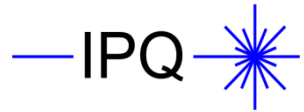


Vertiefungsrichtung 12: Photonics

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Photonik und Quantenelektronik (IPQ)
Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT)





Liebe Studierende,

die Photonik ist eine Schlüsseltechnologie der Informationstechnik. Optische Kommunikationsnetze ermöglichten die wohl größte technologische Revolution der letzten Jahrzehnte – das Internet – und jede E-Mail, jedes YouTube-Video, jede Onlinebestellung und jedes Telefonat, sei es über Mobilfunk oder im Festnetz, wird heute mit Laserlicht über ein Glasfasernetz übertragen. Optische Sensoren und Messverfahren haben nicht nur viele industrielle Anwendungen revolutioniert, sondern sind auch zu einer unverzichtbaren Grundlage der Medizintechnik und der Lebenswissenschaften geworden. Mit modernsten Methoden der Nanotechnologie wird es möglich, Tausende von optischen Bauteilen auf einem einzigen Mikrochip zu vereinigen und damit Signale und Datenströme mit Bandbreiten im Terahertz-Bereich zu verarbeiten. Diese Entwicklungen sind das Resultat kontinuierlicher Innovationen, beginnend mit der Erfindung des Halbleiterlasers über die Entwicklung verlustarmer Glasfasern und breitbandiger optischer Verstärker bis hin zur integrierten Optik. Die Photonik war und ist geradezu ein Paradebeispiel dafür, wie grundlegendes Wissen genutzt werden kann, um einen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Mehrwert zu schaffen.

Im Masterstudiengang ETIT bietet Ihnen die Vertiefungsrichtung 12 die Möglichkeit, mit der Photonik und der Informationstechnik zwei hochaktuelle und dynamische Zukunftsfelder zu verbinden. In den zugeordneten Lehrveranstaltungen werden theoretische Grundlagen vertieft und in Bezug zu vielfältigen praktischen Anwendungen gestellt. Beispiele hierfür sind die Feldausbreitung in optischen Wellenleitern, der Aufbau und die Funktionsweise von Halbleiterbauelementen wie Fotodioden und Lasern sowie Verfahren der Nachrichtentechnik wie beispielsweise Modulation und Kodierung, die auf die optische Kommunikationstechnik oder die Messtechnik angewendet werden. Eine Übersicht über die der Vertiefungsrichtung 12 zugeordneten Lehrveranstaltungen finden Sie auf den letzten Seiten dieser Broschüre.

Am Institut für Photonik und Quantenelektronik (IPQ) forschen wir intensiv an der Zukunft photonischer Technologien für vielfältige Anwendungsfelder, die von der Kommunikationstechnik über die Sensorik bis hin zur Biologie und den Lebenswissenschaften reichen. Regelmäßig publizieren wir unsere Ergebnisse auf international angesehenen Tagungen und in renommierten Zeitschriften. Eine Auswahl dieser Forschungsthemen stellen wir Ihnen in dieser Broschüre vor.

Vor dem Hintergrund des weiterhin rasch wachsenden Datenverkehrs sowie der zunehmenden Bedeutung der Photonik insgesamt beobachten wir einen rasant wachsenden Bedarf an qualifizierten Fachkräften sowohl in der Industrie, als auch in der universitären und außeruniversitären Forschung.

Wir laden Sie herzlich ein, sich auf den nächsten Seiten mit der Vertiefungsrichtung 12 „Photonics“ vertraut zu machen und empfehlen an dieser Stelle auch einen Besuch unserer Institutswebseite (www.ipq.kit.edu). Bei Bedarf stehen wir Ihnen auch gerne persönlich zur Beantwortung Ihrer Fragen zur Verfügung.

Viel Vergnügen bei der Lektüre!



Prof. Dr.-Ing.
Sebastian Randel



Prof. Dr.-Ing.
Christian Koos



Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.
Wolfgang Freude

Wachstumsaussichten und Berufsperspektiven

Internetzugang zu Hause und am Arbeitsplatz ist ähnlich wie Strom aus der Steckdose zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Dies wäre undenkbar ohne die optische Kommunikationstechnik. In der Vertiefungsrichtung 12 lernen Sie die Prinzipien moderner optischer Kommunikationssysteme und die zugrundeliegenden photonischen Technologien kennen. Die Forschungsarbeiten am IPQ sind stark interdisziplinär ausgeprägt und reichen von grundlegenden physikalischen Bauteilprinzipien über Herstellungstechnologien bis hin zu Systemaspekten in der Datenübertragung und weiteren Anwendungsgebieten der Photonik. Mit diesem Wissen sind Sie bestens gerüstet, die Zukunft optischer Kommunikationssysteme und photonischer Technologien mitzugestalten.

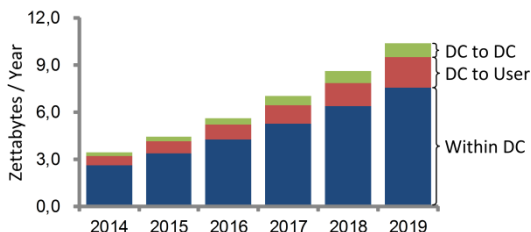


Abbildung 1: Entwicklung des weltweiten Datenverkehrs im Internet: Das Datenaufkommen verdoppelt sich alle zwei Jahre, der Hauptteil fällt dabei innerhalb von Datenzentren (Data Center, DC) an. Quelle: 2015 Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2014 – 2019. Ein Zettabyte entspricht 10^{21} Bytes.

Gerade im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik ist die Photonik eine unverzichtbare Schlüsseltechnologie, die viele spannende Herausforderungen bereithält. Die zunehmende Verbreitung von Cloud-Anwendungen, Social Networking und Video Streaming lassen den Datenverkehr im Internet mit durchschnittlichen Wachstumsraten (compound annual growth rate, CAGR) von 25-35% weiter stark anwachsen. Dies erfordert einen konsequenten Ausbau der Datennetze und betrifft, neben Weitverkehrs- und Zugangsnetzen, insbesondere auch die Kommunikation innerhalb von und zwischen Datenzentren. Optische Datenverbindungen, sogenannte Interconnects, haben hierbei entscheidende Vorteile im Vergleich zu konventionellen elektrischen Datenleitungen, besonders im Hinblick auf Kapazität, Effizienz und Energieverbrauch. Aus diesem Grund werden derzeit elektrische Verbindungen in fast allen großen Datenzentren durch optische Interconnects ersetzt. Dieser Trend wird sich weiter fortsetzen: Optische Hochgeschwindigkeitsverbindungen auf der Platinen- und Chip-Ebene sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten, siehe Abbildung 2.

Entsprechend Ihrer Interessenslage bietet die Vertiefungsrichtung 12 die Chance zum Einstieg in vielfältige weitere Forschungsthemen. Dazu zählen zum Beispiel die optische Messtechnik, die Biophotonik und die Teratronik. Nähere Informationen zu diesen Bereichen und Beispiele aus den aktuellen Forschungsschwerpunkten des IPQ finden Sie auf den folgenden Seiten.

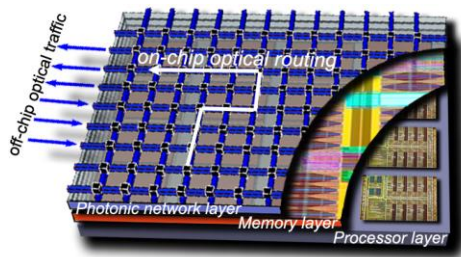


Abbildung 2: Vision der Firma IBM zu dreidimensional integrierten Rechnerarchitekturen: Das System umfasst Prozessoren und Speicherchips, die durch leistungsfähige optische Interconnects miteinander verbunden sind.

Optische Kommunikationstechnik und Photonik eröffnen Ihnen zahlreiche Perspektiven in verschiedenen Berufsfeldern und Unternehmen – angefangen von großen Hightech-Unternehmen im In- und Ausland (Nokia, Keysight, Finisar, Cisco Systems, Infinera, Coriant, Trumpf Laser, Zeiss, Bosch, und andere) bis hin zu global agierenden mittelständischen Unternehmen und Start-ups mit hohem Zukunftspotenzial (ADVA, Sick Sensor Intelligence, Nanoscribe, Polytec, Vanguard Photonics und andere). Wer eine Karriere in der Forschung anstrebt, findet ebenfalls vielfältige Möglichkeiten: Das IPQ betreibt Spitzenforschung auf internationalem Niveau, was sich in regelmäßigen Beiträgen und Einladungen zu den bedeutendsten Konferenzen der Branche zeigt, und es pflegt langjährige Kontakte zu Forschungsabteilungen großer Unternehmen sowie zu Forschungsinstituten im In- und Ausland.



Abbildung 3: Die potentiellen Arbeitgeber in der Photonikbranche sind vielfältig und reichen von namhaften Netzausrüstern, über die Hightech-Industrie bis hin zu innovativen Start-ups.

Forschungsgebiet

Optische Kommunikationssysteme

Optische Kommunikationssysteme erlauben es, mit Datenraten von mehreren Terabit pro Sekunde (Tbit/s) über Distanzen von 10 000 km und mehr zu kommunizieren. Ganze Städte und Kontinente sind mit Glasfasernetzen durchzogen, und mit Fiber-to-the-home (FTTH) erstrecken sich diese bis in Privathaushalte. Die Anforderungen hinsichtlich Kapazität, Reichweite, Zuverlässigkeit, Kosten und Energieverbrauch sind vielfältig und unterscheiden sich teilweise stark in den jeweiligen Netzsegmenten. In den letzten Jahren hat zudem die optische Kommunikation innerhalb und zwischen Datenzentren deutlich an Bedeutung gewonnen. Internetriesen wie Google, Microsoft, Amazon und Facebook betreiben heute riesige Datenzentren deren Bandbreitebedarf jährlich um ca. 60% wächst. Dieses Wachstum ist nur möglich, wenn Kosten und Energieverbrauch nicht im gleichen Maße steigen, wozu eine kontinuierliche Optimierung optischer Kommunikationssysteme notwendig ist.

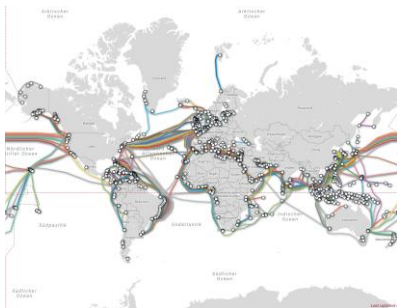


Abbildung 4: Links: Weltkarte mit aktiven und geplanten Unterseekabeln mit den entsprechenden Landestationen. Quelle: www.submarinecablemap.com. Rechts: Modernes Datenzentrum von Microsoft in Chicago. Die breitbandige Anbindung von vielen tausend Servern stellt die zugrundeliegenden Kommunikationsnetze vor große Herausforderungen, die nur durch optische Übertragungssysteme gelöst werden können. Zur Vernetzung eines einzigen Datenzentrums werden dabei Zehntausende von optischen Verbindungen benötigt. Quelle: datacenterknowledge.com.

Ethernet hat sich heute in vielen drahtgebundenen Kommunikationsnetzen als Standard durchgesetzt. Während in Heim- und Büronetzwerken meist noch Gigabit-Ethernet bzw. 10 Gigabit-Ethernet eingesetzt wird, kommen in Datenzentren heute bereits Datenraten von 40 Gbit/s bis 100 Gbit/s zu Einsatz. Standards für 200 Gbit/s und 400 Gbit/s Ethernet stehen kurz vor ihrem offiziellen Release. In der Forschung wird heute an Technologien für Terabit-Ethernet gearbeitet.

Während in optischen Kommunikationssystemen lange Zeit zweistufige Modulation, also das Ein- und Ausschalten der Lichtleistung, mit Geradeausempfang verwendet

wurde, gewinnen kohärente Übertragungssysteme, die sowohl die Amplitude als auch die Phase der Lichtwelle zur Darstellung der Symbole einsetzen, zunehmend an Bedeutung. Ferner werden heute digitale Signalprozessoren eingesetzt, um Störungen der Signalqualität durch Effekte wie z.B. chromatische Dispersion und Polarisationsmodendispersion sowie Rauschen zu kompensieren. Diese werden zusammen mit Analog-Digital-Wandlern mit Abtastraten von bis zu 90 GS/s in CMOS-Schaltkreisen der neuesten Generation, z.B. 16nm FinFET, gefertigt.

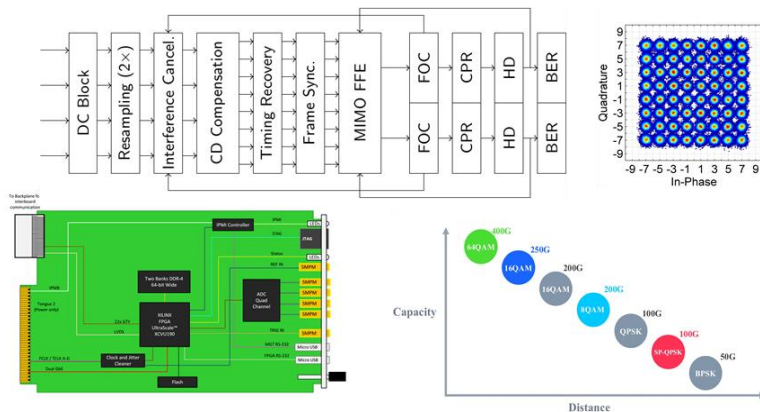


Abbildung 5: Oben: Signalverarbeitungsschritte in kohärenten optischen Empfängern sowie Konstellationsdiagramm mit 64-stufiger Modulation bei einer Symbolrate 72 Gbd. Unten: FPGA Entwicklungsplattform mit 4-kanaligem Analog-Digital Wandler bei 56 GSamples/s sowie Übertragungskapazität vs. Reichweite für verschiedene Modulationsformate.

Am IPQ erforschen wir in diesem Zusammenhang neuartige energieeffiziente Systemkonzepte und Signalverarbeitungsalgorithmen. Beispielsweise untersuchen wir den Einsatz von digitalen Entzerrern, um lineare und nichtlineare Verzerrungen, welche in analogen Send- und Empfangskomponenten auftreten, zu kompensieren. Dadurch wird es möglich, sowohl die Symbolraten als auch die spektrale Effizienz weiter zu erhöhen. So wurde kürzlich am IPQ ein 16-stufiges Signal bei einer Symbolrate von 100 Gbd über einen einzelnen elektrooptischen Modulator geschickt. Ein weiteres Beispiel sind sogenannte multiple-input multiple-output (MIMO) Entzerrer, welche die Kommunikation über einzelne räumliche Moden in neuartigen Mehrmodenfasern erlaubt. Dabei implementieren wir die Algorithmen zunächst in Simulationsumgebungen wie z.B. Matlab oder Python und implementieren diese dann in Echtzeit auf einer FPGA-Entwicklungsumgebung.

Forschungsgebiet Integrierte Photonik

Integriert-optische Systeme spielen eine Schlüsselrolle in einer Vielzahl von Anwendungen, die von der Datenkommunikation über die Mess- und Automatisierungstechnik bis hin zur Biophotonik und Medizintechnik reichen. Hybride Integrationskonzepte für optische Systeme sind in diesem Zusammenhang von grundlegender Bedeutung. Das gilt insbesondere für photonische Sender-Empfänger-Module, die es ermöglichen, höchste Datenraten mit geringem Energieverbrauch zu übertragen. Unser Lösungsansatz für die Integration verschiedener optischer Mikrochips zu einem leistungsfähigen und kompakten System ist das sogenannte photonische Wirebonden, welches einmodige Polymerwellenleiter zum Verbinden der Chips verwendet, siehe Abbildung 6. Zur Herstellung der photonischen Wirebonds kommt ein 3D-Laserlithographieverfahren zum Einsatz, das auf dem Prinzip der Zweiphotonenpolymerisation beruht¹. Dieses Verfahren zur Herstellung von Strukturen auf der Mikrometerskala stellt ein Analogon zum makroskopischen 3D-Drucken dar. Die nach diesem Verfahren hergestellten Strukturen können nahezu jede beliebige dreidimensionale Form aufweisen und lassen sich somit flexibel an planare Wellenleiter auf integriert-optischen Chips ankoppeln. Die gleiche Technologie ermöglicht die Herstellung von Freiform-Linsen auf der Oberfläche oder der Kante eines optischen Chips. Das ermöglicht eine einfache Integration von photonischen Chips in optische Freistrahlsysteme.

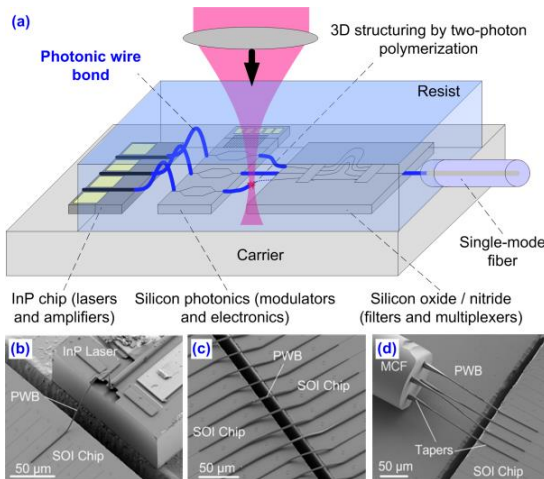


Abbildung 6: Photonische Wirebonds (PWB) werden mit Hilfe eines Femtosekunden-Lasers in einen flüssigen Photolack gedruckt. Mit diesen Strukturen lassen sich unterschiedliche optische Komponenten zu einem leistungsfähigen Gesamtsystem verbinden

¹ Lindenmann, N. *et al.*: 'Photonic wire bonding: a novel concept for chip-scale interconnects'; Opt. Express **20**, 17667-17677 (2012)

Forschungsgebiet Nanophotonik

Im Rahmen unserer Arbeiten auf dem Gebiet der Nanophotonik beschäftigen wir uns mit grundlegenden photonisch-elektronischen Wirkprinzipien. Wir setzen diese in neuartige Bauteilkonzepte um und erarbeiten die zugehörigen Fabrikationsprozesse. Der Schwerpunkt unserer Arbeiten liegt auf der Siliziumphotonik und der Plasmonik. Aktuelle Forschungsthemen reichen von ultra-schnellen Modulatoren² und Detektoren³ für die THz-Signalverarbeitung bis hin zu nanoskaligen Strukturen für die Biosensorik. Bei vielen dieser Komponenten greifen wir auf ausgereifte Fabrikationsprozesse der Mikroelektronik zurück.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft einen am IPQ entwickelten ultra-schnellen Photodetektor. Die Entstehung eines neuen Bauteils beginnt meistens mit einer zündenden Idee, deren prinzipielle Machbarkeit durch theoretische Abschätzungen und durch numerische Simulationen verifiziert wird. Danach wird ein konkretes Design für das Bauteil ausgearbeitet – auch hier greifen wir auf ein umfangreiches Portfolio an Simulationswerkzeugen zurück. Die Herstellung der Bauteile erfolgt entweder durch externe Technologiepartner („Foundries“) oder in unseren eigenen Reinräumen am IMT (Campus Nord). Dabei nutzen wir einschlägige Halbleiter-fertigungsprozesse, wie z. B. Elektronenstrahl-Lithographie und reaktives Ionenätzen. In unseren Laboren verfügen wir über ein breites Spektrum an Methoden zur optischen und elektrischen Charakterisierung der so entstandenen Bauelemente.

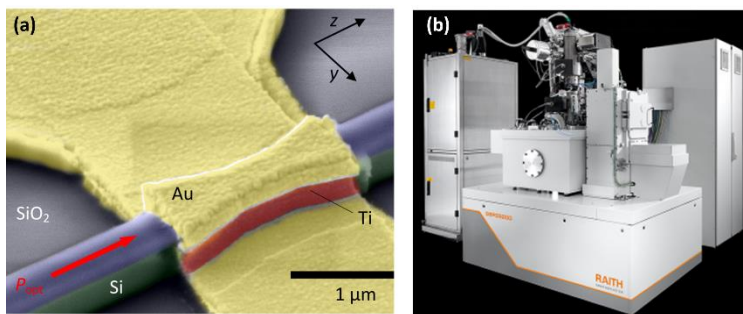


Abbildung 7: (a) Plasmonischer Photodetektor. Eine optische Welle wird absorbiert und führt zu einem Strom proportional zur Lichtleistung. Die geringen Bauteilabmessungen ermöglichen eine Bandbreite bis in den THz-Bereich. (b) Die Bauteile werden in den Reinräumen des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT) hergestellt.

² Melikyan, A. *et al.*, High speed plasmonic phase modulators, *Nature Photonics* **8**, 229 – 233, 2014

³ Muehlbrandt, S. *et al.*, Silicon-plasmonic internal-photoemission detector for 40 Gbit/s data reception, *Optica*, **3**, 7, 741 – 247, 2016.

Forschungsgebiet Optische Messtechnik

Das IPQ erarbeitet hochgenaue optische Distanzmessverfahren, die mit Auflösung im Mikrometerbereich in der Koordinatenmesstechnik für die industrielle Hochpräzisionsfertigung eingesetzt werden können. Dabei kommen sowohl konventionelle, aus diskreten Komponenten aufgebaute Systeme, als auch optische Mikrochips zum Einsatz. Die nanophotonische Integration der Komponenten macht die Messverfahren besonders robust gegenüber Temperaturschwankungen und Vibrationen und ist für die Herstellung von kompakten Distanzmesssensoren in großen Stückzahlen besonders gut geeignet. Unser Team konnte kürzlich das weltweit schnellste Distanzmesssystem demonstrieren, mit dem eine Luftgewehrkugel im Flug mikrometergenau abgetastet werden kann, siehe Abbildung 8a.

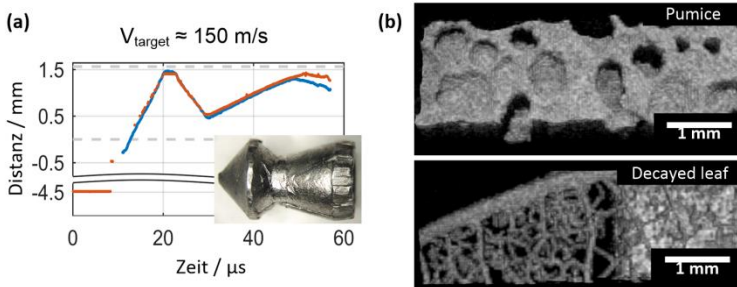


Abbildung 8: Optische Messverfahren kombinieren hohe Auflösung mit hoher Messgeschwindigkeit und erlauben eine berührungslose Charakterisierung der Probe. **(a)** Messung des Oberflächenprofils einer fliegenden Luftgewehrkugel. **(b)** OCT-Aufnahme eines Bimssteins und des Innenlebens eines Blattes.

Ein weiteres Forschungsgebiet ist die optische Kohärenztomographie (OCT). Mit OCT lässt sich die räumliche Verteilung der optischen Rückstreuung in einem Objekt mit hoher Auflösung messen. Anwendungen reichen von der Medizintechnik (z. B. zur Untersuchung der Retina) bis zur hin industriellen Messtechnik (z. B. zur Charakterisierung von Nanokomposit-Werkstoffen⁴). Abbildung 8b zeigt beispielhaft die Ergebnisse zweier Experimente am IPQ. Wir forschen an zukünftigen Konzepten für optische Kohärenztomographiesysteme und verwenden dabei insbesondere Ansätze der integrierten Optik⁵.

⁴ Schneider, S.; *et al.*: 'Multiscale dispersion-state characterization of nanocomposites using optical coherence tomography'; Scientific Reports 6, Article number 31733, (2016)

⁵ Schneider, S. *et al.*: "Optical coherence tomography system mass-producible on a silicon chip"; Opt. Express 24, 1573-1586 (2016)

Forschungsgebiet Biophotonik

Die Biophotonik befasst sich mit sensorischen Anwendungen der Photonik auf Fragestellungen aus der Biologie, der Medizin und aus den Lebenswissenschaften. Die Forschungsarbeiten unseres Teams werden dabei am IMT und am IPQ in einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Ingenieuren mit Wissenschaftlern aus der Biologie und der Medizin durchgeführt. Gegenstand unserer Arbeiten sind hochempfindliche Sensoren zur Früherkennung von Krankheiten oder zur Messung von Verunreinigungen im Trinkwasser, wo bereits geringste Konzentrationen eines Erregers bzw. einer Kontamination detektiert werden können.

Um eine lange Interaktionsstrecke des Lichts mit den Zielmolekülen zu erhalten, setzen wir resonante Strukturen wie z.B. optische Ringresonatoren auf Siliziumbasis oder kelchförmige Flüstergalerie-Resonatoren aus Polymeren an, siehe Abbildung 9a. Die Oberflächen der mikroskopischen Lichtleiter werden dabei chemisch so modifiziert, dass Zielmoleküle spezifisch anbinden können und dabei lokal den optischen Brechungsindex ändern. Dies führt zu einer messbaren Verschiebung der Resonanzfrequenzen, deren Stärke mit der Zahl der an der Oberfläche gebundenen Moleküle zunimmt.

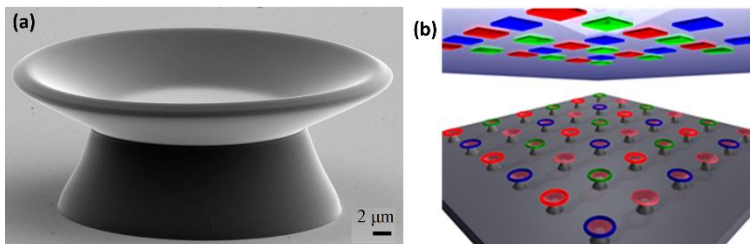


Abbildung 9: (a) Ein kelchförmiger Resonator kann Licht über viele Umläufe speichern und dabei immer wieder mit auf der Oberfläche angelagerten Substanzen wechselwirken lassen. Dies ermöglicht eine hochgenaue Detektion von bestimmten Zielmolekülen mit Hilfe von Licht. (b) Schema der Oberflächenfunktionalisierung eines Arrays von Kelchresonatoren mit Mikrostopfeln.

Für die Herstellung großflächiger Sensorarrays und für deren Integration in Sensorchips nutzen wir die Reinraumlabor und Fertigungstechnologien am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT). Um eine selektive Detektion bestimmter Bestandteile im Analyten zu ermöglichen, müssen die Sensorstrukturen vor der Messung mit biochemischen Oberflächenfunktionalisierungen versehen werden. Wir entwickeln hierzu Technologien wie z. B. das Mikrostopfeln, siehe Abbildung 9b, mit denen bei hoher örtlicher Auflösung einzelne Resonatoren adressiert und funktionalisiert werden können. Die Biosensorik-Experimente werden u.a. in enger Zusammenarbeit mit Experten der Universitätsklinik Freiburg durchgeführt.

Forschungsgebiet Teratronik

Die Fusion von photonischen und elektronischen Verfahren ermöglicht die Erzeugung, Verarbeitung und Detektion von Datenströmen mit Raten im Bereich einiger Terabit/s sowie von Signalen mit Bandbreiten im Terahertz-Bereich. Ziel unserer Forschung auf dem Gebiet der Teratronik ist es, die dafür benötigten Konzepte und Technologien zu erarbeiten. Dies betrifft sowohl neuartige Bauteilkonzepte als auch die zugehörigen Signalverarbeitungsverfahren. Die prinzipielle Tragfähigkeit derartiger Konzepte wurde durch wegweisende Experimente am IPQ bereits unter Beweis gestellt. In einem dieser Experimente wurde eine Drahtlosübertragung mit einer Rekord-Datenrate von 100 GBit/s bei einer Trägerfrequenz von 237,5 GHz demonstriert⁶. Das Sendesignal wurde dabei durch optische Verfahren erzeugt und durch eine sehr schnelle, direkt an die Sendeantenne angeschlossene Photodiode in ein elektrisches Signal übersetzt. Derartige Verfahren können zukünftig zur Realisierung von Hochgeschwindigkeits-Richtfunkstrecken eingesetzt werden, siehe Abbildung 10. Die derzeitigen Forschungsarbeiten am IPQ konzentrieren sich vor allem auf neuartige Bauteile für die Schnittstelle zwischen elektrischen und optischen Signalen.

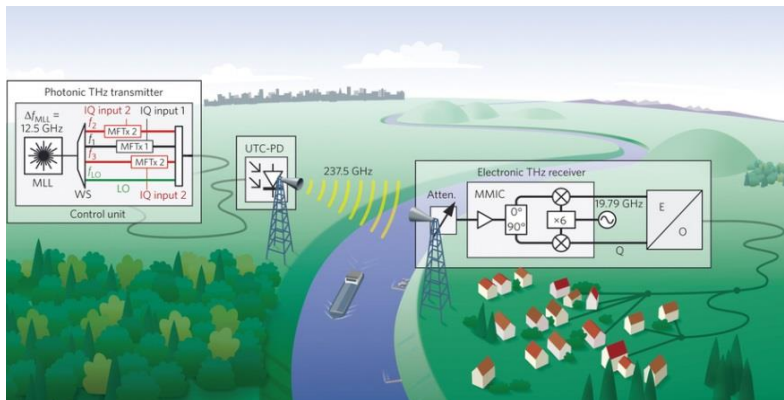


Abbildung 10: Schema eines drahtlosen Kommunikationssystems. Die prinzipielle Machbarkeit wurde in einem wegweisenden Experiment am IPQ unter Beweis gestellt, in dem Rekord-Datenraten von 100 Gbit/s bei einer Trägerfrequenz von 237,5 GHz übertragen wurden. Dazu werden photonische und elektronische Signalverarbeitungsverfahren miteinander kombiniert.

⁶ Koenig, S. et. al., Wireless sub-THz communication system with high data rate, *Nature Photonics* 7, 977 – 981, 2013

Lehrfächer in der Vertiefungsrichtung 12: Photonics

Pflichtfächer – Grundlagen der Vertiefungsrichtung

Optical Networks and Systems: Die Lehrveranstaltung behandelt optische Netzwerke und Systeme aus einem breiten Anwendungsspektrum. Dabei wird die Rolle der einzelnen Netzwerkschichten (insbesondere der Schichten 1 und 2) in verschiedenen Netzwerksegmenten beleuchtet. Dies umfasst eine Übersicht über relevante Standards und Protokolle sowie wesentliche Eigenschaften und Spezifikationen optischer Komponenten.

Communications Engineering II / Nachrichtentechnik II: In dieser Vorlesung werden die Inhalte und Fragestellungen der Vorlesung Nachrichtentechnik I vertieft. Schwerpunkt bildet die Behandlung verschiedener Kanalschätzungs-, Entzerrer- sowie Synchronisationsverfahren. Zusätzlich werden Protokolle der MAC-Schicht des OSI-Modells thematisiert.

Radio-Frequency Electronics: In dieser Vorlesung werden Theorie und Entwurfsmethoden von modernen elektronischen Schaltungen durch Anwendung von numerischen Entwurfsprogrammen vermittelt. Studierende werden in die Lage versetzt, ihre eigenen Verstärker zu entwerfen, aufzubauen und zu charakterisieren

Pflichtfächer – Vertiefungsrichtung:

Digital Signal Processing in Optical Communications (with Practical Exercises): In Vorlesungen wird es zunächst eine Einführung in den Aufbau von digitalen kohärenten Sendern und Empfängern geben. Darauf aufbauend werden wesentliche Funktionsblöcke wie z.B. die Dispersionskompensation, die adaptive Entzerrung von Polarisationsmodendispersion sowie Träger- und Taktrückgewinnung diskutiert. In den Übungen sollen diese Funktionsblöcke in Software (Matlab, Octave) implementiert werden.

Optical Waveguides and Fibers: Zwei Grundkomponenten optischer Kommunikationssysteme werden behandelt, optische Wellenleiter und Sender. Nach den Grundlagen zur Wellenführung werden Physik und Anwendungen optischer Wellenleiter und Fasern erläutert.

Nonlinear Optics: Im Rahmen des Moduls werden die folgenden Themenbereiche behandelt: Die nichtlineare optische Suszeptibilität; Wellenausbreitung in nichtlinearen anisotropen Werkstoffen; Nichtlineare Effekte und Bauteile zweiter sowie drit-

ter Ordnung; Der nichtlineare Brechungsindex und Kerr-Effekt, Selbst- und Kreuzphasenmodulation, Vierwellenmischen, Selbstfokussierung, Frequenzverdreifachung (Third Harmonic Generation; THG), Nichtlineare Effekte in aktiven optischen Bauteilen.

Optical Transmitters and Receivers: Im Rahmen der Vorlesung werden folgende Schwerpunkte behandelt: Optische Kommunikationskonzepte, Sender, Lichtquellen, Modulatoren, Optische Verstärker, Empfänger, Pin-Photodioden, Rauschen, Detektionsfehler.

Electromagnetics and Numerical Calculation of Fields: Die Vorlesung beginnt mit einer umfassenden Wiederholung der Maxwell-Gleichungen und anderer wichtiger Zusammenhänge der elektromagnetischen Feldtheorie. Im zweiten Teil werden die wichtigsten Methoden der numerischen Feldtheorie vorgestellt und anhand ausgewählter Beispiele vertieft.

Communication Systems and Protocols: In der Vorlesung werden die physikalischen und technischen Grundlagen zum Design und Aufbau von Kommunikationssystemen vorgestellt. Darauf aufbauend werden Verfahren, Methoden und technische Umsetzungen zur Kommunikation zwischen elektronischen Geräten erarbeitet. Anhand ausgewählter Praxisbeispiele wird die Anwendung der Vorlesungsinhalte in realen Systemen demonstriert.

Mikrowellentechnik / Microwave Engineering: Schwerpunkt der Vorlesung ist die Vermittlung der Funktionsweise der wichtigsten passiven Mikrowellenkomponenten angefangen bei Hohlleitern über Filter, Resonatoren, Leistungsteiler und Koppler bis hin zu Richtungsleitungen und Zirkulatoren.

Photonics and Communications Lab: Das Praktikum bietet den Studenten einen Einblick in die wissenschaftliche Arbeit im Labor. Die Charakterisierung von Laserdioden, Photodetektoren und Resonatoren bilden einen Schwerpunkt des Praktikums. Außerdem erlernen die Teilnehmer den Umgang mit optischen Fasern und die Funktionsweise von optischer Kohärenztomographie. Ein Einblick in die digitale Signalverarbeitung sowie die Simulation von optischen Sendern und Empfängern runden das Praktikum ab.

Wahlbereich der Vertiefungsrichtung am IPQ

Field Propagation and Coherence: Heute werden Multimodenfasern zunehmend wichtig als preiswertes Übertragungsmedium. Die Beschreibung der Übertragungs-

eigenschaften von Multimodenfasern, die Wellenausbreitung im homogenen Medium und die Beschreibung sowie Messung der Kohärenzeigenschaften optischer Felder sind Gegenstand dieser Vorlesung.

Einführung in die Quantentheorie für Elektrotechniker (einschl. Übungen und Anwendungen): Einführung in die Theorie inklusive letzter Entwicklungen. Mit Kenntnis der Quantentheorie können die Studierenden Nachrichten- und Informationstechnik in ihren prinzipiellen Grenzen und Möglichkeiten erfassen.

Quanteneffektbauelemente und Halbleitertechnologie: Fundamentale Eigenschaften von Quantenbauelementen, Bandstruktur in Heterostrukturen, Ladungsträger-einschluss in 2-, 1- und 0-dim Strukturen, Quantenfunktionale Verbindungshalbleiter-Bauelemente, 2-dim Feldeffekt-Transistoren, Potentialtopf-, Quantenpunkt- und Quantenkaskadenlaser Infrarot-Detektoren, Halbleitertechnologie Epitaxie, Lithographie, Strukturierung und Abscheidung Zukünftige Trends in der Mikroelektronik Skalierungslimits, Moore's Gesetz, Bauelemente nach Moore. Es wird eine Exkursion an das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik, Freiburg angeboten.

Weitere Wahlfächer können aus den Bereichen der Mobilkommunikation, Hochfrequenztechnik, Nachrichtentechnik, Informationsverarbeitung, optische Technologien, Nanotechnologien kombiniert werden.

Vertiefungsrichtung 12: Photonics

Grundlagen zur Vertiefungsrichtung	SWS	ECTS	Semester	Institut	Dozent
Communications Engineering II / Nachrichtentechnik II	2+1	4	WS/SS	CEL	Dr.-Ing. Holger Jäkel
Radio-Frequency Electronics	2+2	6	WS	IIIT	Prof. Cagri Ulusoy
Optical Networks and Systems (ONS)	2+1	4	WS	IPQ	Prof. Dr.-Ing. Sebastian Randel
Pflichtbereich der Vertiefungsrichtung	SWS	ECTS	Semester	Institut	Dozent
Electromagnetics and Numerical Calculation of Fields	2+1	4	SS	IANA	Dr. Mario Pauli
Communication Systems and Protocols	2+1	5	SS	ITIV	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jürgen Becker
Mikrowellentechnik / Microwave Engineering	2+1	5	WS/SS	IHE	Dr. Mario Pauli
Digital Signal Processing in Optical Communications	2+2	6	SS	IPQ	Prof. Dr.-Ing. Sebastian Randel
Optical Waveguides and Fibers	2+1	4	WS	IPQ	Prof. Dr.-Ing. Christian Koos
Nonlinear Optics	2+2	6	SS	IPQ	Prof. Dr.-Ing. Christian Koos
Optical Transmitters and Receivers	2+2	6	WS	IPQ	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wolfgang Freude
Photonics and Communications Lab	4	6	SS	IPQ	Prof. Dr.-Ing. Christian Koos / Prof. Dr.-Ing. Sebastian Randel