Wechselstromleistung auf. H. Kanter hat DCPJPAs für Signalfrequenzen von 30 MHz [122] und 9 GHz [123, 124] realisiert.

Parametrische Verstärker mit konzentrierten Elementen weisen eine geringe Bandbreite auf. Parametrische Wanderwellenverstärker bieten unilaterale Verstärkung mit verbesserter Stabilität und Bandbreite [125, 126]. Ein gleichstromgepumpter Josephson-Wanderwellenverstärker (TWJPA – traveling wave Josephson parametric amplifier) wurde erstmalig 1977 vorgeschlagen [119, 127, 128].

Erstmals wurde in [130, 131] gezeigt, dass gequetschte Photonen-Zustände (squeezed photon states) durch einen degenerierten DCPJPA erzeugt werden können. Gequetschte Zustände können durch degenerierte parametrische Verstärkung erzeugt werden [132]. Ihre kohärente Komponente weist eine geringere Unschärfe als ein kohärenter Zustand auf [133, 134]. Gequetschte Zustände sind für die Quanteninformatik von Interesse, da sie die Übertragung von Verschränkung auf ein Paar Quantenbits ermöglichen [135]. Josephson-Schaltungen ermöglichen Quantensignalverarbeitung und Quantum State Engineering [136–139]. Bei supraleitenden Quantencomputern werden Informationen über die Zustände der Quantenbits durch Mikrowellensignale sehr kleiner Leistung übertragen. JPAs ermöglichen hocheffiziente Messungen der Quantenzustände [140, 141].

In den letzten Jahren wurden enorme Fortschritte beim Bau großer

Quantencomputer erzielt. Insbesondere Quantencomputerplattformen auf Basis supraleitender Qubits und JPAs sind führende Kandidaten für skalierbare Quantenprozessorarchitekturen geworden [142, 143].

Referenzen

- [1] acatech: Nanoelektronik als künftige Schlüsseltechnologie der Informations- und Kommunikationstechnik in Deutschland. ser. acatech bezieht Position – Nr. 8. Berlin: Springer, 2011.
- [2] Russer, P.; Lugli, P.; Weitze M.-D.: Nanoelektronik – kleiner – schneller – besser. ser. acatech Diskussion. Springer Vieweg, 2013.
- [3] Drews, J.; Gomez, U.; Gutheit, T.; Kahmen, G.; Kutter, C.; Russer, P.; Straub, H.-J.; Weigel, R.: Hidden Electronics III (deutsche Fassung). VDE-Positionspapier. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2021.
- [4] Braun, F.: Über Abweichungen vom Ohm'schen Gesetz in metallisch leitenden Körpern. Annalen der Physik 237, H. 5, S. 95–110, 1877.
- [5] Russer, P.: Ferdinand Braun – A Pioneer in Wireless Technology and Electronics. In: Grandin, K.; Mazzinghi, P.; Olande, N.; Pelosi, G. (Hrsg.): A Wireless World, ser. Contributions to the history of the Royal Swedish Academy of Sciences. Firenze University Press, 2012, H. 42, S. 228–247.
- [6] Pearson, G. L.; Brattain, W. H.: History of Semiconductor Research. Proceedings of the IRE 43 (1955) H. 12, S. 1794–1806.
- [7] Spenke, E.: Elektronische Halbleiter. Berlin Heidelberg New York: Springer, 1965.
- [8] Riordan, M.; Hoddeson, L.: Crystal Fire: The Invention of the Transistor and the Birth of the Information Age. Thames & Hudson, 1999.
- [9] Sommerfeld, A.: Zur Elektronentheorie der Metalle. Naturwissenschaften 16 (1928) H. 21, S. 374–381.
- [10] Bloch, F.: Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. Zeitschrift für Physik 52 (1929) H. 7, S. 555–600.
- [11] Schottky, W.: Zur Halbleiterttheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter. Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei 113 (1939) H. 5, S. 367–414.
- [12] Lilienfeld, J.: Method and apparatus for controlling electric currents. US-Patent US 1,745,175, eingereicht am 8. Oktober 1926.
- [13] Crawford, B. E.: The invention of the transistor. Ph. . Dissertation, University of Vermont, Burlington, VT, 1991.
- [14] Hillmer, H.: Die vielen Väter des Transistors. Meilensteine in der Geschichte des Festkörperverstärkers. Physik in unserer Zeit 39 (2008) H. 6, S. 296–300. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.200801181>.
- [15] Shurkin, J. N.: Broken genius: the rise and fall of William Shockley, creator of the electronic age. Palgrave Macmillan, 2008.
- [16] Heil, O.: Improvements in or relating to electrical amplifiers and other control arrangements and devices. British Patent: GB439457, eingereicht am 2. März 1934.
- [17] Bardeen, J.; Brattain, W.; Shockley, W.: Three-electrode circuit element utilizing semiconductive materials. US-Patent US2524035, eingereicht am 27. Juni 1948.
- [18] Mataré, H. F.; Welker, H.: Nouveau système cristallin à plusieurs électrodes réalisant des effets de relais électroniques. Französisches Patent FR1010427, angemeldet am 13. August 1948.
- [19] Sparks, M.; Teal, G. K.: Method of making P-N junctions in semiconductor materials. US-Patent US2,631,356, angemeldet am 15. Juni 1950.
- [20] Shockley, W.; Sparks, M.; Teal, G. K.: p-n junction transistors. Physical Review 83 (1951) H. 1, S. 151–162.
- [21] Mende, H. G.: Leitfaden der Transistortechnik. Franzis-Verlag, 1959.
- [22] Kahng, D.: A historical perspective on the development of MOS transistors and related devices. IEEE Transactions on Electron Devices 23 (1976) H. 7, S. 655–657.
- [23] Shockley, W.: Circuit element utilizing semiconductive material. US-Patent 2,569,347, Sep. 1951.
- [24] Hähnlein, A.: Halbleiter-Kristalode der Schichtenbauart. Deutsches Patent DE 1 021 488, angemeldet am 19. Februar 1954, Juli 1958.
- [25] Krömer, H.: Zur Theorie des Diffusions- und Drifttransistors – III Dimensionierungsfragen. Archiv der Elektrischen Übertragung 8, Juli 1954.
- [26] Kasper, E.; Russer, P.: Verfahren zur Herstellung von bipolaren Hochfrequenztransistoren. Deutsches Patent 2 719 464, 21. Dez. 1978.
- [27] Kasper, E.; Kissinger, D.; Russer, P.; Weigel, R.: High speeds in a single chip. IEEE Microwave Magazine 10 (2009) H. 7, S. 28–33.
- [28] Iyer, S. S.; Patton, G. L.; Delage, S. S.; Tiwari, S.; Stork, J. M. C.: Silicon-germanium base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy. IEDM Tech. Dig. (1987), S. 874–875.
- [29] Jacobi, W.: Halbleiterverstärker. Deutsches Patent DE 833366B, angemeldet am 15. April 1949, Juni 1952.
- [30] Kilby, J.: Invention of the integrated circuit. IEEE Transactions on Electron Devices 23 (1976) H. 7, S. 648–654.
- [31] Reid, T.: The Chip. New York: Random House, 2001.
- [32] Noyce, R.: Semiconductor device-and-lead structure. US-Patent 2,981,877, eingereicht 25 April 1961, 1979.
- [33] Moore, G.: Cramming more components onto integrated circuits. Electronics 19 (1965) H. 3, S. 114–117.
- [34] Thompson, S. E.; Parthasarathy, S.: Moore's law: the future of si microelectronics. Materials Today 9 (2006) H. 6, S. 20–25.
- [35] Schaller, R.: Moore's law: past, present and future. IEEE Spectrum 34 (1997) H. 6, S. 52–59.
- [36] Moore's law. Sept. 2024, page Version ID: 1245754212. https://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law
- [37] Haas, G.: Grundlagen und Bauelemente elektronischer Ziffernrechenmaschinen. Eindhoven (Holland): Philips Technische Bibliothek, 1961.
- [38] Buie, J.: Coupling transistor logic and other circuits US-Patent US3,283,170, angemeldet am 8. September 1961.
- [39] Langdon, J.; VanDerveer, E.: Design of a high-speed transistor for the ASLT current switch. IBM Journal of Research and Development 11 (1967) S. 69–73.
- [40] Faggin, F.; Capocaccia, F.: A new integrated mos shift register. Proc. 25th Int. Scientific Congr. Electronics, Rom, 1968, S. 143–152.
- [41] Faggin, F.: The Making of the First Microprocessor. IEEE Solid-State Circuits Magazine 1 (2009) H. 1, S. 8–21.
- [42] Chih-Tang, S.: Evolution of the MOS transistor-from conception to VLSI. Proceedings of the IEEE 76 (1988) H. 10, S. 1280–1326.
- [43] Sah, C.: Evolution of the mos transistor – from conception to vlsi. Proc. IEEE 76 (1988) H. 10, S. 1280–1326.
- [44] Huff, H. R.: From the lab to the fab: transistors to integrated circuits. AIP Conference Proceedings 683 (2003) S. 3–39, issue: 1.
- [45] Buechler, J.; Kasper, E.; Russer, P.; Strohm, K. M.: Silicon highresistivity-substrate millimeter-wave technology. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 34 (1986) H. 12, S. 1516–1521.
- [46] Luy, J. F.; Russer, P.: Silicon-Based Millimeter-Wave Devices. Springer Series in Electronics and Photonics 32. Berlin: Springer, 1994.
- [47] Russer, P.: Si and SiGe millimeter-wave integrated circuits. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 46 (1998) H. 5, S. 590–603.
- [48] Aschoff, V.: Optische Nachrichtenübertragung im Klassischen Altertum. Nachrichtentech. Z. (NTZ) 30 (1977), S. 23–28.
- [49] Steinbuch, K.: Die informierte Gesellschaft. Deutsche Verlags-Anstalt, 1966.
- [50] Huxford, W.; Platt, J.: Survey of near infra-red communicationsystems. J. Opt. Soc. Am. 38 (1948) S. 253–268.
- [51] Beese, N. C.: Light sources for optical communication. Infrared Phys. 1 (1961) S. 5–16.

- [52] Schawlow, A. L.; Townes, C. H.: Infrared and optical masers," *Phys. Rev.* 112 (1958) S. 1940–1949.
- [53] Maiman, T. H.: Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* 187 (1960) S. 493–494.
- [54] Javan, A.; Bennett, W. R.; Herriott, D. R.: Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a he-ne mixture. *Phys. Rev. Lett.* 6 (1961) S. 106–110.
- [55] Grau, G.: Temperatur- und Laserstrahlung als Informationsträger *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik* 18 (1964) S. 1–4.
- [56] Eaglesfield, C.: Optical pipeline: a tentative assessment. *Proc. IEE* 109B (1962) S. 26–32.
- [57] Marcatili, E.; Schmelzter, R.: Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell Syst. Tech. J.* 43 (1964) S. 1783–1803.
- [58] Marcatili, E. A. J.; Schmelzter, R. A.: Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers. *Bell Syst. Tech. J.* 43 (1964) S. 1783–1803.
- [59] Miller, S. E.: Directional control in light-wave guidance. *Bell Syst. Tech. J.* 43 (1964) S. 1727–1739.
- [60] Hondros, D.; Debye, P.: Electromagnetische Wellen in dielektrischen Drähten. *Annalen d. Physik* 32 (1910) S. 465–476.
- [61] Schrieffer, O.: Electromagnetische Wellen an dielektrischen Drähten. *Annalen d. Physik* 63 (1920) S. 645–673.
- [62] van Heel, A.: A new method of transporting optical images without aberrations. *Nature* 173 (1954) S. 39.
- [63] Börner, M.: Mehrstufiges Übertragungssystem für in Pulsmodulation dargestellte Nachrichten. Deutsches Patent P 1 254 523, erteilt am 21. 12. 1978, eingereicht am 30. April 1966.
- [64] Börner, M.: Electro-optical transmission system using lasers. US-Patent Nr. 3,845,293, eingereicht am 28. 9. 1972, Okt. 1974.
- [65] Börner, M.; Rosenberger, D.: Laser communication technology in germany. *IEEE Transactions on Communications* 22 (1974) H. 9, S. 1305–1309.
- [66] Kao, C. K.; Hockham, G. A.: Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. *Proceedings of the IEE* 113 (1966) S. 1151–1158.
- [67] Werts, A.: Propagation de la lumière cohérente dans les fibres optiques. *L'Onde Électrique* 46 (1966) S. 967–980
- [68] Snitzer, E.: Cylindrical dielectric waveguide modes. *J. Optical Soc. America* 51 (1961) S. 491–498.
- [69] Maslowski, S.: Activities in fibre-optical communications in germany. *Optical and Quantum Electronics* 5 (1973) H. 4, S. 275–284. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02057126>.
- [70] Russer, P.: Introduction to Optical Communications. In: Howes, M. J.; Morgan, D. V. (Hrsg.): *Optical Fibre Communications*. Chichester, New York, Brisbane Toronto: John Wiley, 1980.
- [71] Unger, H. G.: *Planar Optical Waveguides and Fibers*. Oxford: Clarendon Press, 1977.
- [72] Unger, H.: *Optische Nachrichtentechnik*. Berlin: Elitera, 1976.
- [73] Hecht, J.: *City of light: the story of fiber optics*. Oxford University Press, USA, 2004.
- [74] Agrawal, G. P.: *Fiber-optic communication systems*. John Wiley & Sons, 2012.
- [75] Keiser, G.: *Optical fiber communications*. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [76] Marcuse, D.: Review of monomode fibres. *Proc. 3rd Europ. Conf. on Optical Communication*, München (1977) S. 60–65.
- [77] Fleming, W.: Material dispersion in lightguide glasses. *Electron. Lett.* 14 (1978) S. 326–328.
- [78] Kapron, F. P.; Keck, D. B.; Maurer, R. D.: Radiation losses in glass optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.* 17 (1970) S. 423–425.
- [79] Basov, O. K. N. G.; Popov, Y.: Production of negative-temperature states in p-n junctions of degenerate semiconductors. *Sov. Phys. JETP* 13 (1961) S. 1320–1321.
- [80] Hall, R. N.; Fenner, G. E.; Kingsley, J. D.; Soltys, T. J.; Carlson, R. O.: Coherent light emission from GaAs junctions. *Phys. Rev. Lett.* 9 (1962) S. 366–368.
- [81] Nathan, M.; Dumke, W.; Burns, F. D. G.; Lasher, G.: Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions. *Appl. Phys. Lett.* 1 (1962) S. 62–64.
- [82] Quist, T. M.; Rediker, R. H.; Keyes, R. J.; Krag, W. E.; Lax, B.; McWhorter, A. L.; Zeiger, H. J.: Semiconductor maser of GaAs. *Appl. Phys. Lett.* 1 (1962) S. 91–92.
- [83] Kroemer, H.: A proposed class of heterojunction injection lasers. *Proc. IEEE* 51 (1963) S. 1782–1783.
- [84] Hayashi, I.; Panish, M.: GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs heterostructure injection lasers which exhibit low thresholds at room temperature. *J. Appl. Phys.* 41 (1970) S. 150–163.
- [85] Panish, M.; Hayashi, I.; Sumski, S.: Double-heterostructure injection lasers with room-temperature thresholds as low as 2300 A/cm². *Appl. Phys. Lett.* 16 (1970) S. 326–327.
- [86] Ripper, J.; Dymont, J.; D'Asaro, L.; Paoli, T.: Stripe-geometry double heterostructure junction lasers: mode structure and cw operation above room temperature *Appl. Phys. Lett.* 18 (1971) S. 155–157, .
- [87] Paoli, T.; Ripper, J.: Direct modulation of semiconductor lasers. *Proc. IEEE* 55 (1970) S. 1457–1465.
- [88] Arnold, G.; Russer, P.: Modulation behaviour of semiconductor injection lasers. *Appl. Phys.* 14 (1977) S. 255–268.
- [89] Johnson, A.: Square law behavior of photocathodes at high light intensities and high frequencies. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 1 (1965) H. 2, S. 99–101.
- [90] Melchior, H.; Fisher, M.; Arams, F. R.: Photodetectors for optical communication systems. *Proc. IEEE* 58 (1970) S. 1466–1486.
- [91] Berchtold, K.; Krumpholz, O.; Suri, J.: Avalanche photodiodes with a gain-bandwidth product of more than 200 GHz. *Applied Physics Letters* 26 (1975) S. 585–587.
- [92] Gruber, J.; Marten, P.; Petschacher, R.; Russer, P.: Electronic circuits for high bit rate digital fiber optic communication systems. *IEEE Transactions on Communications* 26, (1978) H. 7, S. 1088–1098.
- [93] Gruber, J.; Marten, P.; Petschacher, R.; Russer, P.; Weidel, E.: A 1 Gbit/s fibre optic communication link. *Proc. 4th European Conference on Optical Communication*, Genua, 1978, S. 556–563.
- [94] Gruber, J.; Holz, M.; Petschacher, R.; Russer, P.; Weidel, E.: Digitale Lichtleitfaser-Übertragungsstrecke für 1 Gbit/s. *Wissenschaftliche Berichte AEG-Telefunken* 52 (1979) S. 123–130.
- [95] Bardeen, J.; Cooper, L. N.; Schrieffer, J. R.: Microscopic theory of superconductivity. *Physical Review* 106 (1957) H. 1, S. 162–164.
- [96] Holm, R.; Meissner, W.: Messungen mit Hilfe von flüssigem Helium. *XIII. Zeitschrift für Physik* 74 (1932) S. 715–735.
- [97] I. Dietrich, "Versuche zur Supraleitung an Kontakten. *Zeitschrift für Physik* 133, S. 499–503, Aug. 1952.
- [98] I. Giaever, "Energy gap in superconductors measured by electron tunneling. *Physical Review Letters* 5, no. 4, S. 147–148, Aug 1960.
- [99] Giaever, I.; Megerle, K.: Study of superconductors by electron tunneling. *Physical Review* 122 (1961) H. 4, S. 1101–1111.
- [100] Rickayzen, G.: *Theory of Superconductivity*. New York: Interscience – Wiley, 1965.
- [101] Josephson, B. D.: Possible new effects in superconductive tunnelling. *Physics Letters* 1 (1962) H. 7, S. 251–253.
- [102] Josephson, B. D.: The discovery of tunnelling supercurrents. *Reviews of Modern Physics* 46 (1974) H. 2, S. 251–254.
- [103] Schroen, W.: Physics of preparation of Josephson barriers. *Journal of Applied Physics* 39 (1968) S. 2671.

- [104] Yeh, J. T. C.: Technique for fabrication of superconducting microbridges and small Josephson tunnel junctions. *Journal of Applied Physics* 45 (1974) H. 10, S. 4617.
- [105] Solymar, L.: *Superconductive tunneling and applications*. John Wiley & Sons, 1972.
- [106] Anderson, P. W.; Rowell, J. M.: Probable observation of the Josephson superconducting tunneling effect. *Physical Review Letters* 10 (1963) H. 6, S. 230.
- [107] Hinken, J.: *Supraleiter-Elektronik: Grundlagen – Anwendungen in der Mikrowellentechnik*. Berlin: Springer, 1988.
- [108] Buck, D.: The cryotron – a superconductive computer component. *Proc. IRE* 44 (1956) H. 4, S. 482–493.
- [109] Matisoo, J.: The tunneling cryotron – a superconductive logic element based on electron tunneling. *Proceedings of the IEEE* 55 (1967) S. 172–180.
- [110] Shapiro, S.; Janus, A. R.; Holly, S.: Effect of microwaves on Josephson currents in superconducting tunneling. *Reviews of Modern Physics* 36 (1964) H. 1, S. 223.
- [111] Russer, P.: Influence of Microwave Radiation on Current-Voltage Characteristics of Superconducting Weak Links, *J. Appl. Physics*, vol. 43, no. 4 (Apr. 1972), pp. 2008–2010.
- [112] Russer, P.: Untersuchungen am Wechselstrom-Josephson-Effekt (Investigations of the a.c. Josephson effect). *Acta Physica Austriaca* 32 (1970) H. 3-4, S. 373–381.
- [113] Jaklevic, R. C.; Lambe, J.; Silver, A. H.; Mercereau, J. E.: Quantum interference effects in Josephson tunneling. *Physical Review Letters* 12 (1964) H. 7, S. 159–160.
- [114] Jaklevic, R. C.; Lambe, J.; Silver, A. H.; Mercereau, J. E.: Macroscopic quantum interference in superconductors. *Physical Review* 140 (1965), S. A1628–A1637.
- [115] Petley, B. W.: Einführung in die Josephson-Effekte. Hühig, 1975.
- [116] Giffard, R. P.; Gallop, J. C.; Petley, B. W.: Applications of the Josephson effects. *Progress in Quantum Electronics* 4 (1976) S. 301–402.
- [117] Zimmer, H.: Parametric amplification of microwaves in superconducting Josephson tunnel junctions. *Applied Physics Letters* 10 (1967) H. 7, S. 193–195.
- [118] Russer, P.: Parametric amplification with Josephson junctions. *AEÜ Archiv der Elektrischen Übertragung* 23 (1969) H. 8, S. 417–420.
- [119] Russer, P.; Russer, J. A.: Nanoelectronic RF Josephson Devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 59 (2011) H. 10, S. 2685–2701.
- [120] Russer, P.: General energy relations for Josephson junctions. *Proceedings of the IEEE* 59 (1971) H. 2, S. 282–283.
- [121] Manley, J.; Rowe, H.: Some general properties of nonlinear Elements – Part I. General energy relations. *Proceedings of the IRE* 44 (1956) H. 7, S. 904–913.
- [122] Kanter, H.; Silver, A. H.: Self-Pumped Josephson parametric amplification. *Applied Physics Letters* 19 (1971) S. 515–517.
- [123] Kanter, H.: A novel parametric negative-resistance effect in Josephson junctions. *Applied Physics Letters* 23 (1973) H. 6, S. 350–352.
- [124] Kanter, H.: Parametric amplification with self-pumped Josephson junctions. *IEEE Transactions on Magnetics* 11 (1975) H. 2, S. 789–793.
- [125] Kotzebue, K. L.; Blackwell, L. A.: *Semiconductor-Diode Parametric Amplifiers*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1961.
- [126] Steiner, K.-H.; Pungs, L.: *Parametrische Systeme*. Stuttgart: S. Hirzel, 1965.
- [127] Russer, P.: Ein gleichstromgepumpter Josephson-Wanderwellenverstärker (A direct-current pumped Josephson travelling-wave amplifier). *Wissenschaftliche Berichte AEG Telefunken* 50 (1977) S. 171–182.
- [128] Russer, P.: Circuit arrangement for amplifying high frequency electromagnetic waves. US-Patent Nr. 4,132,956, eingereicht am 28 März 1978, Jan. 1979.
- [129] Sweeny, M.; Mahler, R.: A travelling-wave parametric amplifier utilizing Josephson junctions. *IEEE Transactions on Magnetics* 21 (1985) H. 2, S. 654–655.
- [130] Russer, P.; Kaertner, F. X.: Squeezed-state generation by a DC pumped degenerate Josephson parametric amplifier. *AEÜ Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik* 44 (1990), H. 3, S. 216–219.
- [131] Kaertner, F. X.; Russer, P.: Generation of squeezed microwave states by a dc-pumped degenerate parametric Josephson junction oscillator. *Physical Review A* 42 (1990) H. 9, S. 5601–5612.
- [132] Milburn, G.; Walls, D. F.: Production of squeezed states in a degenerate parametric amplifier. *Optics Communications* 39 (1981) H. 6, S. 401–404.
- [133] Yuen, H. P.: Generalized coherent states and the statistics of two-photon lasers. *Physics Letters A* 51 (1975) S. 1–2.
- [134] Yuen, H. P.: Two-photon coherent states of the radiation field. *Physical Review A* 13 (1976) H. 6, S. 2226–2243.
- [135] Paternostro, M.; Falci, G.; Kim, M.; Palma, G. M.: Entanglement between two superconducting qubits via interaction with nonclassical radiation. *Physical Review B* 69 (2004) H. 21, S. 214502.
- [136] Bocko, M.; Herr, A. M.; Feldman, M. J.: Prospects for quantum coherent computation using superconducting electronics. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 7 (1997) H. 2, S. 3638–3641.
- [137] Averin, D.: Quantum computing and quantum measurement with mesoscopic Josephson junctions. *Fortschritte der Physik* 48 (2000) H. 9-11, S. 1055–1074.
- [138] Makhlin, Y.; Schön, G.; Shnirman, A.: Quantum-state engineering with Josephson-junction devices. *Reviews of Modern Physics* 73 (2001) S. 357–400.
- [139] You, J. Q.; Tsai, J. S.; Nori, F.: Scalable quantum computing with Josephson charge qubits. *Physical Review Letters* 89 (2002) H. 19, S. 197902.
- [140] Aumentado, J.: *Superconducting Parametric Amplifiers: The State of the Art in Josephson Parametric Amplifiers*. *IEEE Microwave Magazine* 21 (2020) H. 8, S. 45–59.
- [141] Yuan, Y.; Haider, M.; Russer, J. A.; Russer, P.; Jirauschek, C.: Circuit quantum electrodynamic model of dissipative-dispersive Josephson travelling-wave parametric amplifiers. *Phys. Rev. A* 107 (2023) H. 2, S. 022612.
- [142] Huang, H.-L.; Wu, D.; Fan, D.; Zhu, X.: Superconducting quantum computing: a review. *Sci. China Inf. Sci.* 63 (2020) H. 8, S. 180501.
- [143] Bardin, J. C.; Sank, D.; Naaman, O.; Jeffrey, E.: Quantum computing: An introduction for microwave engineers. *IEEE Microwave Magazine* 21 (2020) H. 8, S. 24–44.



Bild: TU Berlin

PROF. DR.-ING. KLAUS PETERMANN

studierte von 1969 bis 1974 Elektrotechnik an der TU Braunschweig und wurde dort 1976 promoviert. Von 1977 bis 1983 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am AEG Telefunken Forschungsinstitut in Ulm und wurde 1983 ordentlicher Professor an der Technischen Universität Berlin. Petermann ist seit 2002 Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und seit 2009 IEEE Fellow. Von 1996 bis 2004 war er im Vorstand des VDE. Seit 2020 ist er ITG Fellow.

INTERVIEW

„Die niedrig dämpfende Glasfaser war der Durchbruch“

Die entscheidenden Grundlagen für die optische Nachrichtentechnik wurden in den 1970er-Jahren gelegt. Professor Klaus Petermann erzählt, warum dieses Jahrzehnt so wichtig war, wer einen entscheidenden Anteil an der Entwicklung hatte und wieso man zunächst noch auf der Suche nach den passenden Anwendungen war.

Herr Petermann, die optische Nachrichtentechnik ist heute nicht mehr aus unserer Welt wegzudenken. Aber entscheidende Entwicklungen sind bereits in den 1970er-Jahren passiert. Ist das richtig?

Das entscheidende Ereignis war die Erfindung des Lasers im Jahr 1960. Damit hat alles angefangen. Der eine wichtige Teil für die optische Nachrichtentechnik war somit schon vorhanden. Doch man brauchte auch ein Medium, um die Nachrichten zu transportieren.

Es fehlte noch die Glasfaser.

Es gab schon Glasfasern. Doch mit diesen war es noch nicht möglich, das Licht genügend dämpfungsarm zu transportieren. Die Dämpfung betrug 1000 dB pro Kilometer. Das heißt: Nach zehn Metern Faser waren 90 Prozent des Lichts bereits weg. Mit solchen Glasfasern ließen sich keine längeren Strecken überbrücken. Daher gab es zu Beginn auch recht exotische Ideen, wie optische Nachrichtentechnik mit anderen Lösungen umgesetzt werden könnte.

Wie sahen diese Ideen aus?

Nach meinem Studium habe ich 1974 als Doktorand am Institut für Hochfrequenztechnik an der TU Braunschweig begonnen. Und im Keller dieses Instituts gab es noch einen Aufbau, bei dem Licht durch eine Folge von Linsen geführt wurde. Alle zwei Meter war eine Linse installiert. So wurde das Licht relativ wenig durch Glas und dafür lange durch die Luft übertragen. Dass dies funktioniert, wissen wir selbst aus unserer Alltagserfahrung. Wenn die Luft klar genug ist, kann man ja über lange Strecken

1970er-Jahre: Niedrig gedämpfte Glasfaser

Glasfasern sind an sich schon lange bekannt. Die Dämpfungen lagen dabei – wie auch bei Fensterglas – im Bereich von ca. 1 dB pro Meter bzw. 1000 dB pro Kilometer. Bei Verwendung von Quarzglas ist es mit speziellen Modifikationen der sogenannten „Chemical-Vapour Deposition“ möglich, diese Dämpfung um den Faktor 5000 zu reduzieren. Damit erhält man Fasern mit Dämpfungen im Bereich

von 0,2 dB pro Kilometer. Dies entspricht einer extrem hohen Transparenz, denn selbst nach einer Übertragung über 15 km ist dann noch ca. die Hälfte der Lichtleistung vorhanden. Die Möglichkeit zur Realisierung dämpfungsarmer Fasern wurde 1966 von Charles K. Kao vorhergesagt, der dafür im Jahr 2009 den Nobelpreis erhielt.

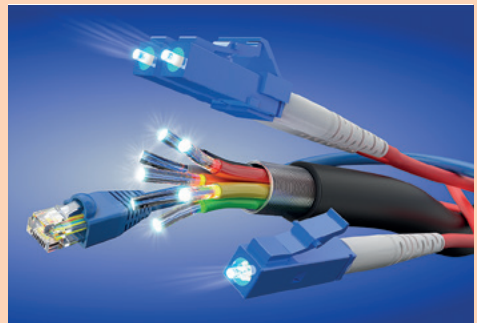


Bild: stock.adobe.com, Thomas Söllner, 244091243

hinweg sehen. Andere Überlegungen waren, Licht durch gasförmige Strukturen mit unterschiedlichen Temperaturen zu führen. Gedanken an den Einsatz von Glasfasern waren in den 1960er-Jahren noch weit weg.

Wann änderte sich das?

Der Physiker Charles Kao stellte 1966 die Vorhersage auf, dass es möglich sei, die Dämpfungswerte von Glasfasern auf unter 20 dB pro Kilometer zu reduzieren. Das bedeutet, dass nach einem Kilometer immerhin noch ein Prozent der Lichtleistung

0,2 dB pro Kilometer erreicht werden. Das ist faszinierend, denn das ist schon unglaublich transparentes Glas.

Wie viel hat sich seitdem in Sachen Dämpfung getan?

Nicht mehr sehr viel. Man hat damals schon fast den Entwicklungsstand erreicht, den wir heute haben. Die Dämpfung liegt jetzt vielleicht bei 0,15 dB oder 0,14 dB pro Kilometer. Aber das sind nur kleine Fortschritte, weil man die fundamentalen Grenzen erreicht hat. Die entscheidenden Entwicklungen geschahen in den 1970er-

monstriert, der im Dauerstrich betrieben werden konnte – also Laserstrahlung ununterbrochen emittiert. Bis dahin gab es Halbleiterlaser, die nur blitzartig – also in periodischen Pulsen – angeschaltet werden konnten, weil sie sehr hohe Ströme brauchten. Die beiden Entwicklungen zusammen, also die niedrig dämpfende Glasfaser und der Dauerstrichlaser, brachten die optische Nachrichtentechnik entscheidend voran. Sie fallen beide zufällig in das Jahr 1970. Daher ist dieses Jahrzehnt so wichtig für die optische Nachrichtentechnik.

1970 stellte die Firma Corning aus den USA die erste Glasfaser vor, deren Dämpfung unter 20 dB pro Kilometer lag. Das war der Durchbruch.

zur Verfügung steht. Das war schon eine deutliche Verbesserung gegenüber den 1000 dB pro Kilometer. Doch das war eine reine Vorhersage aufgrund von Analysen. Die entsprechenden Fasern gab es noch nicht.

Wann wurde aus der Theorie Praxis?

1970 stellte die Firma Corning aus den USA die erste Glasfaser vor, deren Dämpfung unter 20 dB pro Kilometer lag. Das war der Durchbruch. Danach ging es dann Schlag auf Schlag. 1973 gab es schon Fasern mit einer Dämpfung von 4 dB pro Kilometer. Und 1979 konnten schon

Jahren. Mit den damals entwickelten dämpfungsarmen Fasern war es erstmals möglich, auch über weite Entfernungen Nachrichten in hoher Bandbreite optisch übertragen zu können.

Der entscheidende Schritt in den 70er-Jahren war also die Entwicklung der niedrig dämpfenden Faser.

Nicht nur die Faser war wichtig. Auch beim Laser gab es einen entscheidenden Fortschritt. Es gab zwar schon seit 1960 die Lasertechnologie, doch optimal für die Nachrichtentechnik war diese noch nicht. 1970 wurde dann erstmals ein Halbleiterlaser de-

Wie ging es mit den Technologien dann weiter?

Bei AEG Telefunken hatte man sehr früh die Bedeutung der optischen Nachrichtentechnik erkannt. Wir arbeiteten dort dann unter anderem daran, die Laser weiterzuentwickeln. Denn die Dauerstrichlaser, die es damals gab, haben nicht lange gehalten. Nach wenigen tausend Stunden Betrieb haben sie in der Regel den Geist aufgegeben.

Ist es richtig, dass auch die Modulationstechniken verfeinert wurden?

Die einfachste Art, um Informationen mit einem Laser zu übermitteln, ist, ihn einfach ein- und auszuschalten. Dann hat man ein Bit. Wenn man eine Eins übertragen möchte, schaltet man das Licht ein. Wenn man eine Null übertragen möchte, schaltet man Licht aus. So kann man schon relativ hohe Datenraten übertragen. Mit typischen Systemen ließen sich damals 40 Gigabit pro Sekunde erreichen. In den 80er-Jahren gab es dann die Überlegung, die Verfahren der Hochfrequenztechnik zu nutzen. Das heißt, nicht nur die Informationen der Am-

mationen nur über ca. 150 Kilometer übertragen. Dann mussten die Signale nach der Fotodiode – also dem Empfänger – wieder regeneriert und ein neuer Laser moduliert werden, um eine weitere Übertragung zu ermöglichen. Das änderte sich durch den Einsatz einer Faser, die mit Erbium dotiert war. Erbium gehört zu den seltenen Erden und hat die Eigenschaft, dass genau dort eine Verstärkung möglich ist, wo die Dämpfung der Faser am niedrigsten ist. Das ist bei Wellenlängen von ungefähr 1,5 Mikrometer der Fall.

Und mit der Entwicklung der Technik konnte der Siegeszug der optischen Nachrichtentechnik dann beginnen?

Nicht ganz. Denn nachdem die niedrig dämpfende Faser zur Verfügung stand, kam die Frage auf: Wofür brauchen wir überhaupt die optische Nachrichtentechnik? Zunächst dachte man dabei an die Bildtelefonie. Denn es gab damals noch nicht so gute Kompressionsverfahren. Daher hätte man dafür die hohen Bandbreiten der optischen Nachrichtentechnik nutzen können. Doch wie wir alle wissen: Die

Die beiden Entwicklungen zusammen, also die niedrig dämpfende Glasfaser und der Dauerstrichlaser, brachten die optische Nachrichtentechnik entscheidend voran. Sie fallen beide zufällig in das Jahr 1970. Daher ist dieses Jahrzehnt so wichtig für die optische Nachrichtentechnik.

plitude zu nutzen, sondern auch Phasen-Informationen zu übertragen – im Sinne der kohärenten optischen Übertragungstechnik. Die Empfänger, die damit möglich wurden, waren deutlich empfindlicher. Aber das hat sich zunächst nicht durchgesetzt.

Warum nicht?

Eine weitere sehr wichtige Entwicklung war die des erbiumdotierten Faser-Verstärkers zur direkten Verstärkung optischer Signale. Und damit war die kohärente Übertragungstechnik zunächst quasi vom Tisch, weil das Argument Empfindlichkeit dann nicht mehr so entscheidend war. Es dauerte dann weitere 20 Jahre, bis die kohärente optische Übertragungstechnik aufgrund der Fortschritte der digitalen Signalverarbeitung wieder an Bedeutung gewann.

Können Sie das erklären?

Aufgrund der Dämpfung der Glasfaser ließen sich vor Erfindung des erbiumdotierten Verstärkers die Infor-

Was wird damit möglich?

Mithilfe des erbiumdotierten Faser-Verstärkers konnten nun Informationen auch über sehr viel längere Strecken optisch übertragen werden. Wir sprechen dabei von mehreren tausend Kilometern. Es war jetzt also möglich, auch Ozeane zu überwinden. Diese Entwicklung hat die optische Nachrichtentechnik revolutioniert.

Sie haben schon einige Unternehmen erwähnt. Welche hatten aus Ihrer Sicht die wichtigsten Einflüsse auf die Entwicklung der optischen Nachrichtentechnik?

Auf internationaler Ebene sind das sicherlich die Bell Laboratories in den USA und natürlich das Unternehmen Corning, das für die niedrig dämpfende Faser spezielle Herstellungsverfahren entwickelt hat. Dort lagen auch die entsprechenden Patente. In Deutschland waren wir bei AEG Telefunken relativ weit vorne. Siemens war ebenfalls sehr aktiv auf diesem Gebiet.

Bildtelefonie hat sich nie durchgesetzt, zumindest nicht als eigenständige Technologie. Wir nutzen sie jetzt stattdessen im Rahmen des Internets.

Es fehlten also die Anwendungen.

Genau. Denn um telefonieren zu können, reichten ja auch Kupferleitungen aus. Für die Langstreckenübertragung war allerdings klar, dass die Glasfaser überlegen ist. Daher stand schon damals fest, dass sich die optische Nachrichtentechnik durchsetzen wird. Und mit dem stark wachsenden Bedarf an Bandbreite durch das Internet wurde die Technologie dann zunehmend wichtiger und die Glasfaser dann immer näher zum Nutzer gebracht.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: Privat

PROF. DR. TECHN. DR. H. C. JOSEF NOSSEK

studierte Elektrotechnik an der TU Wien. 1980 promovierte er in Kooperation mit Siemens in München, wo er danach in verschiedenen Positionen tätig war. Unter anderem war er Leiter der Entwicklungsabteilung für Richtfunkssysteme sowie Mitglied des Oberen Führungskreises. Von 1989 bis 2016 war er Ordinarius des Lehrstuhls für Netzwerktheorie und Signalverarbeitung an der TU München. Danach war er bis 2019 Senior Professor an der Bundesuniversität von Ceara in Fortaleza, Brasilien. Heute ist er Mitglied der Senior Excellence Faculty der TU München. Nossek war von 2007 bis 2008 Präsident des VDE. Er ist zudem Mitglied der deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech). 2014 erhielt er den VDE-Ehrenring.

INTERVIEW

„Mit unserer Entwicklung waren wir im Markt führend“

Hohe Rechenleistungen auf kleinstem Raum sind heute Alltag. Im Interview erklärt Josef Nossek, wie die Digitalisierung des Richtfunks in den 1980er-Jahren zur Entwicklung von komplexen integrierten Schaltungen auf einem Chip geführt hat und wie die Miniaturisierung in dieser Zeit vorangetrieben wurde.

Herr Nossek, Sie haben in den 1970er-Jahren bei Siemens als Entwicklungsingenieur begonnen. Womit haben Sie sich damals beschäftigt?

In den ersten Jahren habe ich mich sehr intensiv mit hybriden Technologien beschäftigt. Das waren Dünnschichtschaltungen mit aktiven Elementen – also mit Transistoren und Operationsverstärkern, mit denen man spulenlose Filterschaltungen macht. Dies war damals ein großes Thema, da Spulen groß und teuer sind. Zu Beginn der 1980er-Jahre bin ich dann innerhalb des Unterneh-

mens in den Bereich Richtfunkssysteme gewechselt. Das war die Zeit, wo der Richtfunk digital wurde.

Und dafür benötigte man dann integrierte Schaltungen.

Als es richtig losging mit der Digitalisierung des Richtfunks, haben wir an 140-Mbit/s-Systemen gearbeitet, die im Weitverkehr eingesetzt wurden und bei vier und bei sechs Gigahertz gelaufen sind. Dies waren anspruchsvolle Systeme, für die man adaptive Entzerrungen aufgrund der zeitlichen Schwankungen des Funkkanals benötigt hat. Ermöglicht wurde die Ent-

wicklung solcher Systeme dadurch, dass es etwa ab Mitte der 1980er-Jahre möglich wurde, hochintegrierte CMOS-Schaltungen umzusetzen.

Das heißt konkret?

Durch die Entwicklung in der Halbleitertechnologie war es möglich, ausreichend kleine Strukturen zu beherrschen, sodass sich hochkomplexe Schaltungen auf einem Chip realisieren ließen. Das waren damals einige 100 000 Transistoren auf einem Chip, mit Minimalabmessungen von etwa zwei Mikrometern. Heutzutage reden wir von Milliarden Transistoren auf

einem Chip und zehn Nanometern. Aber immerhin – das war damals das erste Mal, dass Systeme mit vollständig digitaler Basisbandverarbeitung mit dieser adaptiven Entzerrung möglich waren. Damit konnte man dann die Größe der Geräte reduzieren und somit auch die Kosten minimieren.

Was war denn die große Herausforderung beim digitalen Richtfunk?

Das Problem beim Richtfunk ist ja: Die Bandbreiten, die zur Verfügung stehen, sind relativ gering. Typischerweise hatte man ein Kanalraster von vielleicht 40 Megahertz Bandbreite für einen Kanal. Wenn man dann 140 Megabit/s unterbringen möchte,

Transistoren auf einem Chip unterbringen zu können. Bei der digitalen Verarbeitung ist die Zahl der Komponenten, die man benötigt, sehr viel höher. Die Signale werden ja mithilfe von AD-Wandlern von analog zu digital gewandelt. Und ein Analogwert wird dabei mit zwölf oder 16 bit Auflösung dargestellt. Daran sieht man, dass einfachere Schaltelemente in riesiger Anzahl benötigt wurden, um diese Funktionen zu realisieren. Was damals genauso wie heute noch der Fall war: Die Kommunikationstechnik war nicht der Treiber der Technologieentwicklung. Sondern sie hat umgekehrt von der Entwicklung der Computertechnik profitiert. Man darf

nem Chip unterbringt, wächst die Bedeutung der Entwurfs- und der Verifikationstechnik. Man muss eine solche komplexe Schaltung zuerst am Rechner simulieren, um sicher zu sein, dass die Masken, die für die Fertigung hergestellt werden, auch funktionieren. Denn so ein Maskensatz kostet extrem viel Geld. Daher ist es sehr wichtig, dass der Entwurf auf Anhieb funktioniert und man keine Re-Designs vornehmen muss.

Wie wurde das gelöst?

Um den Entwurfsweg zu begleiten und am Ende zu verifizieren, wurden spezielle Computer-Tools entwickelt. Die meisten Halbleiterfirmen, welche

Die Kommunikationstechnik war nicht der Treiber der Technologieentwicklung. Sondern sie hat umgekehrt von der Entwicklung der Computertechnik profitiert.

braucht man ein mehrstufiges Modulationsformat. Man kann nicht nur Nullen und Einsen übertragen, sondern wählt aus einem komplexeren Alphabet aus. Und dies führt dann zu komplexerer Signalverarbeitung, weil man auf Störungen am Kanal empfindlicher reagieren muss.

Wie erfolgreich waren Sie mit Ihrer Entwicklung?

Mit unserer Entwicklung, die adaptive Entzerrung mit CMOS-Schaltungen umzusetzen, waren wir im Markt führend. Wir konnten überall auf der Welt – z. B. in Australien, den Niederlanden oder in Schweden – unsere japanischen Konkurrenten übertrumpfen.

Und ausschlaggebend war die Miniaturisierung?

Damals hat die Halbleitertechnologie für solche hoch integrierten Schaltungen begonnen. In dieser Zeit sind Chipgenerationen mit Speicherbausteinen bis zu 256 K auf den Markt gekommen. Denn die entscheidende Herausforderung war ja, genügend

aber nicht vergessen: Die analoge Technik ist in der Halbleiterei mittlerweile zwar eine Nischentechnologie, doch sie wird noch immer benötigt.

Woher kamen die Halbleiter, die Sie verwendet haben?

Siemens hatte damals ja noch eine eigene Halbleiterfertigung. Doch man benötigt bei solchen Dingen immer eine Second Source. Daher war es für uns immer wichtig, dass die Bausteine, die wir entwickelt haben, auch von anderen Herstellern gefertigt wurden. So ist das ja heute noch üblich. Alle möglichen Anbieter von elektronischen Geräten lassen die Chips, die sie selbst entwickeln, beispielsweise bei dem Halbleiterhersteller TSMC in Taiwan fertigen. Diese Entwicklung ist in den 1980er-Jahren so richtig in Gang gekommen.

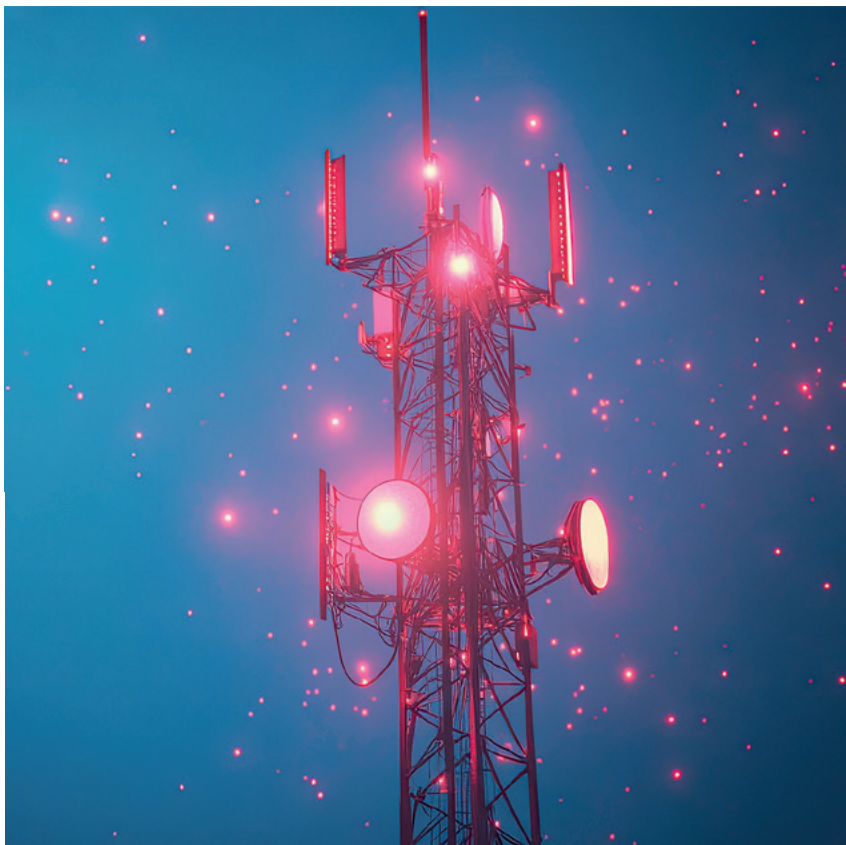
Welche Auswirkungen hatte denn die Miniaturisierung auf die Produktentwicklung der Schaltungen?

Durch die Komplexität, die entsteht, wenn man viele Bauelemente auf ei-

die Technologie vorangetragen haben, haben zunächst auch versucht, diese Werkzeuge selbst zu entwickeln. Aber im Laufe der Zeit haben sich die entsprechenden Experten abgespalten und eigene Firmen gegründet. Und jetzt gibt es neben den Unternehmen, welche die Technologie für den Herstellungsprozess anbieten, andere Firmen, die diese Entwurfswerkzeuge zur Verfügung stellen. Das spiegelt sich auch in der Forschungswelt wider. An den guten Universitäten findet man neben den Lehrstühlen für die Fertigungstechnologien auch Institute oder Lehrstühle, die sich mit dem Entwurfsprozess beschäftigen. Die Entwurfswelt hat sich zu einer eigenen Welt entwickelt, in der immer noch sehr viele europäische Firmen aktiv sind. Infineon zum Beispiel lässt zwar bei anderen herstellen, macht aber seine Entwürfe selbst.

Warum ist das so?

Das Know-how für den Systementwurf ist etwas, das über eine lange Zeit mit viel Erfahrung aufgebaut



werden muss. Und daher möchte man dies als Unternehmen nicht preisgeben.

Hatte die Entwicklung bei den Schaltungen auch Auswirkungen auf die Fertigungstechnologien?

ten nicht mehr mit Drahtanschlüssen, die in Löcher in der Leiterplatte gesteckt werden, per Schwall-Lötverfahren verbunden, sondern die Bauelemente werden direkt auf Teflon- oder Keramiksubstraten platziert. So wurde die Miniaturisierung über die Gren-

an die Antenne im Smartphone bringt, und einen rauscharmen Vorverstärker auf der Empfangsseite. Dabei gibt es die Herausforderung, dass man eine geringe Schaltungskomplexität, aber extrem hohe Frequenzen hat. Die Mikro- und Nanoelektronik muss daher Komponenten bereitstellen, die bei diesen hohen Frequenzen verstärken, also noch Schwingungen erzeugen können. Früher hat man zur Verstärkung der Signale Wanderfeldröhren genutzt. Die Entwicklungen in der Mikroelektronik haben dann zur Miniaturisierung geführt und dazu, dass uns heute komplexe Geräte mit niedrigem Energieverbrauch und überschaubaren Kosten zur Verfügung stehen.

Lässt sich dann generell sagen, dass die Entwicklungen in den 1980er-Jahren die Basis gelegt haben für das, was danach folgte?

Die heutigen Rechenleistungen von Geräten wie einem Laptop oder einem Smartphone wären unmöglich, wenn es nicht diesen Technologiefortschritt gegeben hätte. Das, was man mit einer Technologiegeneration erreicht hat, ist immer Voraussetzung dafür, um den Schritt in die folgende Generation zu machen. Ich finde es nur bedauerlich, dass man die Herstellung dieser extrem groß integrierter Schaltungen in Europa nicht wei-

Durch die Komplexität, die entsteht, wenn man viele Bauelemente auf einem Chip unterbringt, wächst die Bedeutung der Entwurfs- und der Verifikationstechnik.

Ja, natürlich. Man muss ja die Komponenten auf Trägermaterialien mit anderen Komponenten verschalten, damit überhaupt eine Systemkomponente entstehen kann. Das geschah zunächst auf normalen Leiterplatten. In den 1970er- und 1980er-Jahren wurde dann die sogenannte Surface Mounted Technology – also SMT – eingeführt. Dabei werden Komponen-

ten der integrierten Schaltung hinaus weiter vorangetrieben.

Sie haben gesagt, die analoge Technik wird noch immer benötigt. Können Sie das erklären?

Analoge Komponenten sind nach wie vor notwendig, auch in den Smartphones. Beispielsweise benötigt man einen Sendeverstärker, der das Signal

tergeführt hat. Man war der Meinung, dass dies in Fernost zu günstigeren Kosten möglich sei. Und heute versucht man, dies wieder zurückzudrehen.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz

PROF. DR.-ING. WERNER WIESBECK

studierte an der TU München Hochfrequenztechnik und Nachrichtentechnik, diplomierte 1969 und promovierte 1972. Anschließend war er in verschiedenen Positionen bei AEG Telefunken tätig – unter anderem als Entwicklungsleiter Mikrowellentechnik in Flensburg und als Vertriebsleiter im Fachbereich Empfänger/Peiler in Ulm. 1983 folgte er einem Ruf an die Universität Karlsruhe – heute Karlsruhe Institut für Technologie (KIT) – als Leiter des Instituts für Höchstfrequenztechnik und Elektronik. Dieses Institut hat er bis zu seiner Pensionierung 2014 geführt. Wiesbeck ist Distinguished Senior Fellow des KIT, Fellow der VDE ITG, sowie Life Fellow des IEEE. Er ist außerdem Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften und der Deutschen Akademie für Technikwissenschaften (acatech). Er erhielt drei Ehrendoktoren. Er ist heute noch in einigen Bereichen aktiv und gibt sein Wissen an die jungen Kollegen weiter.



Bild: Privat

INTERVIEW

„Wir haben das weltweit erste komplette Halbleiter-Automotive-Radar entwickelt“

In den 1970er- und 1980er-Jahren gab es entscheidende Entwicklungen, welche die Verwendung der Radartechnik vor allem im zivilen Bereich vorangebracht haben. Werner Wiesbeck war dabei eine der treibenden Kräfte. Im Interview erklärt er, woran er konkret gearbeitet hat und welchen Einfluss dies unter anderem auf die Fahrzeugtechnik hatte, die wir heute nutzen.

Herr Wiesbeck, wann haben Sie begonnen, sich mit dem Thema Radar zu beschäftigen?

Ich bin nach meiner Diplomarbeit und Promotion zu AEG-Telefunken nach Ulm gegangen und habe dort in der Vorentwicklung die Abteilung Mikrowellentechnik aufgebaut. Dort haben wir uns besonders mit neuen Themen beschäftigt. Und eines dieser neuen Themen war unter anderem das Automotive Radar.

Was haben Sie konkret gemacht?

Wir hatten einen Auftrag des Bundesforschungsministeriums, der allerdings noch nicht sehr konkret war, eine Mikrowellen-Sensorik zu entwickeln. Die Vorgabe war lediglich, Radartechnik bei hohen Frequenzen zu entwickeln und die Systeme so klein zu machen, dass sie zum Beispiel in bestimmte Instrumente oder auch in Fahrzeuge integrierbar sind. Wir haben aus unserem Verständnis für die

Physik der Wellenausbreitung dann die integrierte Mikrowellentechnik genutzt, um entsprechende Sensoren zu entwickeln.

Und diese Radartechnik wurde dann im Fahrzeug eingesetzt?

Wir haben das weltweit erste, komplette Halbleiter-Automotive-Radar entwickelt – bei einer Frequenz von ca. 36 GHz. Das Gerät war ungefähr so groß wie eine Milchdose, der

Durchmesser der Antenne betrug allerdings zur Erzielung der gewünschten azimutalen Auflösung 25 Zentimeter. Das System ließ sich sehr gut in ein Fahrzeug einbauen, sodass es fast nicht zu sehen war – bis auf die Antenne natürlich.

Was war das Besondere an dieser Entwicklung?

Bis in die 1980er-Jahre hat die Industrie die Radartechnik mit Röhren bei relativ tiefen Frequenzen betrieben. Wir haben schon in den 1970er-Jahren unsere Radarsysteme vollkommen auf Halbleiter umgestellt und konnten damit dann später bis in den Frequenzbereich von 70 Gigahertz gelangen. Das war schon ein gravierender Fortschritt.

Wie haben Sie das geschafft?

Meine Gruppe bei AEG Telefunken hat damals die planare Schaltungs-

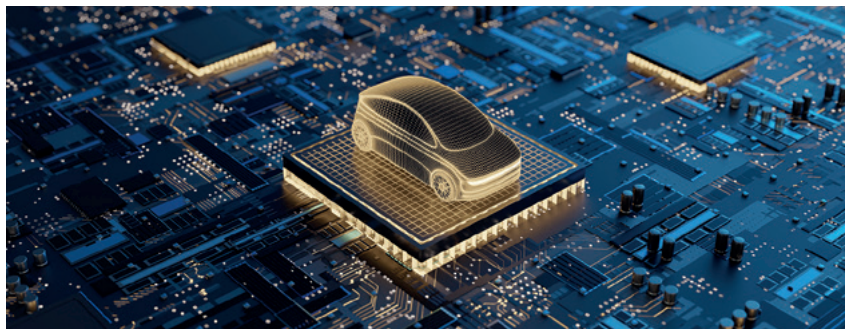


Bild: stock.adobe.com_Lee/KI_522121940

noch Fahrzeuge ihre Umgebung erfassen?

Die Grundlage der Systemtechnik ist die gleiche. Es werden also Oszillatoren aufgebaut. Die Oszillatoren-Signale werden dann moduliert und die modulierten Signale werden gesendet, wieder empfangen und analysiert. Daraus lässt sich dann die Information über die Objekte, die reflektiert haben, ableiten. Die einzelnen Techniken hierzu sind vielfältig.

dann auch getestet. Aber ich spreche hier nicht von einer vollkommen abgeschlossenen Entwicklung. Das Bundesforschungsministerium hat unsere Ideen mit einer gewissen Verzögerung aufgenommen und in folgende Aufträge für Forschungsarbeiten einfließen lassen.

Wenn man über Radar spricht, denkt man zunächst natürlich an den Einsatz im militärischen Be-

Wir haben schon in den 1970er-Jahren unsere Radarsysteme vollkommen auf Halbleiter umgestellt und konnten damit dann später bis in den Frequenzbereich von 70 Gigahertz gelangen. Das war schon ein gravierender Fortschritt.

Technik entwickelt – also die Streifenleitungstechnik für aktive Schaltungen. Genauer gesagt, haben wir die Streifenleitungstechnik auf Keramik-Substraten aufgebaut. Und damit war die Technologie bis in den hohen Mikrowellenbereich verfügbar.

Was waren dabei die größten Herausforderungen?

Die Entwicklung der Technik an sich war eine Herausforderung. Eine andere war, die dafür notwendigen Halbleiter zu bekommen und zu integrieren. Denn das war zu dieser Zeit noch relativ schwierig.

Entspricht die Technologie, die Sie damals entwickelt haben, auch derjenigen, mit der heutzutage

Kann man sagen, dass Sie die Basis gelegt haben für das, was heute in der Automobilindustrie Standard ist?

In diese Richtung waren die Arbeiten. Ohne die Entwicklungen, die in den 1970er- und 1980er-Jahren gemacht wurden, wäre die Technologie von heute nicht so zügig realisierbar gewesen. Natürlich wurde sie kontinuierlich weiterentwickelt. Wir haben uns damals sogar schon mit dem autonomen Fahren beschäftigt.

Das ist ja interessant, wie weit ist das gegangen?

Wir haben versucht herauszufinden, ob man mit der Systemtechnik, die wir entwickelt hatten, auch autonom fahren könnte. Und das haben wir

reich. Inwieweit war denn die Entwicklung, über die wir bisher gesprochen haben, auch für solche Anwendungen interessant?

Das Militär war zunächst nicht an Radargeräten mit hohen Frequenzen interessiert. Dort wollte man bei tieferen Frequenzen arbeiten, wegen der erzielbaren Leistung für große Reichweiten. Die Frequenzbereiche, die etwa die Marine für die Ortung und die Navigation nutzt, lagen bei ein paar hundert Megahertz. Die Verantwortlichen im Militär hatten damals keine Vorstellung davon, was sich bei höheren Frequenzen aus der reflektierten Information auswerten lässt. Die Prozesse der Signalverarbeitung und der Nutzung der Informationen haben sich dann erst schrittweise wei-

terentwickelt. Aber im Prinzip ist es noch heute so, dass im militärischen Bereich nur bei wenigen Anwendungen mit sehr hohen Frequenzen gearbeitet wird.

Die Anwendungen für Radartechnik bei hohen Frequenzen lagen also vor allem im zivilen Bereich?

Die zivile Anwendung der Radartechnik lag damals noch am Anfang. Neben dem Forschungsministerium hat sich die Industrie sehr für unsere Entwicklung interessiert. Dabei ging es um eine Reihe verschiedener Anwendungen – zum Beispiel in der Robotik,

die Ortung beschäftigt. Das sind SAR- und auch Radar-Detektionssysteme. Es wurden nicht nur aktive, sondern primär passive Systeme entwickelt. Dabei geht also darum, Signale nur zu empfangen. Hauptaufgabe war damals, geeignete Antennen für die Ortung aufzubauen, zum Beispiel zwei Antennen, mit denen man genau peilen kann. Die Empfangssignale müssen dann in der Regel über einen großen Frequenzbereich verarbeitet werden können. Das kann bis in den Gigahertz-Bereich sein. Daher stand im Mittelpunkt der Entwicklung, Systeme aufzubauen, um einen solch

Das lässt sich dann etwa für die Qualitätssicherung von Produkten einsetzen?

Ja, das ist ein Anwendungsbeispiel für die Radartechnik.

Wenn wir jetzt noch einmal einen Blick auf die Entwicklung der Radartechnik bei hohen Frequenzen werfen. Welche Firmen oder Einrichtungen waren dabei federführend?

Neben AEG-Telefunken waren mehrere Firmen in ihren Forschungsarbeiten mit der Radar-Technik beschäftigt, zum Beispiel Alcatel und

Die Entwicklung der Technik an sich war eine Herausforderung. Eine andere war, die dafür notwendigen Halbleiter zu bekommen und zu integrieren. Denn das war zu dieser Zeit noch relativ schwierig.

der Messtechnik usw. Für diese Anwendungen waren höhere Frequenzen und größere Bandbreiten attraktiv.

Welche Möglichkeiten eröffnet Radar in der Robotik?

Die Anwendungen sind vielfältig. Da geht es zum Beispiel um Roboter, die in Produktionsumgebungen eingesetzt werden. Objekte, die sich dort bewegen, lassen sich mit Radartechnik kontrollieren und steuern. In der Robotik wird zwar heute vor allem mit optischen Technologien gearbeitet. Aber Mikrowellentechnik wird teilweise auch noch genutzt – etwa in Anwendungen mit Verstaubung, in denen die Optik an ihre Grenzen gerät.

Wenn man sich mit Radartechnik beschäftigt, dann stößt man auch auf das Thema SAR – also Synthetic Aperture Radar. Können Sie dazu noch etwas sagen?

Als ich aus der Vorentwicklung bei AEG zum Fachbereich Empfänger/Peiler gewechselt bin, haben wir uns dort ganz speziell mit Systemen für

großen Frequenzbereich abzudecken. Da dieser Bereich so groß ist, kommt dabei nicht ein System alleine zum Einsatz, sondern man benötigt mehrere.

Warum ist SAR so wichtig?

Mit der SAR-Technologie ist es möglich, flächig zu orten. Das heißt, man kann zum Beispiel von einem Flugzeug oder einem Satelliten aus die Erde großflächig aufnehmen. SAR ist auch im militärischen Bereich ein Thema, weil man damit die Ortung über einen großen Winkelbereich durchführen kann. Daneben gibt es auch Anwendungen in der Industrie.

An welche Anwendungen denken Sie dabei?

Speziell in der Fertigungstechnik bietet SAR einen großen Nutzen. Denn man kann damit Objekte, die zum Beispiel gefräst wurden, ausleuchten, die Reflexion analysieren und anhand der Phasen-Auswertung der Reflexion die Oberfläche bis auf ein paar Mikrometer genau beschreiben.

weitere – wobei vorrangig militärische Anwendungen das Thema waren. Die Nutzung der Radar-Sensorik für industrielle Anwendungen kam etwas verzögert zum Einsatz. Neben uns haben aber auch andere Forschungseinrichtungen und Firmen Grundlagen zur Radar-Technik bearbeitet. Auch diverse Universitäten, beispielsweise die RWTH Aachen, waren aktiv.

Das heißt, die Entwicklung wurde vor allem aus Deutschland vorangetrieben?

Ja, das kann man sagen. Wir hatten den Eindruck, dass wir hier absolut vorne in der Entwicklung waren. Die anderen europäischen Länder stellten keine Konkurrenz dar. Es gab zwar in den USA diverse Arbeiten zu der Technologie – auch mit hohen Frequenzen. Doch diese wurden kaum publiziert, sodass sich also kaum sagen lässt, was dort wirklich gemacht wurde.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: BBLabs/Dominique Wolniok

PROF. DR.-ING. KARLHEINZ BRANDENBURG

hat sein Elektrotechnik- und Mathematikstudium an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg absolviert. Danach wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Technische Elektronik und promovierte im Jahr 1989. Anschließend arbeitete er als Postdoc bei den AT&T Bell Laboratories. Danach war er in Erlangen akademischer Rat auf Zeit und als Abteilungsleiter am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS aktiv. Im Jahr 2000 wechselte Brandenburg an die Technische Universität Ilmenau und wurde Inhaber des Lehrstuhls Elektronische Medientechnik des Instituts für Medientechnik. Im Mai 2000 wurde er zum Leiter der Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Elektronische Medientechnologie AEMT in Ilmenau ernannt, die er zum 1. Januar 2004 in das eigenständige Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie IDMT überführte. Brandenburg hat am Fraunhofer IIS gemeinsam mit weiteren Kollegen das MP3-Verfahren entwickelt. Er ist Mitglied des Standardisierungsgremiums MPEG-Audio sowie Fellow der Audio Engineering Society (AES), des IEEE und der European Signal Processing Society.

INTERVIEW

„Wir haben uns ausgetauscht und gleichzeitig gegenseitig angetrieben“

MP3 und MPEG sind als Standards für Video- und Audiodaten nicht mehr wegzudenken. Professor Karlheinz Brandenburg, einer der MP3-Väter, erzählt im Interview, wie der fruchtbare Konkurrenzkampf zweier Cluster unter fränkischer sowie bayerischer Führung diese Erfolgsgeschichte möglich gemacht hat.

Herr Brandenburg, inwiefern waren die 1980er-Jahre eine wichtige Zeit, wenn es um die Digitalisierung von Video und Audio geht?

Zunächst einmal muss man dazu sagen, dass vorher schon viele Grundlagen gelegt wurden. Die Bildcodierung mittels DCT beispielsweise geht auf Arbeiten in den 1970er-Jahren zurück. Das ist schon sehr verblüffend, wenn man sich überlegt, dass dies ohne die heutigen Computer entworfen und verifiziert wurde. Da stellt

sich die Frage: Wie macht man so etwas nur mit Papier und Bleistift?

In den 1980er-Jahren waren die Möglichkeiten, an solchen Dingen zu arbeiten, wahrscheinlich schon etwas besser.

Ja, in dieser Zeit eröffneten sich dann sehr viele Möglichkeiten. Es waren zum Beispiel erste Minicomputer mit deutlich besserer Rechenleistung verfügbar. Und man konnte Technologien wie digitale Signalprozessoren nutzen,

die unter anderem bei uns am Lehrstuhl für Technische Elektronik der Universität in Erlangen entwickelt wurden. Diese waren aus vielen Einzelteilen zusammengesetzt. Ein ganzer Schrank voll mit Rechenleistung, aber natürlich nicht mit dem vergleichbar, was heute allein ein Mobiltelefon leisten kann. Doch damit war man in der Lage, zum Beispiel FFTs in einem Tempo zu berechnen, dass man an Echtzeitverarbeitung sowohl von Video als auch von Audio denken

konnte. Das war auch der Ausgangspunkt erst für meine Diplomarbeit und dann meine Dissertation: Dinge, die in Simulationen schon veröffentlicht waren, auf einem digitalen Signalprozessor umzusetzen. Und sich dann zu überlegen, wie man diese weiterentwickeln kann.

Wie weit waren denn die theoretischen Überlegungen?

Es gab ein Buch von N. S. Jayant und Peter Noll mit dem Titel „Digital Coding of Waveforms“. In diesem geht es um Bild-, Video- und Sprachcodie-

Synthesis für die Musikcodierung einzusetzen. Das heißt: Hypothesen formulieren und diese mit Eingabedaten zu vergleichen, bis eine der Hypothesen eine gute Übereinstimmung ergibt. Das war ein großer Durchbruch. Der andere große Durchbruch war etwas, das an verschiedenen Stellen gleichzeitig aufgetaucht ist: nämlich nicht mehr klassische Optimierung zu verwenden.

Das heißt?

Es gibt ja die klassischen Optimierungsmethoden – also etwa nach

Frequenzschwerpunkt gibt, dann werden die dazugehörigen Härchen angeregt. Es werden aber auch Härchen zu niedrigeren und höheren Frequenzen hin angeregt. Und wenn diese schon angeregt sind und noch ein leiser Klang hinzukommt, dann ändert das nichts mehr. Das heißt, man kann also grob quantisieren, sodass diese Maskierungseffekte berücksichtigt sind, und trotzdem viel weniger Bits benötigen. Wir haben das einmal als gehörangepasste Audiokodierung bezeichnet. Oder auf Englisch: perceptual coding of audio signals.

Wir haben uns mit der Frage beschäftigt: Wie grob darf ich quantisieren in dem Musikgemisch, sodass der Unterschied nicht hörbar ist? Die damaligen Algorithmen haben im Wesentlichen versucht, die Mechanik im Innenohr nachzubilden.

rung. Also um grundlegende Fragen: Was ist möglich? Welche Methoden können verwendet werden? Und in diesem gab es auch einen Absatz zur Codierung von qualitativ hochwertigem Audio. In diesem hieß es: „Nach Stand der Technik geht es nicht“. Das war für uns in Erlangen ein Ansporn.

Und wozu hat dieser geführt?

Mitte der 1980er-Jahre war ich in einem DFG-Projekt angestellt, bei meinem Doktorvater Professor Dieter Seitzer. Ich habe damals darüber nachgedacht, ob man bestimmte Dinge nicht andersherum machen könne. Es gab zwar erste Verfahren, die tatsächlich Musik codiert haben. Und für bestimmte Musik klang das Ergebnis unerwartet gut. Doch für andere Musik hat es einfach nicht funktioniert, weil alle möglichen Arten von Artefakten produziert wurden.

Was war Ihr Ansatz?

Ich habe mir überlegt, ob man nicht auf Ideen aus der Sprachcodierung und aus der Videocodierung zurückgreifen könne. Sozusagen Analysis by

kleinstem Fehlerquadrat zu optimieren. Diese wurden in der Sprachcodierung verwendet. Aber für Musik hat das nicht funktioniert. Und das lag daran, dass man nicht nur die Quelle des Signals im Blick haben muss – also die Statistik des Eingangssignals. Sondern man muss auch betrachten, wie unser Gehör funktioniert. Wenn ich eine bestimmte Klasse von Algorithmen habe und nach kleinstem Fehlerquadrat optimiere, sodass der Signal-Rausch-Abstand optimal wird, dann klingt das immer schlechter, als wenn ich nach entsprechenden psychoakustischen Kriterien optimiere.

Und was haben Sie mit dieser Erkenntnis gemacht?

Wir haben uns mit der Frage beschäftigt: Wie grob darf ich quantisieren in dem Musikgemisch, sodass der Unterschied nicht hörbar ist? Die damaligen Algorithmen haben im Wesentlichen versucht, die Mechanik im Innenohr nachzubilden. Auf der Gehörschnecke schwingen ja Sinneshärchen. Und wenn es an einer bestimmten Stelle einen bestimmten

Was ist daraus dann entstanden?

Zum einen meine und noch ein paar andere Dissertationen. Und zum anderen kam Ende der 1980er-Jahre die Idee auf, digitalen Hörfunk einzuführen. Dieser ist ja heute unter DAB+ bekannt. Dafür wurde ein Eureka-Projekt ins Leben gerufen – also Koordination lokaler Förderung auf europäischer Ebene. Mit diesem Projekt sollte die Standardisierung für den digitalen Hörfunk vorangetrieben werden. Im 1988 gebildeten Standardisierungsgremium MPEG wurde in der „audio subgroup“ nach Vorschlägen gefragt. Diese wurden in mehrere Cluster zusammengefasst, die aus verschiedenen Unternehmen und Forschungsinstituten bestanden. Das Eureka-Projekt hat europäischen Unternehmen einen erheblichen Vorsprung in diesem Bereich verschafft. Und zwei der Cluster waren in den ersten Tests in MPEG Audio weit vor den anderen.

Welche waren das?

Das eine Konsortium wurde vom Fraunhofer IIS in Erlangen angeführt,

das andere vom Institut für Rundfunktechnik in München. Das war eine fruchtbare Konkurrenz. Wir haben uns ausgetauscht und gleichzeitig gegenseitig angetrieben. Ich sage immer: „Wir haben auf der Weltebene einen Konkurrenzkampf geführt. Dabei war es eigentlich Franken gegen Bayern.“ Und beide Cluster waren dann ja auch erfolgreich.

Was ist daraus entstanden?

Da muss ich etwas ausholen. Leonardo Chiariglione hatte in Italien die Entwicklung von MPEG-1 vorangetrieben – dem Video- und Audiodatenstandard der Moving Picture Experts Group. Das war eine deutliche Weiterentwicklung dessen, was für Standbilder schon genutzt wurde und was wir heute als JPEG kennen. Der Standard beinhaltete etwa DCT-Blockbildung und auch eine Entropiecodierung. Eine Beispielanwendung dafür war die Verbreitung von Bewegtbildern über CD-ROM. Bis dahin war es so, dass in der ITU – also der International Telecommunications Union – eigentlich für jeden Anwendungsfall ein neuer Standard entwickelt wurde. Doch Chiariglione sagte:



Bild: stock.adobe.com_Tenebrosa_296005628

Und was war das Resultat der beiden genannten Cluster?

Aus der Arbeit des Münchner Konsortiums entstand der Standard MPEG-Audio Layer 2, der in der ersten Generation des digitalen Hörrundfunks und auch für das digitale Fernsehen eingesetzt wurde. Der gleichzeitig entwickelte und standardisierte sogenannte Layer 3 wurde nicht für DAB ausgewählt. Wir haben einen Schwerpunkt für den Einsatz dieser Version bei der Speicherung auf Computern und für die Übertragung über Netzwerke gesetzt – allerdings mit ein bisschen Verzögerung, weil die Leute uns nicht geglaubt ha-

war die Audiokodierung bei den Consumer-Elektronikfirmen noch nicht wirklich angekommen – jedenfalls nicht unsere Variante. Dann haben wir von amerikanischen Freunden den Rat bekommen: „Versucht es doch mal mit Übertragung über das Internet.“ Hinzu kamen dann noch Entwicklungen wie etwa die Verfügbarkeit von Encodern und Decodern. Und gegen Ende der 1990er-Jahre ist dann das Thema Audio- und Musikübertragung über das Internet förmlich explodiert. Sehr zum Leidwesen der Musikindustrie. Der Austausch von Musik im MP3-Format war dann für einen großen Teil des Datenverkehrs

Der gleichzeitig entwickelte und standardisierte sogenannte Layer 3 wurde nicht für DAB ausgewählt. (...) Für die Files in diesem Format verwendeten wir die File-Endung MP3. Und der Rest ist Geschichte.

„Lasst uns doch einen universellen Standard entwickeln, der für verschiedene Anwendungen passt.“ Und die Leute, die im Eureka-Projekt für den digitalen Hörrundfunk aktiv waren, sagten ihrerseits: „Bevor wir uns selbst mit Verifikationsmethoden und ähnlichem beschäftigen, lasst uns einfach bei MPEG mitwirken. Und was am besten funktioniert, verwenden wir dann für den digitalen Rundfunk.“ Deswegen waren die Partner von DAB auch in dem Vergleichstest bei MPEG mit dabei.

ben, dass so etwas auch implementierbar ist. Für die Files in diesem Format verwendeten wir die File-Endung MP3. Und der Rest ist Geschichte.

Inwieweit lassen sich denn die Entwicklungen bei der Digitalisierung von Video und Audio, die Sie beschrieben haben, auch als Grundlage des Internets sehen, wie wir es heute kennen?

Ich würde sie nicht als Grundlage sehen. Aber sie haben die Entwicklung des Internets schon sehr befruchtet. In der frühen Mitte der 1990er-Jahre

verantwortlich. Später galt dasselbe dann auch für Video. So gesehen haben die Entwicklungen in den 1980er-Jahren dazu beigetragen, dass aus dem Internet dieses allgemeine Kommunikationsmedium für alle möglichen Informationen und Mediendaten geworden ist, das wir heute kennen. Und das hat übrigens auch dazu geführt, dass ich vor ein paar Jahren in die Hall of Fame der Internet Society aufgenommen wurde.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: Andreas Traßl / TU Dresden

PROF. GERHARD P. FETTWEIS

ist Lehrstuhlinhaber des Vodafone Stiftungslehrstuhls Mobile Nachrichtensysteme am Institut für Nachrichtentechnik an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden sowie CEO und Scientific Director des Barkhausen Instituts. Er studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen, wo er auch promovierte. Anschließend arbeitete Fettweis unter anderem als Gastwissenschaftler bei IBM in San José. Er ist Mitglied der Wissenschaftlichen Kommission Niedersachsen und der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) 2009 wurde er zum IEEE-Fellow gewählt.

INTERVIEW

„Durch die Roaming-Funktion wurde GSM zum Verkaufsschlager“

In den 1990er-Jahren wurde Pionierarbeit für den Mobilfunk geleistet. Professor Gerhard Fettweis erklärt, wie der Standard GSM die ganze Welt erobern konnte und welche Fehler im Zusammenhang mit UMTS gemacht wurden.

Herr Fettweis, welche Bedeutung hatten die 1990er-Jahre in der Entwicklung der mobilen Kommunikation?

Dazu möchte ich zunächst ein bisschen ausholen. In den 80er-Jahren entstand die erste Generation des Mobilfunks, der analoge Mobilfunk. Im Grunde ging es dabei um Autotelefone, die teuer sowie unhandlich waren und viel Energie brauchten. Die Zielgruppe waren Business-Kunden und Menschen, die sich einen

Mercedes der S-Klasse leisten konnten. Gegen Ende dieser Dekade ging es dann los mit der Schnurlos-Telefonie. Man konnte sich für 99 D-Mark ein solches Telefon für zu Hause kaufen und damit experimentieren. Man musste nun kein 20 Meter langes Kabel mehr hinter sich herziehen, wenn man telefonierte. Damit wurden die Privatkunden adressiert und auf den Geschmack gebracht, dass kabelloses Telefonieren seinen Wert hat. Und als eine gewisse Verbreitung dieser Schnur-

los-Telefonie erreicht worden war, ging es in den 90er-Jahren mit der zweiten Mobilfunkgeneration los – also 2G.

Was waren bei der zweiten Generation die großen Innovations-sprünge?

Man muss bedenken, dass Anfang der 90er-Jahre 90 Prozent aller Mobilfunkkunden in den USA lebten. Dort gab es vier verschiedene konkurrierende digitale Mobilfunkstandards,

was aber aufgrund der Größe des Landes kein Problem war. In Europa dagegen existierte vorher, im analogen Mobilfunk, ein wahrer Flickenteppich an Standards – fast jedes Land hatte eine eigene Lösung. Daher entstand hier auch die innovative Idee, den zweiten Mobilfunkstandard so zu definieren, dass Roaming über viele Ländergrenzen hinweg möglich ist. So entstand der digitale Standard GSM.

Das hört sich nach einer großen Herausforderung an.

In dieser Zeit wurde wirklich Pionierarbeit geleistet. Denn man brauchte einen Funkstandard, der auch in schnellen Zügen und auf deutschen Autobahnen genutzt werden konnte – bei dem also bei 200 Kilometer pro Stunde das Gespräch nicht abbricht.

Andere Standards waren dagegen schlanker?

Bei den amerikanischen Funkstandards gab es einen Ordner für die Spezifikation und einen für die Testvorgaben. Ich arbeitete damals in Kalifornien und meine Kollegen sagten: „Schau dir mal GSM an. 26 Bände – das kann doch nicht funktionieren.“

Aber das Gegenteil war der Fall.

Bei keinem anderen Standard wurde das Roaming so groß gedacht wie bei GSM. Zu Beginn war den meisten Menschen nicht bewusst, wie wichtig dieses Thema ist. Doch das hat sich schnell geändert. Denn durch die Roaming-Funktion wurde GSM zum Verkaufsschlager. Wenn ein Funkstandard zehnmal mehr Endgeräte und zehnmal mehr Basisstationen verkauft, dann setzt er sich durch –



Bild: stock.adobe.com_IconArt_480909725

Bei keinem anderen Standard wurde das Roaming so groß gedacht wie bei GSM.

Und er musste in europäischen Straßenschluchten genauso funktionieren wie auf weiten Steppen in Nordskandinavien. Wichtig für die Entwicklung von GSM ist, dass die verschiedenen Gruppen aus den unterschiedlichen Ländern zusammengearbeitet haben. Man hat versucht, Kompromisse zu finden und konkurrierende Technologien sowie Ideen aus England, Frankreich, Deutschland oder Skandinavien zusammenzubringen – ganz im europäischen Sinn.

Entsprechend umfangreich war dann wahrscheinlich auch die Spezifikation.

Die Idee, einen Standard länderübergreifend für ganz Europa zu entwickeln, hat dazu geführt, dass die Spezifikation 13 Ordner dick war. Und die Testvorgaben hatten ungefähr den gleichen Umfang. Für diese Komplexität war zum einen das Roaming verantwortlich. Und zum anderen gab es das Ziel, Teile des ISDN-Protokolls mitabzubilden.

auch weltweit. Das haben dann auch die Amerikaner und die Japaner bemerkt. Letztere hatten mit JDC einen Standard, der technologisch sogar besser war als GSM. Aber er hat sich politisch nicht durchgesetzt.

Welche Unternehmen hatten in Deutschland entscheidenden Anteil an der Entwicklung?

Da sind sicherlich die Telefunken Systemtechnik aus Ulm, Philips Kommunikations-Industrie aus Nürnberg, Siemens ÖN – also Öffentliche Netze – aus München zu nennen. Da es sich um ein europaweites Projekt gehandelt hat, waren aber ganz viele Gruppen und Personen aus vielen verschiedenen europäischen Ländern involviert. Man darf aber nicht vergessen, dass Europa auch beim Chipdesign für Mobilfunk in dieser Zeit die Nase vorn hatte.

Inwiefern?

Es war damals in den Mobiltelefonen eine riesige Zahl verschiedener Chips verbaut. Es gab zum Beispiel einen

Analog-Frontend-Chip zur Verarbeitung analoger Signale, einen Chip für die Sprachkodierung oder einen für das sogenannte Modem, der aus den digitalen Funkwellen die Bits errechnet. Siemens Halbleiter hat als erstes Unternehmen diese vielen Chips in einen einzigen CMOS-Chip integriert – unter der Bezeichnung GOLD, die für GSM One-chip Logic Device steht. Später haben dann auch andere Unternehmen wie etwa Philips Semiconductor ähnliche Lösungen entwickelt. Im Gegensatz dazu hat Ericsson gemeinsam mit Texas Instruments eine Chip-Lösung entwickelt, die ab Mitte der 90er-Jahre den Markt dominierte. Aber Siemens war der Vorreiter.

Wurden in den 90er-Jahren bereits auch die Weichen für die dritte Mobilfunkgeneration gestellt?

Ab Mitte der 90er-Jahre begann die Vorbereitung in Richtung UMTS – also 3G. Und dabei kam es zum großen Standardkrieg zwischen CDMA und TDMA.

Das heißt?

CDMA ist ein Code-Multiplexverfahren, bei dem Daten gleichzeitig auf einem gemeinsamen Frequenzbereich übertragen werden. Zur Unterscheidung der verschiedenen Datenströme werden spezielle Codes genutzt. Das funktioniert so ähnlich wie bei Fledermäusen, die jeweils ihre eigene Melodie aussenden und sich an ihrem eigenen Echo orientieren. Der GSM-Standard basiert aber auf TDMA. Bei diesem Multiplexverfahren werden die Daten in bestimmten Zeitabschnitten übertragen. Bei der Entwicklung von

Ja, da kann man sicher die Lizenzvergabe in Deutschland für das D2-Netz nennen. Die Lizenz ging an ein Konsortium unter Führung von Mannesmann, an dem auch der US-Konzern Pacific Telesis beteiligt war, der bereits große Erfahrungen im Mobilfunk gesammelt hatte. Dieses Konsortium hat sich bei der Funknetzplanung an der Bevölkerungsdichte und der Einkommensverteilung orientiert. Dadurch wurden die Standorte so verteilt, dass man möglichst schnell Kunden gewinnen konnte. Das führte dazu, dass der Cash-Flow Break Even bereits

auch. Und da wir ein größeres Land sind, muss es teurer werden.“ So wurden die Lizenzen für insgesamt knapp 100 Milliarden D-Mark versteigert. Und dies hat leider die deutsche Mobilfunkindustrie zerstört. Diese weiter durchgeführte „Auktionsdenke“ der deutschen Politik zerstört weiterhin in Deutschland viel Industriekraft und führt zu der schlechten Funkversorgung.

Warum war das so?

Für einen Mobilfunkanbieter oder Netzhersteller ist der Heimatmarkt extrem

Wichtig für die Entwicklung von GSM ist, dass die verschiedenen Gruppen aus den unterschiedlichen Ländern zusammengearbeitet haben. Man hat versucht, Kompromisse zu finden und konkurrierende Technologien sowie Ideen aus England, Frankreich, Deutschland oder Skandinavien zusammenzubringen – ganz im europäischen Sinn.

3G setzte man dann auf Druck von verschiedenen Unternehmen – insbesondere Qualcomm aus den USA – auf CDMA. Doch das hat sich im Nachhinein als Fehler herausgestellt. Denn zum einen braucht man mehr Bandbreite, um die verschiedenen Codes unterzubringen. Und zum anderen benötigt man im Mobilgerät eine Search Engine, die den CDMA-Code sucht und daher die ganze Zeit aktiv sein muss. Das frisst aber sehr viel Energie. So haben wir zum Beispiel die Blackberrys zu Beginn im GSM-Edge-Mode gelassen, selbst als UMTS schon verfügbar war. Denn im Edge-Mode konnte man das Gerät 24 Stunden nutzen. Bei UMTS war die Batterie schon nach weniger als acht Stunden leer.

Gab es neben der technischen Entwicklung auch regulatorische Weichenstellungen?

nach zweieinhalb Jahren erreicht wurde. Die Telekom brauchte dafür wesentlich länger. Denn sie benötigte dreimal so viele Basisstationen, um die gleiche Anzahl an Kunden zu gewinnen, weil sie als Standorte ihre eigenen Grundstücke auswählte und nicht die funktechnisch zur Abdeckung der Kunden sinnvollsten. Dieses Beispiel habe ich damals immer in meiner Mobilfunkvorlesung genutzt und gesagt: „Man muss nicht nur technisch gut sein, um erfolgreich zu sein, sondern auch das Business verstehen.“

Beim Thema Mobilfunk und Lizenz kommt einem auch die Versteigerung der UMTS-Lizenzen um die Jahrtausendwende in den Sinn.

Ja. England hatte mit der Idee einer Lizenzauktion vorgelegt. Und der deutsche Finanzminister hat sich gedacht: „Was die können, können wir

wichtig. Denn dort hat man die besten Chancen, weil man etwa dieselbe Sprache spricht, sich in der derselben Zeitzone befindet und schnell vor Ort ist, um Probleme zu lösen. Ein Mobilfunkstandard ist eine sehr komplizierte Angelegenheit. Man kann nicht einfach einen Schalter umlegen und dann funktioniert es. Sondern man muss in den ersten ein, zwei Jahren immer wieder nachbessern. Daher ist ein lokaler Kunde Gold wert, mit dem man die Fehler aus dem System holen kann. Für den Betrieb der Infrastruktur blieb den Netzbetreibern aber nur noch wenig Geld, weil die Lizenzgebühren so hoch waren. Sie mussten sich auf die Mindestanforderungen aus der Lizenzvergabe konzentrieren. Und das merken wir in Deutschland bis heute.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: Fraunhofer HHI

PROF. DR.-ING. HANS-JOACHIM GRALLERT

studierte an der RWTH Aachen Nachrichtentechnik und promovierte dort über ein Thema der Nachrichtencodierung. An der Universität Duisburg-Essen verantwortete er als Oberingenieur Forschung und Lehre im Bereich Fernseh- und Audiosignalübertragung. Bei Siemens verantwortete er als Senior Vice President of Optical Networks die weltweite Forschung und Entwicklung der Glasfasertechnik. Später leitete er das Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, in Berlin. Zudem hatte er die Professur für Nachrichtentechnik an der Technischen Universität Berlin inne.

INTERVIEW

„Es ging stets darum, die Kosten zu reduzieren“

In den 1990er-Jahren begann der Siegeszug der Glasfasertechnik als die dominierende Technik zur Datenübertragung. Professor Hans-Joachim Grallert spricht über die entscheidenden technischen Entwicklungen und erklärt, welche Rolle die Mikroelektronik sowie die Olympischen Spiele in Australien dabei gespielt haben.

Herr Grallert, wann wurde die Glasfasertechnik zu Ihrem Thema?

Ich habe mich 1986 das erste Mal mit Glasfasern beschäftigt, als ich bei Siemens tätig war. Ab diesem Zeitpunkt war ich für viele große Projekte in diesem Bereich verantwortlich und wurde letztendlich bei Siemens dann Entwicklungschef für die Glasfaserübertragungstechnik weltweit.

Was waren das für Projekte?

Wir bekamen zum Beispiel von der damaligen Bundespost den Auftrag, ein Glasfaser-Weitverkehrsnetz aufzu-

bauen, mit dem sich 565 Megabit/s übertragen lassen. Denn mit den Kupfernetzen, die bis dahin dafür verwendet wurden, war man an die technischen Grenzen gekommen.

Inwiefern?

Kupfertechnologie hat ja den Nachteil, dass sie eine hohe Dämpfung besitzt. Man muss daher immer wieder – etwa alle 1,5 Kilometer – Regeneratoren setzen, um Daten über weite Strecken zu übertragen. Und das macht die Technik natürlich teuer. Mit der Glasfasertechnik war dagegen

eine Übertragung von bis zu 18 Kilometern ohne einen Regenerator möglich. Die Anforderung der Bundespost war es, dies auf bis zu 32 Kilometer auszuweiten. Dank zahlreicher Weiterentwicklungen, mit denen wir uns unter anderem auch bei Siemens beschäftigt haben, war es dann möglich, diese Strecken zu erreichen und die Glasfasertechnik entscheidend voranzubringen.

Welche Entwicklungen waren das?

Da ist zunächst die Lasertechnologie zu nennen. Das Licht für die Daten-

übertragung gelangt ja nicht einfach in die Glasfaser, indem man den Laserstrahl darauf hält. Sondern man muss dafür entsprechende Lasermodule entwickeln und dabei einige Herausforderungen bewältigen. Dazu zählte zu Beginn zum Beispiel die Zuverlässigkeit. Die kleinen Lasermodule, in die die Glasfaser eingeführt wird,

Wir mussten dabei auch Lösungen für die Sicherheit des Netzes finden. Das war ein extrem wichtiges Thema.

Das heißt konkret?

Man muss Redundanz schaffen. Oder neudeutsch: Resilienz. Das heißt, dass man mehrere parallele Glasfasern legen muss – aber natürlich nicht im

werden. Und diese Dioden wurden im Laufe der Zeit zunehmend empfindlicher, was wichtig war, um die Daten über eine große Entfernung zu transportieren. Eine weitere Frage war, ob es möglich ist, verschiedene Farben durch eine Glasfaser zu schicken – also mehrere Signale mit unterschiedlicher Wellenlänge.

Ein großer Schritt war die Weiterentwicklung der Photodioden – also der Empfangstechnik. Denn die optischen Signale müssen am Ende der Leitung ja wieder in elektrische umgewandelt werden. Und diese Dioden wurden im Laufe der Zeit zunehmend empfindlicher, was wichtig war, um die Daten über eine große Entfernung zu transportieren.

sind aus Metall und enthalten ein Vakuum. Zu Beginn gab es das Problem, diese Module entsprechend abzudichten. Eine weitere Herausforderung bestand darin, wie man die Glasfaser direkt vor dem Laserstrahl festhält. Anfänglich hat man das geklebt. Doch der Kleber weichte im Laufe der Zeit auf.

Und mit diesen Problemen haben Sie sich beschäftigt?

Ja, etwa bei den Olympischen Spielen, die 2000 in Sydney stattfanden. Dort sollte ich mit Siemens ein Glasfasernetz aufbauen. Und dabei hatten wir es mit solchen Herausforderungen zu

gleichen Kabel. In Australien haben wir Kabel auf beiden Seiten einer Straße verlegt, die das gleiche Signal übertragen haben. Wenn auf einer Strecke ein Fehler auftrat, wurde automatisch auf die Reserveleitung umgeschaltet.

Welche wichtigen Entwicklungen sind im Zusammenhang mit der Glasfasertechnologie noch zu nennen?

Ein großer Schritt war die Weiterentwicklung der Photodioden – also der Empfangstechnik. Denn die optischen Signale müssen am Ende der Leitung ja wieder in elektrische umgewandelt

Wie wurde diese Frage beantwortet?

Indem man das sogenannte Wellenlängen-Multiplexing entwickelt hat, bei dem verschiedene Wellenlängen in eine Faser eingekoppelt werden. Zu Beginn waren das vier Farben. Damit haben wir damals in Australien gearbeitet. Die Entwicklung ging dann immer weiter. Heute ist man bei 320 Farben. Der Vorteil dieser Methode: Wenn man einmal eine Faser verlegt hat, lassen sich in dieser ohne zusätzliche Verlegearbeiten mehrere Signale übertragen. Das spart Kosten.

Was ist mit den weiteren Komponenten, die man für Glasfasernetze benötigt?

Auch bei diesen gab es Weiterentwicklungen. Das gilt etwa für so einfache Dinge wie Stecker. Denn das Ende einer Glasfaser muss ja in ein Gerät gesteckt werden. Zu Beginn haben die Mechaniker jeden einzelnen Stecker mit der Hand gedreht. Der war relativ groß und bestand aus Metall. Mittlerweile gibt es Plastikstecker, die klein und spottbillig sind. Eine weitere eher simple, aber wichtige Thematik ist das Spleißen.

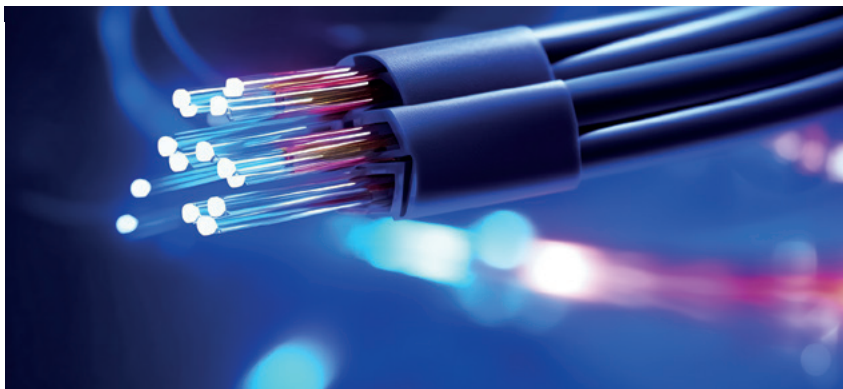


Bild: stock.adobe.com_kittimanjaro/KL_625278867



Bild: stock.adobe.com_RioPatuca Images_163336762

Was ist das?

Beim Spleißen geht es darum, zwei Glasfasern miteinander zu verbinden. Dafür wurden spezielle Geräte entwickelt, die ebenfalls immer kleiner und billiger wurden. Sie sehen also: Es ging stets darum, die Gesamtkosten für die Technologie zu reduzieren. Doch ohne die Mikroelektronik wäre das alles nicht möglich gewesen.

Was meinen Sie damit?

Sie hat dafür gesorgt, dass die Dinge immer kleiner werden konnten. Ich nenne Ihnen ein Beispiel: Ein Übertragungssystem für 565 Megabit/s bestand früher aus einem 19-Zoll-Gestell – mit Lüftung und Stromanschluss. Heute finden Sie das auf einer Leiterplatte. Und dafür ist die Mikroelektronik verantwortlich.

Jetzt haben Sie Siemens ja schon als Unternehmen erwähnt, das an der Entwicklung der Glasfasertechnologie einen wichtigen Anteil hatte. Gibt es weitere Firmen in diesem Zusammenhang zu nennen?

Ja, da kann man sicherlich Alcatel, Nokia, NEC und AT&T in den USA nennen. Damals hatten diese Unternehmen ja noch ihre eigenen Forschungslabors. Wichtig für die Glasfaser-Entwicklung war aber auch die Tagung ECOC – also die European Conference of Optical Communication. Und ebenso ihr amerikanisches Pendant – die Optical Fibre Conference.

Gab es auch politische Entscheidungen, die einen Einfluss auf die Verbreitung der Glasfasertechnik hatten?

Die Bundespost wurde ja 1995 privatisiert und in drei Unternehmen aufgeteilt. Dadurch konnten sich auch andere Firmen am Netzausbau in Deutschland beteiligen. Die Auswirkungen dieser Privatisierung lassen sich aus verschiedenen Perspektiven betrachten. Die Konkurrenz der unterschiedlichen Betreiber hat sicherlich dazu beigetragen, dass die Technologie billiger wurde. Auf der anderen Seite war die Bundespost aber dazu verpflichtet, alle Regionen anzubinden – auch die ländlichen. Die privaten Unternehmen sind dagegen gewinnorientiert. Was dazu führt, dass nur wenig Interesse besteht, auch einen abgelegenen Bauernhof in Oberbayern an das Glasfasernetz anzuschließen. Außerdem gab es mit der Bundespost einheitliche Standards. Nach der Privatisierung ist die Standardisierung dann leider erst einmal etwas ins Hintertreffen geraten.

Der Ausbau des Glasfasernetzes in Deutschland hat ja dann doch viel Zeit gebraucht.

Der Grund liegt meines Erachtens darin, dass der Bundesrepublik nach dem Zweiten Weltkrieg ein komplettes neues Kupfernetz verpasst wurde, das noch gut funktioniert. Und was gut funktioniert, wirft man nicht so schnell weg. Länder, die von vorne angefan-

gen haben, ein Kommunikationsnetz aufzubauen, haben natürlich gleich auf Glas gesetzt. Nach der Wiedervereinigung hat man in den 90er-Jahren ja auch versucht, in der ehemaligen DDR von dem alten Kupfernetz auf Glasfaser zu wechseln. Doch Fibre to the home war damals noch zu teuer und daher hat man es wieder gelassen. Womit wir wieder bei den Kosten wären, die erst durch die erwähnten Entwicklungen minimiert werden konnten.

In den 1990er-Jahren begann nicht nur der Siegeszug der Glasfaser als Übertragungstechnik. Das Internet entwickelte sich in diesem Jahrzehnt auch zum Massenmedium. Glauben Sie, dass dies ohne die Glasfasertechnik möglich gewesen wäre?

Ich denke nicht. Wenn Sie heute beispielsweise eine Reise über das Internet buchen, dann steht der entsprechende Server vielleicht in England. Und dann werden die Daten über die verschiedenen Ländergrenzen hinweg und vielleicht durch ein Unterseekabel im Ärmelkanal geschickt. Und das alles kostet den einzelnen Nutzer nur sehr wenig, weil er eine Flatrate hat. Selbst wenn große Bilddateien verschickt werden. Das ist nur möglich, weil die Glasfasern eine so große Kapazität haben und die Übertragung extrem billig geworden ist.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



**PROF. DR. SC. TECHN.
GERHARD KRAMER**

ist Professor am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik und Geschäftsführender Vizepräsident für Forschung und Innovation an der Technischen Universität München. Er studierte Elektrotechnik an der University of Manitoba, Winnipeg, Kanada. 1998 promovierte er an der ETH Zürich. Anschließend war Kramer unter anderem als Member of Technical Staff beim Math Center der Bell Laboratories und als Professor für Elektrotechnik an der University of Southern California (USC) in Los Angeles tätig. Kramer ist IEEE Fellow und Mitglied der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Bild: Andreas Heddergott/TUM

INTERVIEW

„Der Schritt von 3G zu 4G war disruptiv“

Die vierte Mobilfunkgeneration machte das Internet überall und zu jeder Zeit verfügbar. Gerhard Kramer erklärt, wieso dafür zunächst eine neue Schnittstelle benötigt wurde und welche gewaltigen Auswirkungen das iPhone auf die gesamte Entwicklung hatte.

Herr Kramer, was war das Ziel, das mit dem Übergang von 3G auf 4G verfolgt wurde?

Der Fokus von 3G und der Mobilfunkgenerationen davor war die Kommunikation über Sprache. In den 1990er-Jahren aber hatte sich das Internet zum Massenmedium entwickelt. Und so kam dann die Vision auf, beides miteinander zu kombinieren – also Internet und Mobilfunk. Das war der Hintergrund für die 4G-Entwicklung.

Wie wurde diese Vision umgesetzt?

Die Kommunikation im Internet funktioniert paketbasiert – also anders als

die übliche Übermittlung von Sprache. Die Daten werden in mehreren Paketen transportiert, die nicht immer gleichzeitig ankommen, sondern mit einer gewissen Verzögerung. Das heißt, man hat nicht die gleichen Anforderungen an die zeitliche Übermittlung wie bei der Sprache. Man kann unter Umständen etwas länger warten. Zumindest galt dies für die ersten Datenanwendungen. Die 3G-Methode, die ja eben auf Sprache ausgerichtet ist, war für die Kombination von Internet und Mobilfunk aber nicht geeignet. Daher musste eine neue Mobilfunkschnittstelle entwickelt

werden. Und diese basierte dann auf dem sogenannten Orthogonal Frequency Division Multiplexing – also OFDM.

Was wurde damit möglich?

OFDM hat den Charakter, dass das Frequenzband in viele kleine Frequenzen aufgeteilt wird. Dadurch erhält man mehr Flexibilität. Denn wenn wir uns mit einem mobilen Gerät bewegen, ändert sich der Mobilfunkkanal sehr schnell – innerhalb von Millisekunden. Und die Pakete treffen wie gesagt zu unterschiedlichen Zeiten ein. Um mit diesen stän-

2000er: OFDM – Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren

Das moderne orthogonale Frequenzmultiplexing (OFDM) kombiniert drei Konzepte: Frequenzmultiplexing (FDM), die schnelle Fourier-Transformation (FFT) und ein zyklisches Präfix. Für eine verfügbare Bandbreite B überträgt FDM Daten auf N Trägern, jeder mit einer Bandbreite von B/N . Für ein großes N führt FDM zu einfachen Empfängern, da jeder Träger keine Interferenz (ISI) aufweist. FDM ist außerdem flexibel und effizient, weil man jedem Datenstrom mehrere Träger zuweisen und die Leistung auf jedem Träger separat einstellen kann. Allerdings muss man FDM-Signale für große N berechnen, um die gesamte

verfügbare Bandbreite zu nutzen. Hier kommt die schnelle Fourier-Transformation (FFT) zum Einsatz, deren Komplexität logarithmisch mit N Operationen pro Träger skaliert. Um die Konstruktion zu vervollständigen, muss man sich mit der Eigenschaft der FFT befassen, dass sie zyklisch ist: Die FFT wandelt zyklische Faltung im Zeitbereich in Multiplikation im Frequenzbereich um. Durch Hinzufügen eines zyklischen Präfixes im Zeitbereich wird der Kanal so manipuliert, dass er eine zyklische Faltung durchführt. Somit kann man ISI mit angemessener Komplexität und Effizienz aus dem Kanal

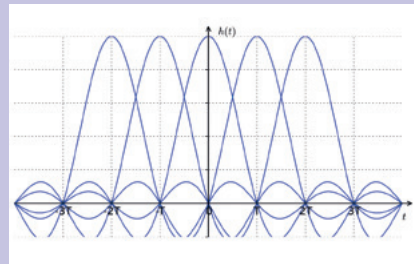


Bild: <https://commons.wikimedia.org/w/index>

entfernen. Ein kompakter Überblick über die Geschichte von OFDM findet sich in einem Artikel von Stephen Weinstein: „The history of orthogonal frequency-division multiplexing“ (IEEE Communications Magazine, November 2009, S. 26–35).

digen Änderungen umgehen zu können, braucht man eine Schnittstelle, die sehr schnell reagieren kann. Und dies ist OFDM.

OFDM war also die entscheidende Voraussetzung, um das Internet über den Mobilfunk nutzen zu können?

Das ist richtig. OFDM wurde zwar schon in den 1960er-Jahren erfunden, doch zunächst nur in Telefonmodems implementiert. Es hat noch eine Weile gedauert, bis man es auch in Mobilfunkgeräten einsetzen konnte. OFDM wurde sogar schon im Rahmen der 3G-Standardisierung als eine Möglichkeit vorgeschlagen. Doch zu der Zeit war noch nicht klar, dass man den Mobilfunk auf die Übertragung von Daten ausrichten musste. Zudem mussten zunächst die entsprechenden Chips weiterentwickelt werden, um OFDM für Mobilgeräte nutzen zu können. Also Chips, mit denen sich bei der Verarbeitung der Daten eine gewisse Geschwindigkeit erreichen lässt.

Was heißt das konkret?

Ein Mobilfunkgerät arbeitet ja mit einer Batterie. Es verfügt also über eine limitierte Energie. Daher war es wichtig, dass die Chips, die im Gerät verbaut sind, effizienter wurden und weniger Energie für die Datenverarbeitung brauchten. Erst dadurch war

es möglich, die Geräte so zu nutzen, wie es heute der Fall ist – nämlich für Internetanwendungen.

4G zeichnet sich im Vergleich zu 3G auch durch größere Bandbreiten und eine niedrigere Latenz aus. Welche Entwicklungen waren dafür notwendig?

Eine größere Bandbreite erreichte man, indem man schneller schaltete. Und durch eine solche Schaltung lassen sich auch Daten schneller übertragen und somit die Latenzen verringern. Eine weitere wichtige Entwicklung war die Multi-Antennentechnologie. Dabei werden Daten über viele Antennen statt nur über eine übertragen. Aber über eine der wichtigsten Entwicklungen für 4G haben wir noch gar nicht angesprochen.

Welche war das?

Das war das iPhone von Apple. Denn mit diesem kam auch ein neues User Interface, das man für die Nutzung des Internets auf einem Mobilgerät braucht. Damit meine ich den Touchscreen und Funktionen wie das „Swiping“, welche dafür gesorgt haben, Anwendungen einfacher zu bedienen. Das hat Steve Jobs brillant gemacht. Diese Entwicklung war extrem wichtig, weil sie die Kombination von Internet und Mobilfunk erst zur Vollendung gebracht hat. Und sie hat natürlich auch den Markt komplett verändert.

Das heißt, das iPhone hat überhaupt erst dafür gesorgt, dass man die Möglichkeiten von 4G wirklich nutzen konnte.

Es war notwendig, um das Internet über den Mobilfunk an die Massen zu bringen. Vorher gab es schon Mobilgeräte mit Tastaturen. Aber diese funktionierten nicht annähernd so gut wie das iPhone.

Als das iPhone 2007 auf den Markt kam, gab es 4G noch nicht.

Aber 4G befand sich schon im Entwicklungsprozess. Das Internet mit dem Mobilfunk zu kombinieren, war also schon mehr als nur eine Idee. Es gab schon eine konkrete Planung. Aber erst das iPhone hat diesen Ansatz dann massentauglich gemacht.

Heute ist die mobile Internetnutzung gar nicht mehr aus unserem Alltag wegzudenken. Die Grundlagen dafür wurden also in den Jahren zwischen 2000 und 2010 gelegt.

Das ist absolut richtig. Die Entwicklung des Mobilfunks hat auch die Technologien für das Internet selbst verändert. Man hat neue schlankere Anwendungen erstellt, damit man sie als Apps auf dem Smartphone nutzen kann. Und es wurde neue Software entwickelt, um Websites zu bauen, auf die man auch per Mobilgerät zugreifen kann. Die Bedeutung von Soft-



Bild: stock.adobe.com_Nattawat_523845732

ware im Vergleich zu Hardware wurde generell noch größer.

Wenn Sie sich die Entwicklungen der verschiedenen Mobilfunkgenerationen anschauen – wie ordnen Sie den Übergang von 3G zu 4G ein?

Der Schritt von 3G zu 4G war disruptiv. Zumindest was die Art und

auch den Schritt von 4G zu 5G würde ich als evolutionär bezeichnen. Das ist ja auch eine Sorge der heutigen Mobilfunkfirmen, die sich fragen, wo die Innovationen sind, wenn man von 5G auf 6G geht. Was ist wirklich neu – außer technischen Feinheiten wie geringere Latenz oder mehr Bandbreite?

Hatte die Standardisierung schon einen weltweiten Ansatz?

Die Standardisierung im Mobilfunk ist mit der Zeit zunehmend globaler geworden. GSM begann ja in Europa – genauer gesagt in den skandinavischen Ländern. Die USA hat zu der Zeit ihre eigenen Standards gemacht. Mit 3G gab es schon einen ersten

4G befand sich schon im Entwicklungsprozess. Das Internet mit dem Mobilfunk zu kombinieren, war also schon mehr als nur eine Idee. Es gab schon eine konkrete Planung. Aber erst das iPhone hat diesen Ansatz dann massentauglich gemacht.

Weise betrifft, wie sich die gesamte Branche verändert hat. Apple wurde zum größten Unternehmen der Welt und gleichzeitig sind andere Firmen untergegangen. Neben Apple haben dann noch weitere Unternehmen wie zum Beispiel Samsung die Entwicklung vorangetrieben. Außerdem hat sich der Mobilfunk über die ganze Welt ausgebreitet. Jeder wollte ein Gerät haben. Das galt auch für die Länder im globalen Süden, die bis dahin keinen Zugang zu Mobilfunk hatten.

So disruptiv waren die Sprünge bei den anderen Generationen nicht?

Im Vergleich dazu war der Übergang von der zweiten auf die dritte Mobilfunkgeneration eher evolutionär. Und

Über die Bedeutung von Apple haben wir schon gesprochen. Aber wer hat die Entwicklung des Standards 4G selbst vorangetrieben?

Die Firma Flarion, die von einem ehemaligen Direktor der Bell Labs gegründet und später von Qualcomm aufgekauft wurde, war sehr schnell damit, Technologien auf Basis von OFDM zu entwickeln. Aber generell lässt sich sagen, dass die Methoden an verschiedenen Orten – sowohl in den USA als auch in Europa – weiterentwickelt wurden. Die Geschwindigkeiten waren nur unterschiedlich. Ein Unternehmen wie Flarion war schneller und beweglicher. Standardisierungsgremien sind ja meistens etwas langsamer, was aber auch richtig so ist.

Schritt in Richtung eines weltweiten Ansatzes. Der Push zu CDMA kam von den USA und Europa hat diesen dann übernommen. Bei 4G hatte sich dann die weltweite Zusammenarbeit auf regulatorischer Ebene schon etabliert. Generell hat sich mittlerweile die Erkenntnis durchgesetzt, dass eine globale Kooperation für den Mobilfunk nützlicher ist, als wenn jeder Kontinent oder jedes Land seine eigenen Standards verfolgt. Es ist sehr wichtig, bei diesen Themen zusammenzuarbeiten.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: Andreas Heddergott/TUM

**PROF. DR.-ING.
WOLFGANG KELLERER**

studierte Elektrotechnik und Informationstechnik an der TU München, wo er 2002 auch promovierte. Nach einem Forschungsaufenthalt an der Stanford University war er bei NTT DOCOMOs europäischem Forschungsinstitut DOCOMO Euro-Labs unter anderem Leiter der Forschungsabteilung für Übertragungstechnik und Mobile Netze. Seit 2012 leitet er den Lehrstuhl für Kommunikationsnetze an der TU München. 2015 wurde er mit einem ERC Consolidator Grant für seine Forschung zu Flexibilität in Software-basierten Netzen ausgezeichnet. Derzeit koordiniert er Forschungsprojekte zur zukünftigen Mobilfunkgeneration 6G, wie das 6G Zukunftslabor Bayern und 6G-life. Er ist Mitglied des Wissenschaftlichen Arbeitskreises für Regulierungsfragen (WAR) der Bundesnetzagentur und im Board of Directors des Center for Digital Technology and Management (CDTM).

INTERVIEW

„Aus der Cloud ist die Virtualisierung in die Netze gewandert“

Ab 2010 wurde das Cloud Computing zum allgemein verbreiteten Konzept, um IT zu nutzen. Wolfgang Kellerer erklärt, warum die Virtualisierung dafür die Basis war und diese Technologie dann auch im Internet und Mobilfunk Entwicklungen voranbrachte.

Herr Kellerer, wann haben Sie begonnen, sich mit der Virtualisierung von Netzen zu beschäftigen?

Ich kann mich noch gut erinnern: Als ich 2012 auf den Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU München berufen wurde, haben mich Leute, die nicht so tief im Thema waren, gefragt: „Du sollst jetzt zum Internet der Zukunft und zum mobilen Internet forschen. Aber was willst du denn da noch machen? Das funktioniert doch alles?“ Denn zu der Zeit war ja das Internet schon fest etabliert. Und das Netz war relativ einfach gehalten, was eine Flut von Anwendungen ermög-

lichte, die sehr schnell umgesetzt werden konnten.

Dabei ist es aber nicht geblieben.

Nein, sondern zu dieser Zeit ging es los, dass man die Virtualisierung, die es ja schon vorher auf lokaler Ebene gab, auf die Netze übertragen hat. Das war ein großer Innovationssprung.

Das grundsätzliche Prinzip bei der Virtualisierung ist die Trennung von Software und Hardware, was eine größere Flexibilität ermöglicht.

Richtig. Dank Virtualisierung kann man auf einem beliebigen Betriebs-

system ein anderes Betriebssystem laufen lassen und damit dann auch beliebige Anwendungen betreiben. So lassen sich mit Standard-Computing-Hardware große Datenzentren aufbauen, die sich auch hochskalieren lassen. Mithilfe dieser Technik haben Unternehmen wie zum Beispiel Amazon riesige Datenzentren aufgebaut, die zunächst für eigene Zwecke gedacht waren. Doch dann entstand die Idee, diese auch zu vermieten. Hinzu kam, dass die großen Bandbreiten verfügbar waren, um die Daten aus diesen Datenzentren im großen Stil abzurufen. So kam es dazu, dass nun



Bild: stock.adobe.com_raz_studio_290694498

jeder dieses Cloud Computing nutzen konnte und die großen Cloud-Plattformen, wie Amazon Web Services oder Microsoft Azure, entstanden. Und aus der Cloud ist die Virtualisierung in die Netze gewandert.

Was war der Gedanke dahinter?

Die ursprüngliche Idee dazu entstand schon vor 2010 und stammte von dem Stanford-Proffessor Nick McKeown. Er hat darüber nachgedacht, dass die Virtualisierung aus den Enterprise-

wickelt, sodass mit diesem Network-Slicing verschiedene virtuelle Netze für unterschiedliche Zwecke aufgebaut wurden. Ein virtuelles Netz bietet zum Beispiel eine besonders hohe Qualität, in einem anderen lassen sich besonders niedrige Latenzen umsetzen. Letztendlich lassen sich dann auch Netzfunktionen über diese Netze verschieben.

Welche Möglichkeiten eröffneten sich dadurch?

Service vorgesehen sind. Für bestimmte Anwendungen Qualität bereitzustellen, ist quasi erst mit der Virtualisierungstechnik möglich, weil man Prozesse voneinander trennen kann. Um dies flexibel tun zu können, braucht man dann eine zentrale Steuerung. Und das war Software Defined Networking. Zu meiner Anfangszeit im Lehrstuhl waren dann auch die ersten SDN-Switches verfügbar, mit denen man ein Netz programmieren konnte.

In 5G ist das SDN-Konzept komplett umgesetzt.
Funktionen, die vorher in der Hardware waren, lassen sich beliebig in eine Cloud ziehen.

Netzen auch in den Weitverkehrsnetzen nützlich sein könnte. Dabei ging es zunächst um experimentelle Ansätze. Denn man kann im Internet ja nicht experimentieren, weil man dann unter Umständen das gesamte Netz kompromittiert. Doch wenn man eine zusätzliche Schicht – also ein virtuelles Netz – darüber legt, dann lassen sich dort Dinge tun, die das Internet an sich nicht beeinträchtigen. Und diese Idee wurde dann weiterent-

In der Verbindung mit dem Mobilfunk wurde diese Technologie für die Industrie sehr interessant, weil sich damit hochvernetzte Anwendungen realisieren ließen. Dies wiederum führte dazu, dass Software Defined Networking – als SDN – entwickelt wurde. Denn wenn man das Internet für solche Zwecke nutzt, reicht der ursprüngliche Best-Effort-Ansatz nicht mehr aus, in dem beispielsweise keine Priorisierung und keine Quality of

Sie haben von vernetzten Anwendungen gesprochen. Welche waren das zum Beispiel?

Ich war beispielsweise an einem EU-Projekt beteiligt, in dem wir uns mit einem Use Case beschäftigt haben, bei dem es darum ging, Netzvirtualisierung und Software Defined Networking für den Betrieb von Windkraftanlagen zu nutzen. Solche Anlagen werden ja unter anderem offshore betrieben – also draußen auf

2010er: Software Defined Networking

Mit Software Defined Networking (SDN) wird ein Konzept für die Datenvermittlung im Internet bezeichnet, bei dem die Weiterleitungsfunktionen von einem zentralen Steuerknoten aus über eine standardisierte Schnittstelle programmiert werden können. Dieses Prinzip der Trennung von Weiterleitungshardware und Steuerungssoftware hat die sogenannte Softwarisierung der Kommunikationsnetze ausgelöst. Damit ermöglicht SDN eine deutlich höhere Flexibilität in der Steuerung von Netzen und eine schnelle Anpassung an sich ändernde Ver-

kehrsaufkommen und neue Anwendungen. Zur Softwarisierung der Netze gehören weitere Konzepte wie die Netzvirtualisierung, bei der virtuelle Netze auf derselben Hardware eingerichtet werden können, und die Network Function Virtualization (NFV), die es erlaubt virtualisierte Netzfunktionen im Netz und in Cloud-Datenzentren zu verteilen. Eine Umsetzung dieser Konzepte findet sich vor allem in großen Datenzentrumsnetzen und auch in modernen Netzarchitekturen, wie zum Beispiel in der 5. Generation Mobilkommunikation 5G.

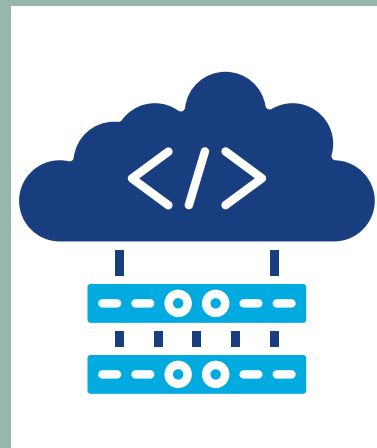


Bild: stock.adobe.com_SAMDesigning_635535021

dem Meer. Das heißt, man kann nicht immer vor Ort sein. Und wenn, dann wird es sehr teuer. Daher haben wir daran gearbeitet, mithilfe von Cloud Computing aus der Ferne auf die Anlagen zuzugreifen, um diese zu warten und zu steuern – was wir auch geschafft haben. Wir haben eine entsprechende Lösung entwickelt, die sehr viel Beachtung gefunden hat.

Wer hat zuerst virtualisierte Netze verwendet?

Das waren die Betreiber von großen Datenzentren wie etwa Facebook. Denn diese Unternehmen hatten ihre eigenen Netze, in denen sie die Switches austauschen und entsprechend programmieren konnten. Im großen weiten Internet, in dem viele verschiedenen Netzdomänen zusammenlaufen, ist dies natürlich nicht ganz so einfach möglich. Man kann dann nur in seiner eigenen Domäne die Vorteile der Virtualisierung nutzen.

Gab es grundsätzliche Herausforderungen, die beim Thema Netzvirtualisierung überwunden werden mussten?

Das war und ist noch immer die Standardisierung. Denn man kann nicht einfach sagen: „Ich trenne jetzt die Weiterleitungs-Hardware von der Steuerungssoftware und zentralisiere das Ganze.“ Denn wenn keine Standards festgelegt sind, gibt es keine einheitliche Kommunikation. Eine wichtige Rolle spielt dabei das stan-

dardisierte Kommunikationsprotokoll OpenFlow, mit dem man auf die Hardware-Komponenten zugreifen kann. Das hat sich zu Beginn recht gut entwickelt. Die Versionen 1.1, 1.2 und 1.3 waren ziemlich schnell verfügbar. Doch mit der Standardisierung verlief die Entwicklung immer langsamer. In den Enterprise-Netzen, wo Qualität besonders relevant ist, hat sich das Protokoll etabliert. Aber in den Weitverkehrsnetzen gibt es immer noch Switches, die OpenFlow nicht unterstützen.

Das heißt also, die Entwicklung der Netzvirtualisierung verlief nicht geradlinig?

Es ist wie bei allen Technologien. Zuerst kommt der Hype. Dem folgt die Ernüchterung. Und dann etabliert sich die Technologie in bestimmten Anwendungen und wird zu einem Bestandteil, der selbstverständlich ist. Ein Beispiel dafür ist der Mobilfunk. In 5G ist das SDN-Konzept komplett umgesetzt. Funktionen, die vorher in der Hardware waren, lassen sich beliebig in eine Cloud ziehen. Im Mobilfunk lässt sich Virtualisierung einfacher umsetzen, weil die entsprechenden Netze einem einzigen Betreiber gehören – wie zum Beispiel der Deutschen Telekom. Es gibt keine Domänenübergänge, die das Ganze behindern könnten. Und der Betreiber kann virtualisierte Teile seines Netzes Unternehmen anbieten, die damit etwa ihre Standorte vernetzen können. Wenn

ein gewisses Business damit verbunden ist, lassen sich solche Innovationen sehr schnell umsetzen.

Kann man sagen, dass die Virtualisierung mitverantwortlich für die Entwicklungen ist, die heute eine große Bedeutung in unserem Alltag haben – also die Digitalisierung, das Internet der Dinge (IoT) und so weiter?

Es gibt im Englischen das Kunstwort Softwarization. Das trifft es ganz gut. Es bedeutet, dass sich immer mehr in die Software verlagert und man keine Hardware mehr benötigt. Und dies begann in dem Jahrzehnt zwischen 2010 und 2020, weil man kein eigenes Datenzentrum mehr brauchte, um Berechnungen auszuführen. Man mietet die Rechenleistung einfach hinzu. Und wenn ganz viel in die Cloud ausgelagert wird, benötigt man starke Netze, die eine entsprechende Qualität bereitstellen. Man darf ja nicht vergessen, was für gigantische Netze solche Datenzentren darstellen. Cloud Computing, Virtualisierung und Software Defined Networks sind somit Grundlage für viele Innovationen. Das betrifft etwa Themen wie IoT, Big Data und auch digitale Zwillinge, mit denen wir uns aktuell sehr stark beschäftigen. Auch für diese braucht man große Datenzentren.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: Privat

PROF. DR. GITTA KUTYNIOK

studierte Mathematik und Informatik an der Universität Paderborn, wo sie im Jahr 2000 auch promovierte. Unter anderem forschte sie anschließend als Heisenberg-Stipendiatin der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) an der Princeton University, Stanford University und Yale University. Von 2008 bis 2011 war sie Professorin für Angewandte Analysis an der Universität Osnabrück, bevor sie 2011 den Ruf an die Technische Universität Berlin annahm. wo sie als Einstein-Professorin für Mathematik tätig war und den Lehrstuhl für Angewandte Funktionalanalysis innehatte. Zurzeit ist sie Professorin für KI an der LMU München und leitet dort den Lehrstuhl „Mathematische Grundlagen der Künstlichen Intelligenz“. Kutyniok ist IEEE Fellow und unter anderem LMU-Direktorin der Konrad Zuse School of Excellence in Reliable AI, Sprecherin des AI-HUB@LMU sowie Koordinatorin des DFG-SPP „Theoretical Foundation of Deep Learning“.

INTERVIEW

„Wir stehen am Beginn einer neuen industriellen Revolution“

Nur wenige Themen treiben die Menschen zurzeit so um, wie künstliche Intelligenz (KI). Professorin Gitta Kutyniok erklärt, warum die Anfänge der Technologie schon länger zurückliegen, wie es zu dem aktuellen Hype kam und welche Herausforderungen in der Zukunft noch bewältigt werden müssen.

Frau Kutyniok, künstliche Intelligenz ist derzeit in aller Munde. Dabei ist KI nicht neu.

Das ist richtig. Schon 1943 haben sich Warren McCulloch und Walter Pitts mit künstlicher Intelligenz beschäftigt. Die beiden haben versucht, das menschliche Gehirn zu modellieren. Und daraus sind dann die künstlichen neuronalen Netze entstanden. Doch man hatte damals zwei fundamentale Probleme. Zum einen gab es noch nicht so große Datenmengen, auf denen man die neuronalen Netze trainieren konnte. Man benötigt ja Millionen von Bildern, wenn man zum Beispiel Bildklassifikation machen

möchte. Und zum anderen war noch nicht die Rechenleistung verfügbar, die notwendig ist, um tiefe neuronale Netze zu trainieren.

Wie kam es dann zu dem Hype um KI, den wir aktuell erleben?

Der entstand im Wesentlichen, weil beide Probleme gelöst werden konnten. Durch die Verwendung von GPUs – also Graphical Processing Units – verfügt man mittlerweile über die notwendige Rechenpower. Die GPUs sind besonders effektiv und mit ihnen lassen sich tiefe neuronale Netze trainieren. Hinzu kommen die riesigen Rechenzentren, in denen die Grafikprozessoren

zum Einsatz kommen. Durch das Internet sind außerdem auch die extrem großen Datenmengen vorhanden. Large Language Models wie ChatGPT werden auf dem gesamten Internet trainiert. Und wenn man heute eine Anwendung in der Bildverarbeitung umsetzen möchte, kann man dafür Millionen von entsprechenden Bildern herunterladen. Auch die modernen Teleskope in der Astrophysik generieren Big Data, das sich nutzen lässt. Diese Entwicklungen haben dafür gesorgt, dass es vor ungefähr zehn Jahren zu einer Deep-Learning-Welle kam, die den Durchbruch für die künstliche Intelligenz bedeutet hat.

Tiefe neuronale Netze

(Künstliche) Neuronale Netze wurden 1943 von McCulloch und Pitts als vereinfachtes mathematisches Modell der neuronalen Strukturen im menschlichen Gehirn mit dem Ziel einer algorithmischen Abbildung des Lernprozesses entwickelt. Sie bestehen aus in Schichten angeordneten künstlichen Neuronen: einer Eingabeschicht, einer oder mehreren verborgenen Schichten und einer Ausgabeschicht. Jede Schicht setzt sich aus gewichteten Verbindungen, Aktivierungsfunktionen und Schwellenwerten zusammen. Man spricht von tiefen neuronalen Netzen, wenn diese mehrere verborgene Schichten beinhalten. Neuronale Netze lernen durch den Trainingsprozess, bei dem sie große Mengen an Daten durchlaufen,

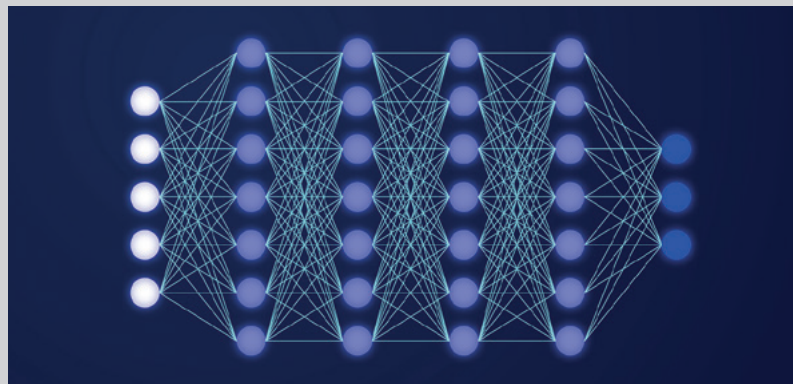


Bild: stock.adobe.com_willow flute_592665508

Muster erkennen und die Gewichte wie auch Schwellenwerte so anpassen, dass sie die gewünschten Ausgaben liefern. Die Vielzahl der Schichten ermöglicht das Lernen von komplexen

Zusammenhängen. Tiefe neuronale Netze sind derzeit die Grundlage fast aller Anwendungen von künstlicher Intelligenz.

Die Basis von allem sind also neuronale Netze?

Genau. Künstliche neuronale Netze sind quasi das Workhorse der KI. Sie werden auch beim Reinforcement Learning verwendet, das vor allem in der Robotik eingesetzt wird. Dabei

von enormen Datenmengen aus dem Internet trainiert. Generative KI sorgt nun dafür, dass noch mehr Big Data entsteht. Denn Systeme wie Chat GPT generieren ja wieder neue geschriebene oder gesprochene Texte, Bilder und Musik.

Diese sind besonders wichtig, wenn es um die konkrete Nutzung von KI geht. Die großen Forschungszentren von Firmen wie Google oder Meta sind essenziell, um entsprechende Anwendungen voranzubringen. Als Beispiel ist Alphafold zu nennen – ein

Eine der großen Herausforderungen zurzeit ist natürlich das Thema Energie. Denn KI benötigt sehr viel Rechenpower und damit auch viel Energie.

geht es um lebenslanges Lernen, das durch Belohnungen ständig weiter entwickelt wird.

Gilt das auch für die Large-Language-Modelle, die ja durch den Erfolg von ChatGPT zur Zeit besonders im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung stehen?

Bei Large-Language-Modellen sprechen wir ja von generativer KI. Für diese wurden die neuronalen Netze weiterentwickelt, indem zusätzliche Schichten hinzugefügt wurden – sogenannte Attention Layers. Die neuronalen Netzen wurden dann mithilfe

Zurück zu der Deep-Learning-Welle, die Sie angesprochen haben – kann man Personen nennen, die dabei die treibenden Kräfte waren?

Da sind sicherlich Yann LeCun, Geoffrey Hinton und Yoshua Bengio hervorzuheben. Die drei Herren haben die Forschung zu neuronalen Netzen und Deep Learning entscheidend vorangetrieben und wurden dafür 2018 mit dem Turing Award ausgezeichnet.

Welche Rolle spielen die großen IT-Unternehmen?

System auf Basis von Deep Learning, das Vorhersagen über Proteinstrukturen ermöglicht. Es wurde von DeepMind entwickelt, einer Tochtergesellschaft von Googles Mutterkonzern Alphabet.

Welche Möglichkeiten haben sich denn durch Deep Learning eröffnet? Was ist jetzt möglich, wozu man vorher nicht in der Lage war?

Mithilfe von künstlicher Intelligenz, die auf großen Datenmengen trainiert wird, lassen sich sehr gut und sehr detailliert innere Strukturen in Big Data erkennen und die Erkenntnisse dann

auch anwenden. Ich nenne Ihnen ein Beispiel aus der Bildverarbeitung. Mit KI lassen sich Teile von Bildern rekonstruieren – etwa bei einem Bild von einem Gesicht, aus dem ein Auge herausgeschnitten wurde. Früher konnte man in solchen Fällen nur versuchen, den fehlenden Teil auf Basis der Daten um dieses Auge herum zu rekonstruieren. Doch das Bild hätte dann immer noch nur ein Auge und der Bereich des fehlenden Auges wäre mit Haut gefüllt. Dank Deep Learning kann die KI nun aber lernen, dass

gie. Denn KI benötigt sehr viel Rechenpower und damit auch viel Energie. Oracle beispielsweise plant gerade in den USA ein neues GPU-Megazentrum. Und Teil dieser Pläne sind auch drei Kernkraftwerke, die parallel mit aufgebaut werden sollen, um den nötigen Strom zu liefern. Das Problem des enormen Energieverbrauchs von KI ist sicherlich ein großer Nachteil, das gelöst werden muss.

Gibt es weitere Herausforderungen?
Eine andere fundamentale Herausfor-

träglich und ethisch korrekt umzusetzen. Mit dem AI Act der EU versucht man dies ja auch zu regulieren.

Das ist ein gutes Stichwort. Brauchen wir denn eine Regulierung der KI? Und wenn ja, gehen die aktuellen Ansätze in die richtige Richtung?

In Deutschland gibt es zwei Ansätze. Zum einen die Datenschutzgrundverordnung, die auch eine gewisse Regulierung darstellt. Diese geht aus meiner Sicht zu weit. Es ist sicher richtig



Bild: stock.adobe.com_typepng/KI_1044173409

Statt sich nur mit den Risiken zu beschäftigen, sollte man sich lieber fragen: Wie kann man künstliche Intelligenz und die Digitalisierung in Deutschland generell voranbringen?

Menschen zwei Augen haben. Ein entsprechendes System würde dann tatsächlich ein zweites Auge einfügen.

Wenn wir uns jetzt einmal anschauen, wie es mit KI weitergeht: Welche Herausforderungen müssen dabei vor allem noch gelöst werden?

Eine der großen Herausforderungen zurzeit ist natürlich das Thema Ener-

derung ist die fehlende Robustheit beziehungsweise Zuverlässigkeit. Die zeigt sich etwa bei selbstfahrenden Autos. Die KI in diesem Bereich arbeitet noch nicht so zuverlässig, wie man es sich wünscht – obwohl unter anderem Elon Musk sicherlich schon hunderte von Millionen Dollar in die Entwicklung gesteckt hat. Insbesondere im europäischen Bereich gibt es außerdem die Anforderung, KI auch sozialver-

und wichtig, Daten zu schützen. Aber die Verordnung behindert die Unternehmen sehr. Gerade mittelständische Firmen können es sich nicht leisten, sich zunächst durch die Gesetze zu kämpfen, bevor sie KI-Anwendungen nutzen. Der EU AI Act dagegen geht in die richtige Richtung. Regulierung ist ja auch grundsätzlich gut. Man muss nur aufpassen, dass es nicht zum Selbstzweck wird. Beim Thema

KI sehe ich das Problem, dass vor allem über die Risiken in der Öffentlichkeit diskutiert wird und zu wenig über die Chancen.

Neue Technologien haben es schwer in Deutschland.

Wir sind kein sehr technologieaffines Land. Es gibt ja den Begriff German

stehen gerade am Beginn einer neuen industriellen Revolution, die durch KI ausgelöst wird.

Was meinen Sie damit?

Künstliche Intelligenz wird unsere Gesellschaft radikal ändern. Das ist jetzt schon zu sehen – zum Beispiel in den Wissenschaften. Es gibt keine

enorme Chance, dass Menschen von sehr langweiligen Tätigkeiten befreit werden und sich interessanteren Aufgaben zuwenden können. Komplizierte Entscheidungen können durch KI vorbereitet werden. Schließlich wird unser Leben immer komplexer. Und das sind nur einige der vielen Möglichkeiten, die KI bietet. Daher sehe



Bild: stock.adobe.com_ Lorraine/KI_990713034

Künstliche Intelligenz wird unsere Gesellschaft radikal ändern. Das ist jetzt schon zu sehen – zum Beispiel in den Wissenschaften.

Angst. Und diese Mentalität zeigt sich auch beim Einsatz von KI. Es herrscht hierzulande eine große Skepsis. Statt sich nur mit den Risiken zu beschäftigen, sollte man sich lieber fragen: Wie kann man künstliche Intelligenz und die Digitalisierung in Deutschland generell voranbringen? Und welche Möglichkeiten bietet KI? Denn wir

Wissenschaft mehr, in der KI nicht verwendet wird. Selbst in den Geisteswissenschaften. Sogar in den Verwaltungen wird schon überlegt, wie man KI nutzen kann, beispielsweise bei der Personalauswahl. KI ist nicht mehr aufzuhalten und man muss ihren Einsatz in eine richtige Richtung lenken. Denn sie bietet unter anderem die

ich künstliche Intelligenz als etwas Positives.

MARKUS STREHLITZ

Journalist, Textbüro Strehlitz



Bild: stock.adobe.com_Manuel_81766064

THE FUTURE IS ON („ZUKUNFT VORAUS“)

Information Technology Vision 2035

Now is the time to explore and discuss how Information Technology can help achieve and drive societal, economic, and environmental sustainability – and in line with the motto of “the future is on” for our ITG 70 Years Anniversary. Today the world stands at a critical juncture. The risks from global fragmentation, economic and social imbalances and increasing environmental degradation are real. Information Technology Vision 2035 is anchored in the purpose of helping the world to collaborate. We need broad societal awareness of Information Technology options to address the opportunities of the future. Information Technology will have great enabling impact for society and across all sectors of the economy, it has become one of the fundamental pillars of our daily life and a key driver of economic growth. A favorable industry and global standardization environment will be a key prerequisite to make it happen.

Drive towards trustworthy sustainability and key trends in Information Technology

There are numerous opportunities for Information Technology to help address key challenges of the 2030s in dimensions of economic, environmental, and societal sustainability. Key technological trends will shape the evolution of Information Technology and will enable value drivers of the 2030s such as “green by design”, security, resilience, and trust as well as social participation and digital inclusion (i.e., equitable access to digital services). Fig. 1 shows an integrated view of the drive towards trust-

worthy sustainability and technology trends in the years to come. The macro-trends associated with the drive towards trustworthy sustainability include increasing geo-political instability, ageing society and lack of digital inclusion as well as the objectives of economic growth and environmental sustainability. Information Technology pull effects are generated from these macro-trends and their associated challenges and opportunities. At the same time we can expect continued push from Information Technology research and innovation in key domains including Artificial Intelligence and Machine Learning (AI/ML) and data processing, novel software technologies, system and

network, transport and access, micro-electronics as well as security technology.

Technology Base and Taxonomy for the Technology Vision 2035

Building a Technology Vision requires an understanding of the relevance and impact of Technology Enablers, Systems, and Services & Applications as well as the associated Ecosystem Value. Leveraging research and continuous innovation, established technologies regularly get substituted by new, improved technologies. Fig. 2 shows a taxonomy for Information Technology Vision 2035: the vertical

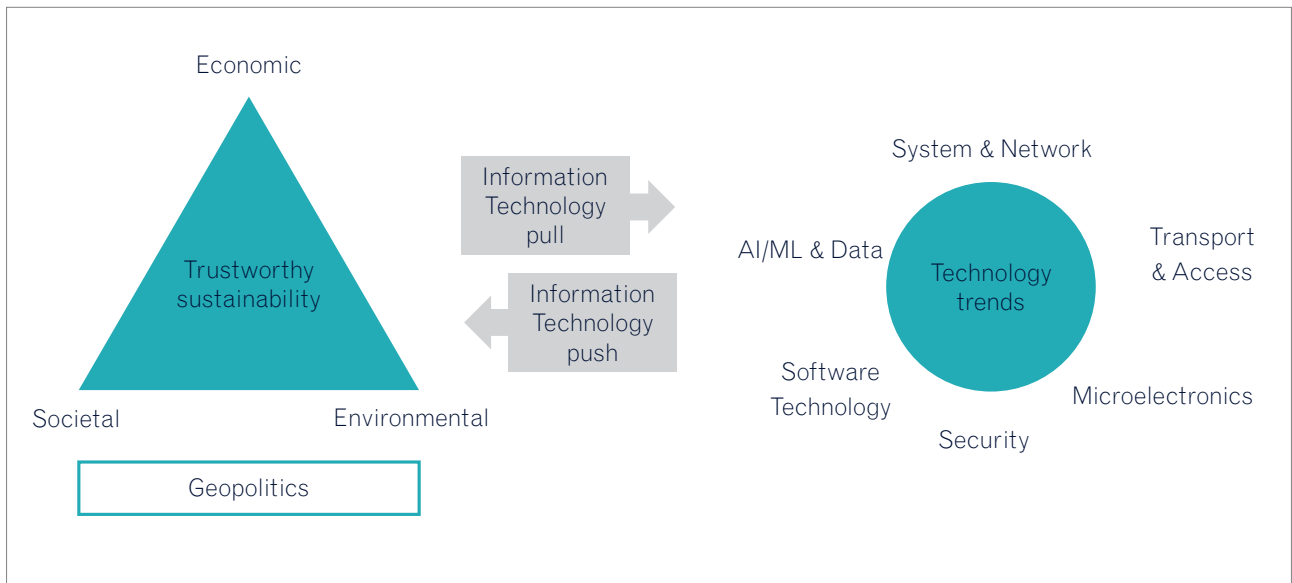


Figure 1: The three dimensions of sustainability in the geopolitical context and the top six technology trend domains are connected by pull and push effects of Information Technology

stack of Foundational Technology Enablers, Systems, and Services & Applications is mapped against Eco-system Value as shown on the horizontal axis, whereby positive value impact increases from left to right. Note that the key value impact that we indicatively associate with the respective building blocks across the three layers of the stack includes not only the overall size and dynamic of the respective markets, but also dimensions of societal value such as trustworthiness and environmental sustainability. Security, Sustainability and Cognition are meant to be aggregates of the associated Information Technology building blocks.

Processes and desired outcomes in terms of, e.g., sustainability, security or cognition do not change, unlike the technologies used to realize them. For example, the process of “transmission of information” has been realized by different technologies during the past decades, such as the different generations of cellular radio and fiber technologies. At the same time, disruptive innovation is driven by novel combination of technology enablers and building blocks such as, e.g., the use cases we broadly associate with metaverse and digital twinning (DT) are enabled by holistic orchestration and exposure, QoS/QoE, analytics and data, AI/ML, sensor and actuation technology, security, and privacy as well as computation

performance across the device-cloud-network continuum.

Trends in hardware-centric Foundational Technology Enablers

The continuous improvements in microelectronics will shape future Information Technology hardware and its applications. Until 2035, performance, energy efficiency, feature size, and densification are expected to reach new levels. For example, Gate-All-Around (GAA) and Complementary FETs architectures are expected to enable feature sizes below 1 nm. These trends impact the future hardware in four major areas of Information Technology – data transmission, data processing, data storage, and data input/output (I/O) devices. Moreover, the four areas will be shaped by technology evolution in three major fields – evolving digital computing and quantum as well as neuromorphic computing. As a common enabler to all three computing paradigms, AI will play an important role in automating, accelerating, and optimizing data processing procedures.

- **Data transmission:** Broadband wireless communication systems will provide evolved data transmission over the air, addressing communication requirements in mobile scenarios. By 2035, the 6th generation of mobile networks (“6G”) will be deployed at a large scale. While 6G radio is expected to be an evolution of

“5G New Radio (NR)”, it will also exhibit several new innovative features such as Joint Communication and Sensing. High-capacity fiber-optic networks will provide the means to cope with the ever-increasing data volume in Tier 1 (Internet exchange or transit ISP’s backbone network), Tier 2 (intra-ISP network or enterprise WAN), and Tier 3 (Mobile or Fixed Broadband Packet Core) networks. By 2035, we will see the transition from the Quantum Key Distribution (QKD) systems that are commercially available today to the Quantum Communication Infrastructures (QCI) with trusted nodes that are currently tested in field trials; and eventually the future Quantum Internet.

- **Data processing:** Next-generation computing will leverage three major technologies – well-established, yet continuously evolving digital computing on the one hand, and the two more disruptive technologies of quantum computing and neuromorphic computing on the other.
- **Data memory and storage:** On a global scale, new mass storage (secondary memory) technologies need to reliably store zettabytes of data, while primary memory hardware must allow for quick and efficient retrieval by the processor. For both areas, semiconductor-based hard-

ware is expected to be the dominant technology.

- **Data Input and Output devices:** We expect the emergence of novel, more disruptive I/O technologies. These technologies will revolutionize consumer applications by enabling new device categories. Examples include ergonomic and affordable eXtended Reality (XR) devices or devices that will increasingly support seamless multi-modality, e.g., video/voice communication augmented with real-time haptic feedback. Holography will allow for live 3D reproductions of persons and objects in remote locations. In audio technology domain, silicon microphones and silicon earphones comprise recent trends with long-term commercialization potential.

Trends in software-centric Foundational Technology Enablers

Future innovation in Information Technology software can be expected in two areas – Application Software and System Software. The use of AI based programming will have strong

impact and change the role of humans in software development. Low code/no code (LCNC) software development platforms will transform software engineering by relying on model-guided design and introduce visual approaches to programming, e.g., drag & drop tools. This will also facilitate the evolution from DevOps to DevSecOps, i.e., the usage of processes and toolchains that systematically integrate software development (Dev) and IT Operations (Ops) with state-of-the-art security procedures (Sec). The continuous evolution of device-centric Operating Systems (OSs) will be complemented by a shift towards distributed computing, which will require a new kind of “networked cloud OS”. Using microservice-based implementation, application workloads are increasingly deployed across private, on-premise as well public-domain cloud platforms. Novel cross-platform, umbrella OSs control the underlying scheduling and execution processes for computing and networking tasks.

Integration to Information Technology Systems

We can expect the relevance of system-level Information Technology solutions to address societal and economic requirements to increase further. Four dominating characteristics of Information Technology systems for the 2035 time horizon can be observed: (1) optimization of the integration level of software and hardware, (2) hyperconnected Information Technology infrastructures, where a device-edge-cloud continuum will feature the integration of computing, networking, and sensing technologies, (3) the embedding of AI/ML to build AI-native Information Technology systems, and (4) the need for compliance with demanding security and sustainability requirements. The intricate interplay between hardware and software, the nature of new applications that are physically exposed to their users and therefore potential attackers, the globalization of the supply-chains, and the advent of nanoelectronics technologies lead to new types of security threats. These include

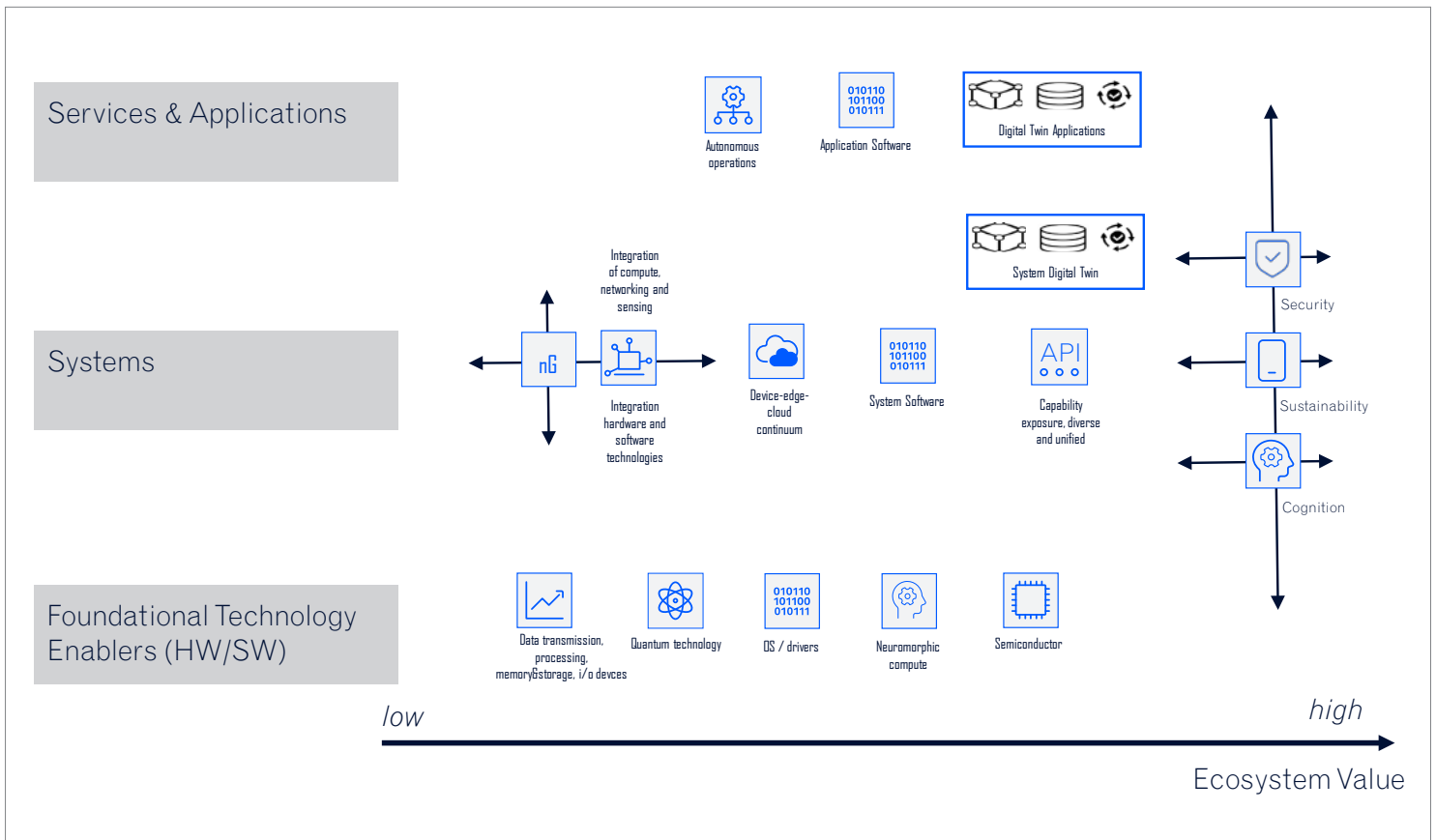


Figure 2: Taxonomy of Foundational Technology Enablers, Systems, and Services & Applications and Ecosystem Value

leakage of information such as cryptographic keys but also artificial intelligence models through side-channels; malicious manipulations of systems during operations; or “hardware Trojan” functionality introduced by untrustworthy manufacturers, tool vendors or intellectual property providers.

Services and Applications

Leveraging the foundational technology enablers as well as the system level capabilities, Information Technology infrastructure will become a platform that can offer universal Services and Applications to virtually all sectors of economy as well as public and private life. Beyond versatile computing and communication services, this comprises value-add capabilities facilitating, among others, privacy-preserving data management services, secure transaction management services, trustworthy identity management services, authentication and authorization services, environmental monitoring and control services, and simple, inclusive access to public services and information.

Use cases

Future Information Technology capabilities will play a major enabling role in the evolution and growth of various sectors of the economy such as Energy, Manufacturing, Automotive and Healthcare.

Energy

The energy sector will leverage Information Technology to manage the “green transition”, i. e., shift to renewables. The transition will include much needed decentralized scalable energy-management and optimization software platforms for a future-proof energy information and control network with distributed intelligence. Additionally, solutions must be developed addressing fast-charging infrastructure for Battery Electric Vehicles and considering widely deployed heat pumps as well as widespread energy storage. Information Technology building blocks will include distributed energy management systems for orchestration, dynamic matching of demand and production, production forecast, load flexibility

and energy-storage control in a market-oriented and grid-supportive manner due to the increasingly decentralized nature of energy generation requiring constant optimization, thus satisfying also the needs of the emerging Renewable Energy Communities. We will need reliable communication links to numerous endpoints in the distribution grids for scaling up decentralized power generation, vehicle electrification through fast-charging infrastructure, the widespread use of heat pumps, and supporting the need for always connected increasingly efficient and sustainable energy-storage solutions. The establishment of cross-sectional energy management will address the needs and exploit opportunities of electricity, heat, and gas networks to increase the overall flexibility potential and to provide seasonal storage facilities. Hardening the Information Technology of the grid to achieve the needed resilience will be critical to protect against the risk of technical outage and cyber-attacks.

Manufacturing

With Information Technology enablers and the critical AI native communications and cloud network foundation for the future as outlined above, we can increase productivity, agility, and flexibility, and improve supply chain resilience and visibility throughout manufacturing operations and processes. With intelligent automation, data center optimization and physical-digital fusion in operations, new efficiencies can be achieved while not compromising on sustainability targets.

Manufacturing in the 2030s will include the following information technology building blocks:

- reliable and secure connectivity of robots, sensors, tracking systems, smart tools and Automated Guided Vehicle (AGV);
- video analytics, automated vehicle navigation and immediate robot response enabled by high-performance and ultra-low latency distributed cloud and both fiber as well as wireless connectivity;
- digital twinning and augmented reality, on-floor video, and security systems in conjunction with increased network capacity and pervasive AI;

- efficiency and productivity boost from using insights about assets, processes, the environment and workers.

Automotive and intelligent transport

Information Technology will drive road transport ecosystem and infrastructure to full digitalization. Networks sensing and sensor fusion will feed into real time digital twin with the objective of digital road infrastructure being enhanced. Vehicles can act as sensors and vehicle probe data can feed into real time digital twin. Terrestrial connectivity will be complemented by non-terrestrial connectivity for automotive. Sophisticated AI based traffic and mobility management algorithms will allow smooth traffic optimization. Vehicle connectivity will be provided with predictive Quality of Service. Other than this, the transition to e-mobility is under way, and inductive power transfer can be leveraged for road mobility. On rail transportation, the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) for resilient railway communications is an integral part of the way forward. Digitalization of the train control system will progress with the step-by-step implementation of the European Train Control System (ETCS) and digital control centers, which are meant to allow for carrying more traffic on the rail infrastructure and improve the reliability of train operation.

Healthcare

The future of healthcare will be enabled by intelligent Information Technology and infrastructure to reduce costs and support better, more targeted patient care. Solutions for the 2030s will build on fully automated processes, intent based orchestration and sharing of medical data as well as the provision of advanced connectivity to transform health monitoring, automated workflows and innovative new patient treatments. Subject to the broad availability of the needed data sets, the intelligent and connected healthcare model of the future will leverage

- AI/ML and real-time analytics to improve operational performance, diagnostics, and decision-making;

- distributed, low-latency edge cloud platforms to support remote and robot-assisted surgery;
- low-latency private cloud capabilities for data;
- efficient data models and processing capability scalable for sensor data to large 2D and 3D medical imaging files;
- value chain collaboration, i.e., innovation with hospitals, clinics and partners with the highest security and reliability;
- intent based operational systems, analytics and device management for healthcare applications.

Other sectors

Beyond the sectors outlined above, Information Technology will continue to play its essential role in finance, media and gaming, commerce and retail, safety and security, government, national defense, and other areas of importance to our country.

Factors of Success beyond technology

A key factor to assure successful execution of ITG Information Technology Vision 2035 will be a favorable industry and standardization environment.

Standardization, openness, and collaborative advantage

European market leaders are key contributors to key Standard Defining Organizations (SDOs) such as the European Telecommunications Standards Institute (ETSI). ETSI supports the development and testing of global technical standards for Information Technology-enabled systems, applications, and services. Cutting edge research is being fostered into collaborative advantage by means of Public Private Partnership (PPP) vehicles such as EUREKA (a large European Research Initiative) Celtic-next and Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS-JU). The German National 6G Platform and associated 6G Hubs are off to a great start and thanks to continued funding and engagement of the German Ministry of Education and Research (BMBF). 5G joint efforts are ongoing and 6G progress is on track for mass market deployments in 2030, with a single

global 6G standard to be produced in 3GPP (the global mobile broadband standards development organization). Wi-Fi Alliance has launched a certification program for Wi-Fi 7. Second release of Wi-Fi 7 certification is expected to be launched by end of 2025. The Metaverse Standards Forum aims to foster interoperability standards for Metaverse, as does the ITU-T (a standard development unit of the International Telecommunications Union) Metaverse Group. Also, we need to continuously innovate in Data Center routing and telemetry protocols work in Internet Engineering Taskforce (IETF). As regards Transport and Fixed access, attempts to obtain an ITU standards label for a proprietary control protocol for the virtual Broadband Network Gateway market need to be mitigated in the interest of a global and open ecosystem. At Broadband Forum (BBF), the Access Gateway Function Control Plane and User Plane Separation protocol is in validation phase. Open-source initiatives are of increasing relevance, projects such as Nephio will drive Communication Service Provider (CSP) network building blocks anchored in the containerized cloud architecture such as Kubernetes for creating and operating an application on the platform through the associated automation framework. Another key initiative for open Information Technology is the CAMARA project in Linux Foundation, that provides open Network Application Programming Interface (API).

Intellectual property and patent framework

In the Spring of 2023, the European Commission has proposed a new regulatory framework on Standard Essential Patents (SEP).

Spectrum

The outcome of World Radio Conference 2023 (WRC-23) is a solid basis to accommodate further growth of mobile data traffic. WRC-23 has allocated and harmonized the upper part of the 6 GHz band for mobile use for Europe, Middle-East and Africa, and for selected countries in Asia and Latin America.

Economic sustainability and monetization

Industries are joining forces to drive adoption of Information Technology such as wireless 5G on the path to 6G. Key initiatives include the 5G Automotive Association (5GAA) for automotive as well as Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) for resilient railway communications of the future.

Artificial Intelligence

The AI Act of the European Union is the world's first AI law aiming to regulate AI to comply with ethical and social norms.

Talent and education

The availability and motivation of talent is a key factor of success to evolve and execute on Information Technology Vision in Germany. Education on Information Technology and its associated applications from Kindergarten age onwards appears insufficient.

Technology Sovereignty

German dependency in almost all key domains of Information Technology is high. In the last years, several silicon providers have made sizable investment decisions for Germany (e.g., AMD, TSMC).

The future is on: Recommendations in moving forward

To conclude, we provide key recommendations as follows to execute on the Information Technology Vision 2035 and its associated opportunities of value expansion in dimensions of economic, environmental, and societal impact.

- Transfer of research into industrial context (with higher Technology Readiness Level (TRL)) needs full attention, Important Projects of Common European Interest (IPCEI) such as Microelectronics and Communication Technology (ME/CT) need to continue.
- Contributors to ETSI and other SDOs of international relevance need to keep up the joint effort to avoid fragmentation of standards. While standardization needs to be industry led, public support and funding for this may be appropriate.

- Vehicles of cooperation and PPP should be fostered such as Horizon Europe and EUREKA Celtic-next as well as, e.g., 6G Platform on German national level; a vibrant Information Technology ecosystem including academia, service providers and industry (large corporates, SMEs and start-ups) needs to be fostered and the full value chain from research to product and services needs to be strengthened
- A fair, reasonable, and non-discriminatory licensing environment remains a key success factor for the German and European Information Technology industry. Information Technology industry and practicing entities need this instrument to capture a fair return of their investment.
- The legal environment needs to be simplified. It has to be transformed to foster growth, innovation and novel use cases and guide the unfolding implications for individuals and society.
- It will be crucial to provide dedicated and licensed radio spectrum in timely fashion to maximize the mission critical potential and provide the needed basis for future traffic growth.
- Security and resilience need to move at the center of Information Technology system design.
- Academia, research institutions, and industry need to keep up the joint engagement of driving “green by design” and circularity transformation.
- Reach-out to the wider public on why and how Information Technology can help in leveraging relevant opportunities and tackling problems in the 2030s is a must. Societal sustainability is anchored in a broad understanding and acknowledgment of the beneficial impact of use cases and value.
- Education, training, recruitment, and retention of young talent within and from outside Germany needs to be strengthened.
- A sufficient level of Technology Sovereignty in the provision of Information Technology components and the operation of its systems has to be secured. This applies to the whole value chain.

- Full digital inclusion needs to be fostered simplifying the interfaces for the general public and by supporting interaction modalities such as speech or gestures and in conjunction with AI (Large Language Models).

This article is a condensed version of VDE ITG Impulse Paper “Information Technology Vision 2035”.

PROF. DR.-ING. GERHARD BAUCH

Technische Universität Hamburg (TUHH)

DR.-ING. STEFAN BRÜGGENWIRTH

Fraunhofer FHR

PROF. DR.-ING. TIM FINGSCHIEDT

Technische Universität Braunschweig

PROF. DR. HABIL. JAN HAASE

Nordakademie

PROF. DR. RER. POL. STEFFEN HAMM

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH)

DIPL.-ING. TILO HECKMANN

Telefonica

PROF. DR. TOBIAS HOSSFELD

Universität Würzburg

PROF. DR. WOLFGANG KARL

Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

PROF. DR.-ING. WOLFGANG KELLERER

Technische Universität München

PROF. DR. PHIL. NAT. BERND KLAUER

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

ASSOC. PROF. MAG. DR. GERHARD LEITNER

Universität Klagenfurt

DR.-ING. CHRISTIAN MANNWEILER

Nokia

PROF. DR. RER. NAT. HABIL. ILIA POLIAN

Universität Stuttgart

PROF. DR. HARTMUT SCHMECK

Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

DIPL.-ING. SIGURD SCHUSTER

Sigurd Schuster Management Consulting

PROF. DR.-ING. RALF TÖNJES

Hochschule Osnabrück

DR.-ING. YVONNE WEITSCH

Rohde & Schwarz

DR.-ING. VOLKER ZIEGLER

Nokia

Impressum

ITG news Jubiläumsausgabe

„70 Jahre VDE ITG“

Herausgeber: Informationstechnische Gesellschaft im VDE, Frankfurt am Main

Redaktion: Dr.-Ing. Damian Dudek, Annelie Oleniczak

Telefon: 069/63 08-3 60/-3 12

E-Mail: itg@vde.com

Internet: www.vde.com/itg

Konzept und Realisation:

HEALTH-CARE-COM GmbH,

ein Unternehmen der VDE VERLAG GmbH,

Projektleitung: Anne Wolf

Druck: copy print Kopie & Druck GmbH, Berlin