

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 72 (1994)

Heft: 10

Artikel: Halbleiterlaser : ein Schlüsselbauelement für die optische Breitband-Kommunikation

Autor: Burkhard, Herbert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874733>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.02.2026

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

Halbleiterlaser — ein Schlüsselbauelement für die optische Breitband-Kommunikation¹

Herbert BURKHARD, Darmstadt

Zusammenfassung *Résumé*

Halbleiterlaser — ein Schlüsselbauelement für die optische Breitbandkommunikation

Die Breitbandkommunikation stützt sich heute weitgehend auf optische Verfahren: Glasfasern für den Transport der Signale und optoelektronische Bauelemente zur Wandlung der elektrischen Signale in Lichtimpulse. Der Autor erläutert den Stand der Technik bei den Halbleiterlasern, einem Schlüsselbauelement, und stellt Entwicklungen aus dem Forschungszentrum der Deutschen Bundespost Telekom vor. Zusammen mit den heute verfügbaren optischen Faserverstärkern ergeben sich neue Möglichkeiten.

Le laser semi-conducteur — un composant-clé de la communication optique à large bande

Aujourd'hui, la communication à large bande se fonde dans une large mesure sur des procédés optiques: les fibres optiques pour le transport des signaux et les composants optoélectroniques pour la conversion des signaux électriques en impulsions lumineuses. L'auteur expose l'état le plus récent de la technique des lasers semi-conducteurs et présente des développements réalisés par le centre de recherche de Bundespost Telekom. L'association de ces éléments avec les amplificateurs à fibres optiques actuels ouvre de nouvelles perspectives.

Riassunto

Laser semiconduttore — un elemento chiave per la comunicazione a larga banda ottica

La comunicazione a larga banda si basa ampiamente su elementi ottici: le fibre ottiche per il trasporto dei segnali e gli elementi optoelettronici per la trasformazione dei segnali elettrici in impulsi luminosi. L'autore spiega il livello raggiunto dalla tecnica nel campo dei laser semiconduttori e presenta gli sviluppi eseguiti presso il centro di ricerca della Deutsche Bundespost Telekom. Insieme con gli amplificatori ottici di fibra attualmente disponibili, i laser semiconduttori offrono nuove possibilità.

Summary

The Semiconductor Laser — a Key Element for the Optical Broadband Communication

Today, broadband communications is mainly based on optical technologies: optical fibres for the signal transport and optoelectronic components for the conversion of electrical signals to light pulses. The Author comments on the state of the art of the semiconductor laser, which is a key element, and presents developments originating in the research center of the German Bundespost Telekom. By combining these elements with the optical fibre amplifiers, new possibilities can be achieved.

1 Einleitung

Die Leistungsfähigkeit der optischen Nachrichtenübertragungstechnik wird heutzutage weniger von der Glasfaser bestimmt — sie ist technisch ausgereift und bereits zu Millionen von Kilometern verlegt — als von den Schaltelementen, den optoelektronischen Bauelementen. Sie dienen dazu, die digitalen elektrischen Signale in Lichtimpulse umzuwandeln, die dann über die Glasfaser geschickt und am Ende wieder in elektrische Signale zurückverwandelt werden. Der Schalter, der die optischen Lichtimpulse erzeugt, ist ein Halbleiterlaser, auf Indiumphosphid aufgebaut.

2 Eigenschaften von Halbleiterlasern

Trotz seiner geringen Grösse von nur wenigen zehntel Millimetern Länge, einem tausendstel Millimeter Breite und wenigen zehntausendstel Millimetern Dicke des lichtführenden Teils, ist ein Halbleiterlaser

ein recht komplexes Gebilde, vor allem wenn man die Wellenlänge 1550 nm für die Glasfaserübertragung nutzen will. Bei dieser Wellenlänge besitzt nämlich die Faser ihr Dämpfungsminimum von 0,2 dB/km, hat aber dafür leider eine beachtliche Dispersion, die Laufzeiteffekte und damit Signalverzerrungen bei hohen Übertragungsgeschwindigkeiten hervorruft. Um diese zu vermeiden, ist man gezwungen, einwellige Laser zu verwenden. Sie erfordern aber einen wesentlich höheren technologischen Aufwand als vielwellige Laser, die im Bereich von 1300 nm Wellenlänge (Null-durchgang der Dispersion) eingesetzt werden können, allerdings bei höheren Faserdämpfungswerten (0,5 dB/km).

Im Wellenlängenbereich von 850 nm liegt eine wesentlich höhere Dämpfung von 2 bis 2,5 dB/km — begleitet von beachtlicher Dispersion — vor. Als «Entschädigung» kann dafür aber die preiswerte Siliziumtechnik für die Empfangseinrichtung eingesetzt werden. Jeder der aufgeführten Wellenlängenbereiche hat seine spezifischen Vor- und Nachteile. Im 850-nm-Bereich (1. Fenster) lassen sich mit Multi-

¹ Vortrag, gehalten am internationalen Presse-Kolloquium der Deutschen Bundespost Telekom in Darmstadt

modedfasern bis zu etwa 100 Mbit/s über 10 km, im 1300-nm-Bereich (2. Fenster) mit mehrmodigen Lasern über Monomodedfasern etwa 10 Gbit/s über ebenfalls 10 km übertragen. Das bedeutet eine Verbesserung in der Bitrate um einen Faktor 100 bei gleicher Distanz. Trotz der höheren Komplexität der Halbleiterlaser für den 1550-nm-Bereich (3. Fenster) sind diese besonders attraktiv, weil sie mit 10 bis 20 Gbit/s modulierbar sind und gleichzeitig etwa 100 km Faserstrecke ohne Zwischenverstärker überbrückbar sind. Die Attraktivität wird noch dadurch erhöht, dass neuerdings optische Faserverstärker zur Verfügung stehen, die sehr einfach zu handhaben sind. Sie erlauben, das in die Faser gekoppelte Laserlicht noch weiter zu verstärken und somit bessere Voraussetzungen zum Beispiel für eine Verteilung der Leistung auf mehrere Teilnehmer zu schaffen. Darüber hinaus können solche Faserverstärker auf der Strecke auch als Zwischenverstärker oder am Ende der Faser zur sehr empfindlichen Aufbereitung der optischen Signale im Zusammenwirken mit dem Empfänger als Wandler in elektrische Signale eingesetzt werden.

3 Aufbau und Arbeitsweise

Ein Halbleiterlaser besteht aus einkristallinem Material, das in verschiedenen Zusammensetzungen übereinander geschichtet ist. Der Grundkristall, auf dem die eigentliche Laserstruktur aufgebaut ist, besteht aus Indiumphosphid (InP) für Laser für das 2. und 3. Fenster und aus Galliumarsenid (GaAs) für das 1. Fenster. Die leistungsfähigsten Bauelemente für 1550 nm Wellenlänge sind auf dem Grundmaterial InP und auf Mischkristallen aus den vier Elementen Indium, Gallium, Arsen und Phosphor bzw. neuerdings auch Indium, Aluminium, Gallium und Arsen aufgebaut. Der wesentliche Teil ist ein sehr schmaler Streifen eines anderen Materials, das durch teilweisen Austausch von Indium und Phosphor aus dem Indiumphosphid durch Gallium und Arsen entsteht und einen grösseren Brechungsindex hat als das Grundmaterial. Dieser Streifen ist in das Grundmaterial Indiumphosphid eingebettet, dient zur Lichtwellenführung und bildet gemeinsam mit den durch Spalten der Kristalle ent-

stehenden parallelen Endflächen den eigentlichen Laserresonator. Ohne ihn könnte sonst nur Lumineszenzlicht entstehen und kein Laserlicht mit seinen herausragenden Kohärenzeigenschaften.

Das Licht kann entweder direkt in diesem Streifen erzeugt werden oder in einem benachbarten aktiven Bereich, der ganz besondere Eigenschaften haben kann. Solche Eigenschaften beruhen auf dimensionalen Einschränkungen der Bewegungsfähigkeit der freien Ladungsträger — Elektronen und Löcher — und werden Quanteneffekte genannt. Sie können die Lasereigenschaften sehr günstig beeinflussen: im Hinblick auf die Höhe der Modulationsgeschwindigkeit, die dynamische Linienbreite, den Schwellenstrom, den nutzbaren Temperaturbereich und vieles mehr.

Die Injektion der Ladungsträger — positiv geladene Löcher und negative Elektronen — in den aktiven Bereich geschieht über eine Doppelhetero-Diode. Diese bringt nicht nur die das Licht erzeugenden Ladungsträger an den gleichen Ort, sondern hält sie auch dort fest, so dass sie sehr effektiv rekombinieren können und Strahlung erzeugen. Der prinzipielle Aufbau eines Halbleiterlasers ist in *Figur 1* schematisch dargestellt. Die Ladungsträger werden von oben und unten injiziert, die Lichtwelle läuft entlang dem schmalen Führungstreifen und wird von den Endflächen teilweise reflektiert. Die Laserstrahlung verlässt die gespaltenen Endflächen des Kristalls stark divergent.

Die beschriebene Laserform besitzt zwei zueinander parallele Spiegel, die den Resonator bilden. Hierdurch wird aber nicht nur eine Wellenlänge zum Anschwingen gebracht, sondern mehrere mit gleichen Wellenlängenabständen. Bedingt werden diese verschiedenen Schwingungszustände — Moden — dadurch, dass ein Vielfaches jeder speziellen Wellenlänge genau der Laserlänge (Resonatorlänge) entspricht und eine stehende Welle erzeugt.

4 Verbesserte Laserformen

Alle diese Moden haben näherungsweise die gleiche Schwellenverstärkung, und dadurch ergibt sich ein

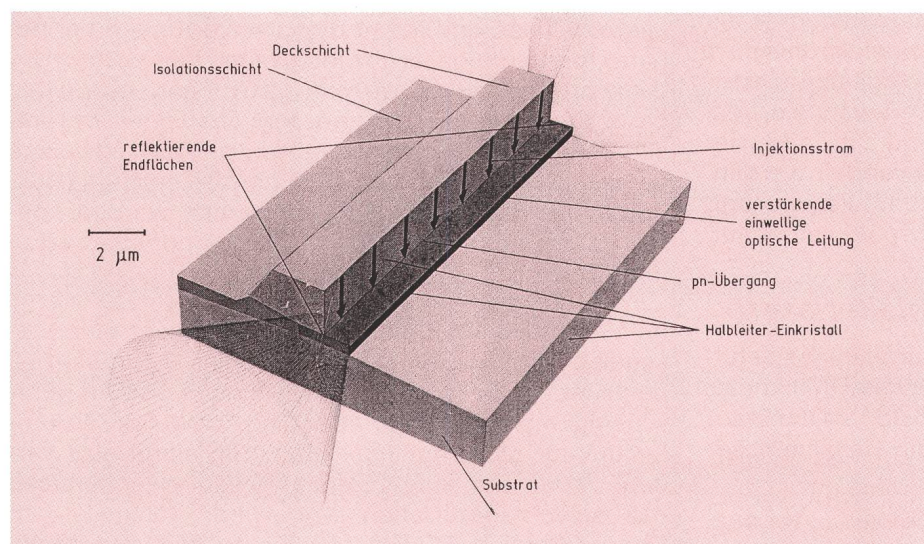


Fig. 1 Prinzipieller Aufbau eines Halbleiterlasers

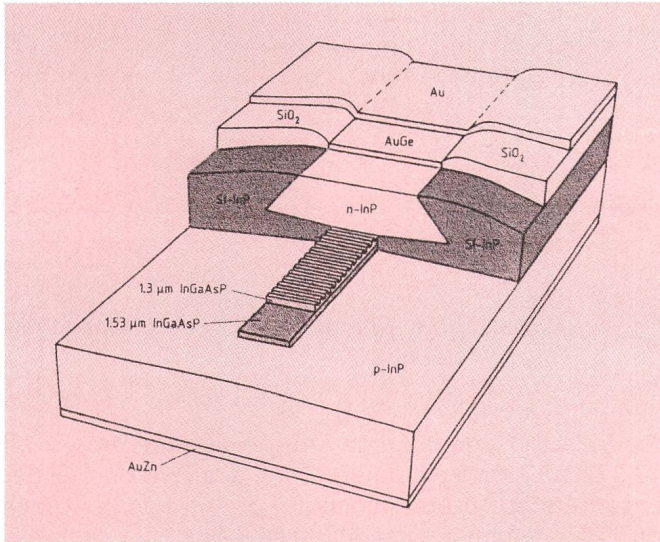


Fig. 2 Aufbau eines Lasers mit verteilter optischer Rückkopplung (DFB-Laser)
DFB Distributed Feedback

relativ breites Spektrum. Solche Laser sind daher aber nicht für die Nachrichtenübertragung bei sehr hohen Modulationsgeschwindigkeiten im 3. Fenster (1550 nm) geeignet. Anstelle der beschriebenen *Fabry-Perot*-Laser mit mehrmodigem breitem Spektrum treten für die höchsten Modulationsgeschwindigkeiten heutzutage einwellige Laser mit extrem engem Spektrum. Solche Laser wurden im Forschungszentrum der Telekom entwickelt. Sie besitzen zusätzlich zu dem Wellenleiter, wie ihn auch der *Fabry-Perot*-Laser hat, noch ein Beugungsgitter mit Submikrometer-Periode des Brechungsindex oder der Dämpfung bzw. Verstärkung (oder beides kombiniert). Solche periodischen Strukturen in einem Laserwellenleiter können eine einzige Wellenlänge äusserst stark aus dem Spektrum hervorheben, so dass andere Moden nicht anschwingen können und mehr als zehntausendmal schwächer bleiben — auch unter direkter Modulation des Injektionsstroms.

Figur 2 zeigt den Aufbau eines DFB-Lasers (DFB für Distributed Feed-Back, verteilte optische Rückkopplung) aus dem Forschungszentrum der Telekom. Bei

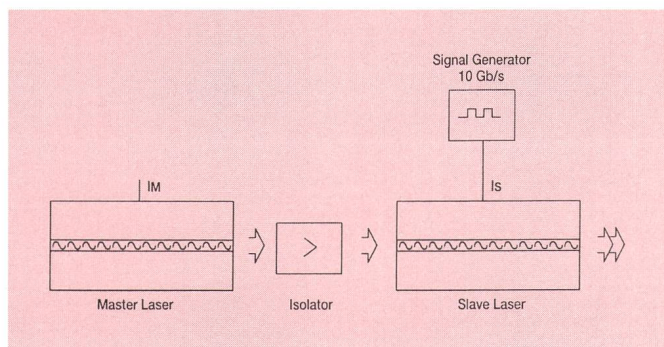


Fig. 3 Anbindung eines modulierten Lasers an die Frequenz eines stabilen Referenzlasers (Injection Locking)
Im, Is Laserströme von Referenz-(Master-) und angebundnem (Slave-)Laser

direkter Modulation und extrem hohen Frequenzen zeigen aber auch solche Laser noch Unzulänglichkeiten bezüglich der Qualität des Spektrums, die physikalisch begründet sind und grundsätzlich nicht vollständig beseitigt werden können. Das liegt daran, dass durch die Strommodulation sehr rasch Ladungsträger in die aktive Zone injiziert werden, die nicht sofort in Licht umgewandelt werden können — der Laser reagiert mit einem Einschwingvorgang Licht — Ladungsträger. Durch diese, wenn auch äusserst kurze Verzögerung, verändert sich die Länge des optischen Weges der Laserstrahlung, was zu einer Frequenz- bzw. Wellenlängenänderung im Takt der Modulation führt.

Diese Wellenlängenänderung liegt zum Beispiel bei 10 Gbit/s im Bereich von 0,3 nm bei sehr guten DFB-Lasern mit «Quantum-Well»-Struktur. Sie genügt aber, um Signalverzerrungen in der Glasfaser durch Laufzeiteffekte der verschiedenen Frequenzanteile im optischen Spektrum auftreten zu lassen, was natürlich ein fehlerfreies Detektieren des Signals unmöglich macht. Um dennoch auf vergleichsweise einfache Art sehr schnelle Signale über Standardfasern übertragen zu können, wurde im Forschungszentrum erstmals weltweit die Methode des «Injection Locking» («Festhalten durch Einspritzung») angewandt. Sie beruht darauf, dass eine konstante Lichtwelle aus einem anderen Halbleiterlaser in den modulierten Laser injiziert wird und dadurch dessen Lichtfrequenz an die des anderen Lasers «angebunden» wird (Fig. 3). Hierdurch wird das Auswandern der Mittenfrequenz durch die Modulation — «chirpen» genannt — praktisch vollständig unterdrückt. Simulationen des gesamten Systems *Laser — Faser — Faserverstärker — Photoempfangsdiode — elektrischer Filter — elektrischer Verstärker* zeigen, dass sich so bei 10 und 15 Gbit/s Feldlängen von 80 bzw. 50 km aufbauen lassen.

Figur 4 zeigt die berechnete Bitfehlerrate für einen mit 10 Gbit/s und 40 mA_{ss} modulierten Quantum-Well-Laser mit verteilter Rückkopplung als Funktion der empfangenen optischen Leistung. Die verschiedenen Kurven gehören zu den jeweils angegebenen Faserlängen. In diesem Beispiel wurde vor der Empfangsdiode ein optischer Faserverstärker mit 17 dB

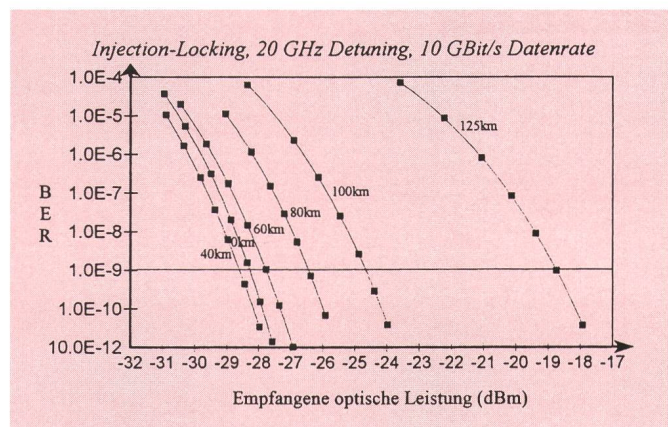


Fig. 4 Bitfehlerrate (BER) eines 1,53-μm-Lasers mit einem 17-dB-Faserverstärker

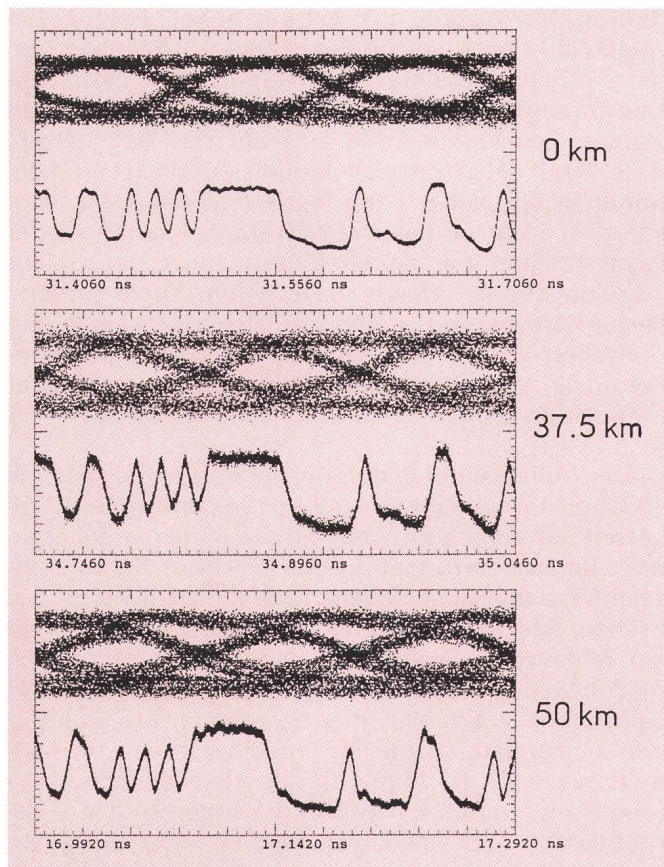


Fig. 5 Augendiagramme des empfangenen Signals nach 37,5 und 50 km

Verstärkung angenommen. Ein Versuchsaufbau eines solchen Systems wurde im Forschungszentrum ebenfalls untersucht.

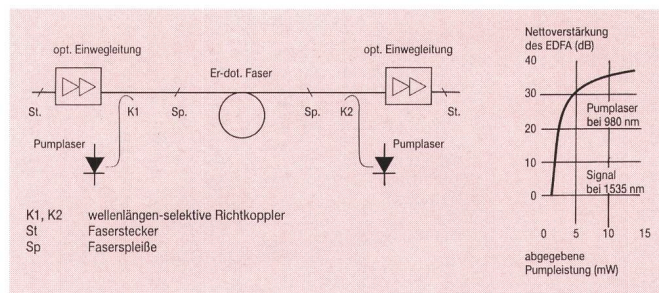
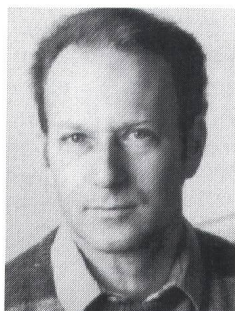


Fig. 6 Aufbau und Charakteristik eines optischen Faserverstärkers

Figur 5 zeigt empfangene «Augen»-Diagramme nach 37,5 und 50 km Faserlänge. Ohne das «Einfrieren» der Laserfrequenz durch Injection Locking könnten nach den angegebenen Faserstrecken keine Signale mehr empfangen werden — die «Augen» wären geschlossen.

Einen wesentlichen Fortschritt für die optische Nachrichtenübertragung hat die Entwicklung optischer Faserverstärker für das 3. Fenster gebracht. Hierbei wird mit einem Halbleiterlaser für 980 nm Emissionswellenlänge eine Erbium-dotierte Faser von etwa 10 bis 30 m Länge optisch «gepumpt», so dass ein Nutzsignal zwischen 1530 und 1570 nm bis über 30 dB verstärkt werden kann. Die effizienteste Pumpwellenlänge liegt bei 980 nm. Solche Laser beruhen auf dem Material Galliumarsenid; die aktive Zone besteht aus einer verspannten Schicht aus Indium-Gallium-Arsenid. Im Forschungszentrum der Telekom wurden solche Bauelemente hergestellt, die eine optische Leistung von mehr als 20 dBm (100 mW) abgeben können und zum «Pumpen» in Faserverstärkern eingesetzt werden (Fig. 6).



Dr. Herbert Burkhard erhielt 1966 sein Diplom in Physik von der Universität Köln und promovierte dort 1969. Von 1970 bis 1977 arbeitete er als Wissenschaftlicher Assistent an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, und 1974/75 war er für 1½ Jahre Gastwissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Festkörperphysik in Grenoble/Frankreich, wo er Halbleitereigenschaften in höchsten Magnetfeldern untersuchte. Seit 1977 arbeitet er im Forschungszentrum der Deutschen Bundespost Telekom in Darmstadt. 1988 wurde er Leiter der Forschungsgruppe «Optoelektronische Bauelemente» und 1989 Gutachter des Telekom-OEIC-Projektes. Seit 1992 ist er Projektmanager von RACE 2006 WELCOME.