



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-

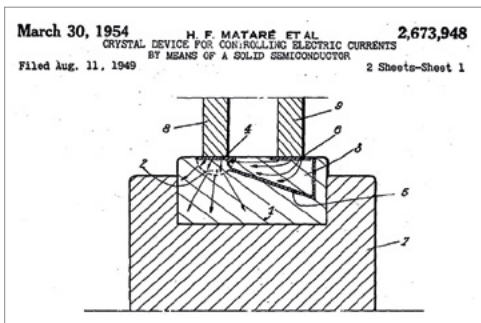


Bild 1: Bipolartransistor von H. F. Mataré und H. Welker [18]

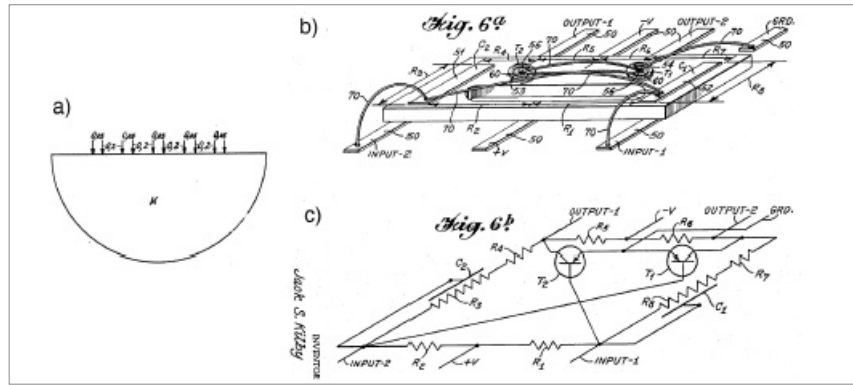


Bild 2: a) Integrierter Schaltkreis von W. Jacobi [29]; b) integrierter Schaltkreis; c) Schaltung von S. Kilby [30]

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

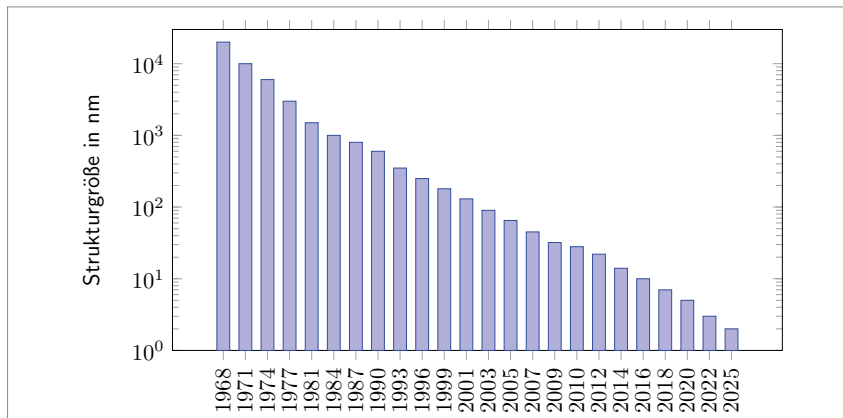


Bild 3: Die Skalierung der MOSFET

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  $\Omega\text{cm}$  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  $\text{EH}_{11}$ -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

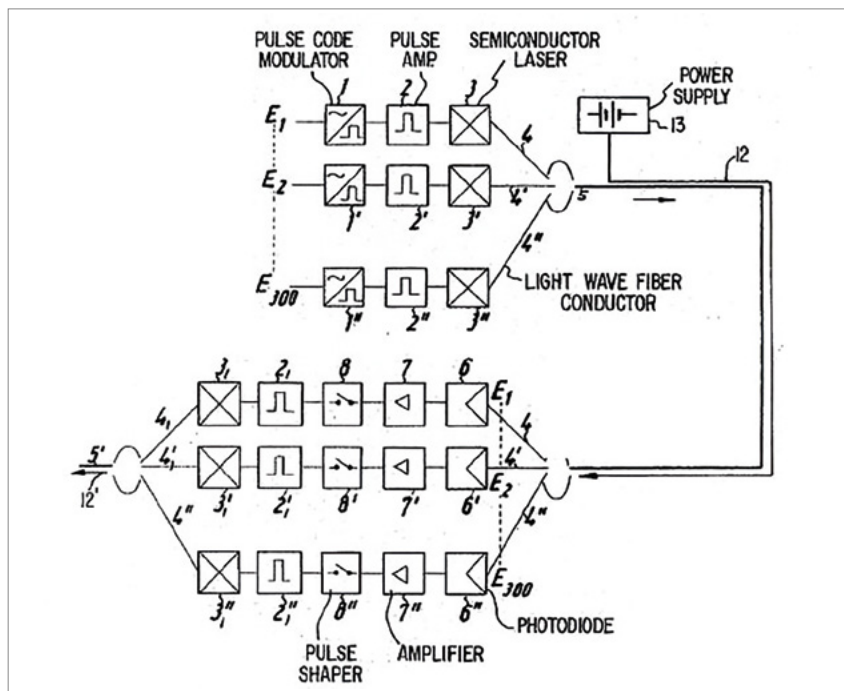


Abb. 4: Lichtleitfaser-Übertragungssystem von M. Börner [64]

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  $80 \text{ ps}$  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  $20 \text{ dB/km}$  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

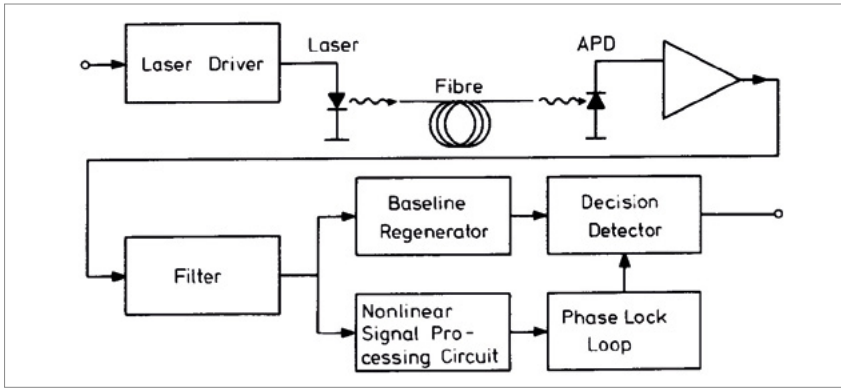


Abb. 5: Blockdiagramm des 1 Gbit/s Glasfaser-Übertragungssystems [92]

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  $10^5 \text{ A/cm}^2$  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  $10^4 \text{ Acm}^{-2}$  bei Raumtemperatur [84] und Doppelheterostrukturlaser mit einer Schwellenstromdichte von nur  $2300 \text{ Acm}^{-2}$  bei Raumtemperatur [85]. Dabei wurden durch Flüssigphasenepitaxie hergestellte GaAs-Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As-Heterostrukturen verwendet. Die schmale aktive GaAs-Schicht des Doppelheterostrukturlasers mit einer Dicke von deutlich unter  $1 \mu\text{m}$  wird von zwei Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>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-

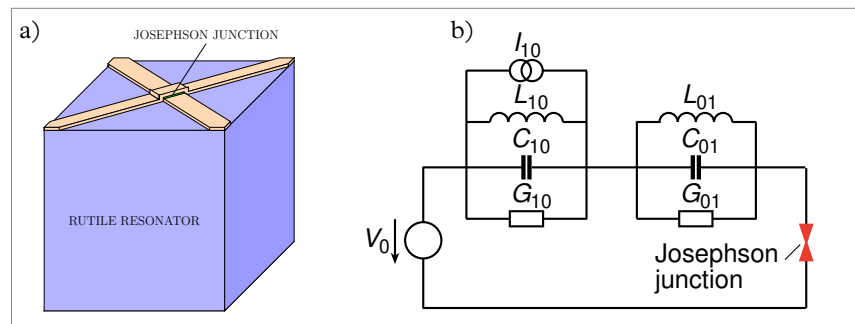


Bild 6: a) Josephson-Kontakt auf Rutil-Resonator [117], b) Josephson-Parametrischer Verstärker – Schaltung [118]

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 aufgebracht 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-

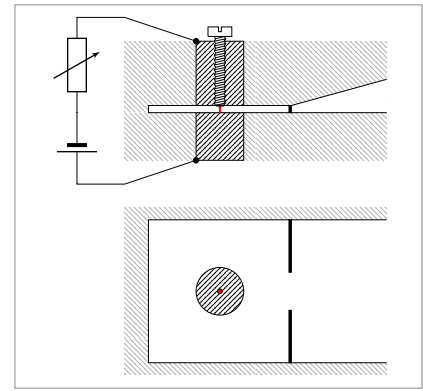


Bild 7: DC-pumped 9 GHz Josephson parametric amplifier [123]

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 Elektroniker 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-Kristallode 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](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.: Elektromagnetische Wellen in dielektrischen Drähten. *Annalen d. Physik* 32 (1910) S. 465–476.
- [61] Schrieffer, O.: Elektromagnetische 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 Pulsmodemodulation 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<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 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/cm<sup>2</sup>. *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 traveling-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.