

## Optik und optische Technologien

Berichtersteller:

[Prof. Dr. W. Sandner](#)

1. Die Bedeutung der Optik und der optischen Technologien
2. Anwendungsfelder
3. Neue optische Technologien
4. Ausgangslage in Berlin
5. Die wichtigsten Akteure
6. Referenzen

### 1. Die Bedeutung der Optik und der optischen Technologien

#### 1.1 Definition der Optik

„Optik ist dasjenige Gebiet der Wissenschaft und Ingenieurtechnik, das sich mit den naturwissenschaftlichen Phänomenen und Technologien beschäftigt, die mit der Erzeugung, Übertragung, Manipulation, Detektion und der Nutzung von Licht zusammenhängen.“

#### 1.2 Die neue Optik und optische Technologien im nationalen und internationalen Umfeld

Optik ist einerseits eine Wissenschaft, andererseits seit langem auch ein bedeutender und traditionsreicher Industriezweig in Deutschland. Der Ursprung der deutschen optischen Industrie lag in der Entwicklung und Herstellung hochwertiger abbildender Systeme, wobei auf diesem Gebiet in den vergangenen Jahrzehnten starke internationale Konkurrenz erwachsen ist.

Seit einigen Jahrzehnten haben Optik und optische Technologien weltweit eine neue Bedeutung bekommen, sowohl in der Wissenschaft als auch marktwirtschaftlich. Dies ist wesentlich begründet in der neu erworbenen Fähigkeit, Licht in seinen Kohärenzeigenschaften zu kontrollieren und damit je nach Anwendungsbedarf höchste Intensitäten, hohe Dauerleistungen, große Stabilität, kürzeste Impulse etc. zu erzeugen. Dafür stehen heute vielfältige Lichtquellen zur Verfügung, die auf dem Konzept der Verstärkung durch stimulierte Emission beruhen (Laser).

Basierend auf industriellen Anwendungsgebieten stellen allein die Laser-Lichtquellen zur Zeit jährlich einen Fünf-Milliarden-Dollar-Markt dar, mit deutlich steigender Tendenz (1). An ihm hat Deutschland einen wesentlichen, auf manchen Gebieten sogar führenden Anteil. Der Markt für optische Systeme ist um einen Faktor 2 - 5 größer. Die eigentliche volkswirtschaftliche Bedeutung der Optik und optischen Technologien liegt allerdings in ihrer Eigenschaft als „enabling technology“ (Schlüsseltechnologie) und ist wesentlich, d. h. um Größenordnungen höher als die Marktbedeutung optischer Komponenten und Systeme alleine.

Vor diesem Hintergrund gibt es übereinstimmende Aussagen neuester nationaler und internationaler Studien.

Optik ist eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts, vergleichbar mit der Elektronik im 20. Jahrhundert.

Diese Erkenntnis wird international unterschiedlich umgesetzt. In den USA gibt es Zusammenschlüsse und zusammenfassende Darstellungen von Wissenschafts- und Wirtschaftsunternehmen, die das Forschungspotential der Optik repräsentieren („Coalition for Optics and Photonics“ bzw. „Unified Statement on Research“). Hervorzuheben ist die Studie „[Harnessing Light](#)“, die eine gewisse internationale Vorreiterrolle einnimmt, allerdings im Ursprungsland bisher noch keinen umfassenden Eingang in die nationale Förderpolitik gefunden hat. In Japan wurde das [RIPE](#) Institut als neuartige Kooperationsformen zwischen Wissenschaft, Staat und Industrie gegründet.

In Deutschland wurde das Thema „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ zunächst in einer Reihe von unabhängigen, jedoch zeitlich eng beieinanderliegenden Studien verschiedener Industrie- und Wissenschaftsverbände aufgegriffen. Unter der Koordination des BMBF wird das Thema zur Zeit in einer Reihe von Arbeitstagen (Workshops) weiter aufgearbeitet, die gemeinsam von optischer Industrie und Wissenschaft durchgeführt werden. Zu ausgewählten und relevanten Einzelthemen der optischen Technologien, der Forschung und Ausbildung soll innerhalb eines Jahres eine detaillierte Ergebnisstudie erarbeitet werden. Diese Studie, die „Deutsche Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“, soll im Mai 2000 der Bundesforschungsministerin und damit der Öffentlichkeit übergeben werden.

Ziel dieser Initiativen und Projekte ist es, die bisherigen Errungenschaften in der Laserfertigungstechnik, Lasermedizin, Messtechnik, optischen Kommunikation etc. nicht mehr isoliert im Kontext des Anwendungsfeldes, sondern unter dem Gesichtspunkt einer neuen, einheitlichen Schlüsseltechnologie zu sehen. Als Mindestergebnis ist zu erwarten, dass sich neue Erkenntnisse aus der vergleichenden Betrachtung und aus Synergien der bisherigen Anwendungsfelder ergeben. Die zugrundeliegende Erkenntnis ist, dass das Licht selbst zu einem universellen Werkzeug geworden ist, soll letztlich aber auch dazu führen, dass die optischen Technologien mit neuen, noch größeren Herausforderungen bedacht werden.

### **1.3 Gliederung des Gebiets Optik**

#### **1.3.1 Problem- und anwendungsorientierte Themenfelder**

Hierzu gehören u. a. Optische Technologien in der Informations- und Kommunikationstechnologie, Optische Technologien in der Medizin und Biowissenschaften, Optik in den Beleuchtungs- und Verkehrstechnologien und Optische Technologien in der Fertigungstechnik (Mikro- und Makrostrukturierung).

#### **1.3.2 Querschnittsthemenfelder**

Hierzu gehören Optik-Forschung mit den Unterthemen Erzeugung von Licht, Übertragung von Licht/Speichern mit Licht, Manipulation von Licht und Nutzung von Licht. Weitere Querschnittsthemen innerhalb der Optik sind die optische Messtechnik, die Fertigung optischer Systeme sowie die Ausbildung auf dem Gebiet der Optik.

### **1.4 Optoelektronik**

Optoelektronik ist ein Verbindungsglied zwischen zwei der wichtigsten Schlüsseltechnologien, Optik und Elektronik und eine eigenständige Technologie. Optoelektronik ist in Berlin ein bedeutender Teil der Forschungslandschaft und als Ergebnis des „Interdisziplinären Forschungsverbundes

Optoelektronik“ eigenständig dokumentiert (siehe [„Berliner Katalog Mikrosystemtechnik und Optoelektronik“](#)), weshalb sie hier nicht zusätzlich behandelt wird.

## 2. Anwendungsfelder

Die folgende Darstellung ist eine gekürzte Zusammenfassung der bisher erarbeiteten Ergebnisse in Vorstudien verschiedener Expertenkreise sowie erster, zu veröffentlichender Ergebnisse aus den von Industrie und Wissenschaft gemeinsam veranstalteten Workshops „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ (Dresden, November 1999).

### 2.1 Optische Technologien in der Informations- und Kommunikationstechnologie

Der Stellenwert optischer Technologien in der Informationsübertragung (optische Datennetze) ist bekannt. Die Fasertechnik darf als weitgehend ausgereift gelten; die Dispersionsminimierung erlaubt prinzipiell noch Übertragungsraten um 100 Gbit/sec; daneben wird künftig u. a. auch die Freiraumübertragung, speziell auch in Verbindung mit Satellitenkommunikation, ausgeweitet. Für hohe Datenraten wird Wellenlängenmultiplexing höchster Dichte angestrebt. Hier besteht weiterhin großer Entwicklungsbedarf bei den Laserquellen und den optischen Multiplexern. Schaltbare photonische bzw. optoelektronische Netzwerke, die eine große Zahl von Stationen mit hohen Datenströmen nichtblockierend verbinden, sind derzeit noch nicht realisiert; hier sind umfangreiche Forschungsarbeiten erforderlich.

Etwa 70 - 80% der Hardwareinvestitionen der Informationstechnologie für das Jahr 2000 fließen in die Speichertechnologie. Die optische Speichertechnologie nimmt eine führende Stellung bei den Wechselmedien ein und wird in den Bereich der Harddisk vordringen, wenn diese bei 5 - 7 Gbit/cm das paramagnetische Limit erreicht. Für große Datenmengen werden künftig vorzugsweise optische Speicher benutzt werden. Die Zukunft optischer Speicher liegt in einer Reduktion der verwendeten Lichtwellenlängen, in der nächsten Generation bei 405 nm mit Speicherkapazitäten (DVD) bis 20 Gbyte. Neben der Entwicklung „blauer“ Halbleiterlaser bedarf es umfangreicher Entwicklungsleistungen auf dem Gebiet der Detektoren sowie neuartiger Strahlführungssysteme, einschließlich adaptiver und Nahfeldoptiken.

Schwerpunkte für künftige Entwicklungen in der Informationsausgabe und Visualisierung werden unter anderem gesehen in den Bereichen digitale Belichtung (beispielsweise für Anwendungen in der Medizintechnik, der elektronischen Druckvorbereitung, dem Fotofinishing sowie der Filmbelichtung), digitale Projektion in den Bereichen Videoprojektion, Home-TV und Großdisplays für diverse Zwecke wie digitales Kino, Werbung etc., sowie Head up-Displays und Anzeigen insbesondere im verkehrstechnischen Bereich, basierend sowohl auf projektiven als auch auf digitalen optischen Systemen.

Zur Realisierung sind in der Regel komplexe optische Module mit einer Vielzahl von optischen, elektronischen und mechanischen Komponenten und Einzelfunktionen erforderlich. Dies erfordert die Beherrschung und Verfügbarkeit einer Reihe von optischen und optoelektronischen Schlüsselkomponenten wie Laserquellen (insbesondere auch RGB-Laser), LEDs mit hoher Leuchtdichte in verschiedenen Spektralbereichen, optischer Modulatoren, pixeladressierbarer 1D- und 2D-Lichtventile sowie hochkompakter, multifunktionaler optischer Submodule. Photonische Kristalle für schwellenlose Laser, Polymere für großflächige Oberflächenemitter und Hybrid-materialien (z. B. geschichtete Polymere oder eingebettete Nanokristalle) sind nur einige Beispiele für innovative Ansätze in der modernen Materialentwicklung für Laser und LEDs, ebenso wie „tailored crystals“ in der nicht-linearen Optik.

## 2.2 Optische Technologien in der Medizin und Biowissenschaften

Die Entwicklung von Medikamenten ist zeit- und kostenintensiv, bis zu 12 Jahre Laufzeit bei durchschnittlich DM 520 Millionen Entwicklungskosten. Mit Hilfe optischer Technologien in der Pharmaindustrie werden enorme Produktivitätssprünge erwartet, in Pharmaforschung, Diagnostik und anderen Lifescience-Bereichen. Hier sind optische Technologien die Schlüsseltechnologie in der Target-Identifizierung, im Aufbau biologischer Testsysteme, im primären Screening, bei der ein Produktivitätssprung um den Faktor 1000 in den nächsten 1 - 2 Jahren erreicht werden wird, im sekundären Screening, in der Toxikologie, und in der Klinik.

In der Pathologie und Mikroskopie geht es unter anderem darum, Standardmethoden zu verbessern, ergänzen, sicherer und effizienter zu machen, aus dem histologischen Schnitt zusätzliche, z.B. molekularpathologische Informationen zu gewinnen (ggf. unter Einsatz eines optischen Mikromanipulators), lebende Zellen und ihre Funktionen visuell darzustellen („functional imaging“), oder ein miniaturisiertes, digitalisiertes „okularloses Mikroskop“ zu entwickeln. Eine erweiterte Funktionalität von Mikroskopen sollte insbesondere umfassen: eine hohe zeitliche (Subnanosekunden-) und spektrale (Nanometer-)Auflösung; die Möglichkeit, schnelle zellphysiologische Vorgänge im Submillisekundenbereich on line zu messen; die Integration optischer Mikromanipulatoren (u. a. für die Nanochirurgie), sowie die Integration flexibler und miniaturisierter Komponenten (u. a. Laserdioden, Faserlaser, Femtosekundenlaser).

Im Bereich Diagnostik und Therapie wird optischen Technologien (Biophotonik) in Verbindung mit minimal invasiven Techniken ein wesentliches Potential zugeschrieben, Kosten im Gesundheitswesen zu dämpfen. Hierzu gehören minimalinvasive Endosysteme, Strategien in der molekularen Diagnostik, Phototherapeutische Verfahren mit (sub)-zellulärer Präzision, Bioindikatoren, und Expertensysteme sowie bildgebende Verfahren. In der Gewebediagnostik/PDT werden Optische Technologien für Screening, Functional Imaging, sowie die Wechselwirkung Diagnose-Therapie als besonders wichtig und zukunftsweisend identifiziert: Gerade die Verbindung neuer molekularbiologischer Erkenntnisse mit sensitiven und selektiven optischen und spektroskopischen Nachweismethoden ermöglicht zukünftig den Einsatz neuer Diagnostikverfahren, die transkutan, d. h. nicht invasiv, schnell und in situ durchgeführt werden. Daneben eröffnen sich Perspektiven zum on-line Monitoring von Gewebe- und Blutserumparametern bei Notfallpatienten und Diabetikern.

Bildgebende Verfahren in Verbindung mit Expertensystemen sind ein optisches Querschnittsgebiet innerhalb der Biophotonik. In der Telepathologie ermöglichen sie beschleunigte Prozesse, d. h. Zeiteinsparungen bei Präparation, Transport des Präparats und Befundung. Hierzu müssen 3-D Makro-Bildaufnahme, Einsatz von Objektiven mit farbgetreuer Bildübertragung und einer dimmbaren Beleuchtung bei konstanter Farbtemperatur, Erhöhung der Datenrate bei Übertragung von Bildinformationen durch Nutzung optischer Fasernetzwerke und Reduzierung der Kosten für periphere Systeme der Telepathologie entwickelt werden. In der Diagnostik und Therapie werden z. Zt. eine Reihe von neuen optischen Verfahren entwickelt, die äußerst erfolgreich zur nichtinvasiven Visualisierung und Quantifizierung von Krankheitsverläufen und Therapiemaßnahmen eingesetzt werden können. Photodiffusion, optoakustische Bildgebung, Kurzkohärenz-, Fluoreszenz- und Polarisationsverfahren sind nur einige Beispiele dafür.

## 2.3. Optik und Sensorik in den Beleuchtungs- und Verkehrstechnologien

Effiziente Lichterzeugung, energiesparende Beleuchtung und umweltschonende Erzeugung elektrischer Energie sind vordringliche Ziele einer energiebewussten zukunftsorientierten Gesellschaft. Der hohe Entwicklungsstand der Halbleitertechnologie ermöglicht die Realisierung neuartiger

farbsteuerbarer Lichtquellen und führt zu verbesserten Wirkungsgraden in der photovoltaischen Stromerzeugung. Die Fortschritte im Lichtmanagement machen darüber hinaus eine direkte Nutzung des Sonnenlichts für Beleuchtungszwecke und die Entlastung des Energiehaushalts in Gebäuden und Fahrzeugen zunehmend attraktiv. Als zukunftsweisende Themen sind Leuchtdiodenlichtquellen, hocheffiziente und flexible photovoltaische Energiekonverter sowie energiesparende Beleuchtung zu identifizieren.

Eine zunehmende Querschnittsbedeutung werden Lichtquellen, Optiken und Sensoren für die Verkehrstechnologien bekommen. Der Bereich der Sensorik ist ein sehr wesentlicher Punkt im Bereich der Kfz-Industrie, da zukünftige Lichttechnische Einrichtungen am Fahrzeug adaptiv sein werden. Adaptive Scheinwerferkonzepte ermöglichen z. B. eine Modulierung des Lichtstroms ohne makromechanische Elemente. Für den Aufbau zusätzlicher „Vision Enhancement Systeme“ werden leistungsfähige LEDs für den infraroten- und ultravioletten Spektralbereich gefordert. Generell sind Optiken erforderlich, die trotz den allgemeinen Anforderungen der Automobilindustrie (Temperaturbreich, Kosten und Gewicht), eine hohe Güte und Präzision haben. Für den Bereich der Verkehrs-Signaltechnik ebenso wie für die Innenraumbelichtung werden vermehrt LEDs im sichtbaren Bereich eingesetzt werden.

## **2.4 Optische Technologien in der Fertigungstechnik**

In der Makrobearbeitung werden photonenbasierte Hochleistungsprozesse eingesetzt, deren Prozessgeschwindigkeit und/oder Prozesseffizienz herkömmliche Verfahren um das Doppelte bis über das Zehnfache übertreffen, bei verbesserter Qualität des Bearbeitungsergebnisses sowie reduziertem Energie- und/oder Materialeinsatz. In Deutschland gibt es ca. 10.000 photonenbasierte Hochleistungsfertigungssysteme in der Automobil- und Zulieferindustrie, Werkzeugmaschinenindustrie, Elektro- und Elektronikindustrie, Luftfahrt- und Schienenfahrzeugindustrie sowie anderen Branchen. Das Marktpotential der klassischen Bereiche in der Materialbearbeitung (Schweißen, Schneiden, Oberflächenbehandlung) ist noch längst nicht ausgeschöpft. Hierzu ist es erforderlich, die jeweiligen Prozesse in ihrer Dynamik bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung grundlegend zu verstehen. Dies bedingt ein ganzheitliches Vorgehen, d. h. neben der Laserquelle und der optischen Systemtechnik müssen schwerpunktartig neue Prozesse und ihre Qualifizierung in Angriff genommen werden.

Mikrotechnik: An der Schwelle zum 21. Jahrhundert besteht ein international übergreifender Trend hin zur Miniaturisierung, begleitet von einem Übergang hin zu optisch gestützten Fertigungstechniken und -verfahren. So werden heute z. B. optisch basierte bzw. unterstützte Fertigungswerkzeuge in der Herstellung von elektrischen Feinstleiterstrukturen, in der Biotechnologie, in der Medizintechnik, in der Herstellung von optoelektronischen Komponenten oder im Bereich des Micro-Rapid Prototypings eingesetzt. Schwerpunkt-Themen sind hier Verfahren der Lithographie und Bearbeitungsverfahren zur Mikrostrukturierung. In der Ultrapräzisionsbearbeitung mit Photonen gibt es Anwendungen wie Bohrungen und Kanäle mit Abmessungen im unteren Mikrometer-Bereich, z. B. für Düsen, Membranen, Dosiersysteme oder Verbindungstechniken, Löten oder Schweißen. Darüber hinaus ist eine deutliche Tendenz zur erhöhten Genauigkeitsanforderung beim großflächigen Laserstrukturieren von Laufflächen oder Funktionsflächen zu erkennen. Von doppelter Wichtigkeit (als Sensorik zur notwendigen Prozessautomatisierung und als Metrologie zur Mikrostrukturvermessung) ist im Bereich der Mikrotechnik die Messtechnik. Allen diesen Anwendungsmöglichkeiten ist gemeinsam, dass die Entwicklung auf neue Produkte mit erhöhter Formhaltigkeit und Lebensdauer sowie auf die Bereitstellung geeigneter Ultrapräzisionsanlagen mit integrierter, angepasster Messtechnik abzielt.

Unter photonenbasierten chemischen Prozessen (PCP) sind Vorgänge zu verstehen, bei denen durch Licht einer Wellenlänge photolytisch oder photothermisch Reaktionen gezielt angeregt werden, welche zu Materialien oder Komponenten mit neuen Eigenschaften (physikalische, chemische oder biologische) oder zur Reinigung von flüssigen und gasförmigen Medien führen. Hier handelt es sich um Zukunftstechnologien: Der grundlegende Kenntnisstand über PCP's ist aus der Sicht der Chemie relativ weit vorangeschritten, allerdings fehlen Lösungsansätze, die auf die unmittelbaren industriellen Anforderungen abgestimmt sind.

## **2.5 Optische Messtechnik**

Die optische Messtechnik ist eine Querschnittstechnologie, die eine breite Anwendung der Optik und anderer Technologien in Industrie und Wissenschaft erst möglich macht. Dabei sind ähnliche Messverfahren in verschiedenen Anwendungsbereichen einzusetzen: Optische Methoden werden vermehrt zur berührungslosen Abstands-, Weg-, Geschwindigkeits-, Form- oder Oberflächenmessung direkt oder im System eingesetzt. Umwelt-Messtechnik wird zukünftig verstärkt mit optischen Verfahren durchgeführt. Optische Methoden und Sensoren sind sehr genau und berührungslos arbeitend, reagieren aber zur Zeit noch sehr empfindlich auf Umwelteinflüsse, was die Einsatzmöglichkeiten begrenzt. Oberflächenverunreinigungen, Schwingungen, aber auch Speckles bedingt durch die Mikrorauheiten der Oberfläche begrenzen den Einsatz optischer Sensoren und Messtechniken. Hier bedarf es zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, um z. B. die Robustheit der Verfahren zu erhöhen oder die Vorverarbeitung optischer Systeme für die digitale Informationsverarbeitung zu ermöglichen.

Jede neue Dimension in der Fertigung erfordert neuartige und adäquate Messtechnik zur Verifizierung und Qualitätssicherung. Die Entwicklung der Ultrapräzisionstechnik mit Strukturen im Sub-Mikrometerbereich und Oberflächenrauheiten im Nanometerbereich verlangt beispielsweise Sub-Wellenlängen-Mikroskopie, optisch kontrollierte Funktions-Spannwerkzeuge oder aktive Oberflächenmesstechnik. Die Aufnahmebedingungen für Hologramme von Hochgeschwindigkeitsvorgängen in der Werkstoffforschung erfordern Belichtungszeiten im oberen Femtosekundenbereich bis hin zu Picosekunden. Die Raumselektive Holografie ist eine Methode zur Selektion von definierten Raumbereichen und ihrer Abbildung; damit ließen sich vergleichbar zum zeitlichen Digitalisieren eines Signals auch räumliche Szenen quasi in Scheiben erfassen.

Die hochgenaue optische Messtechnik erfordert auch eine Weiterentwicklung zur Miniaturisierung und Integration. Dabei sind auch die Kalibrierung und Kalibrierverfahren von zunehmender Bedeutung.

## **3. Neue optische Technologien**

### **3.1 Femtosekundentechnologie**

Unter dem Begriff „Femtosekunden-Technologie“ (FST) werden ultraschnelle Phänomene im Femtosekundenbereich und deren Anwendung verstanden. Wesentliches Instrument sind Ultrakurzimpuls-Laser mit Pulsdauern von etwa 10 fs bis 10 ps (1fs = 10E-15 Sekunden; 1ps = 10E-12 Sekunden). In Deutschland ist ein fundiertes, durch öffentliche Mittel gefördertes FST-Grundlagenwissen vorhanden. Eine im Auftrag des BMBF erstellte Technologieanalyse „Femtosekunden-Technologie“ bildet eine Ausgangsbasis sowohl für eine wissenschaftliche und technologische Standortbestimmung als auch für Handlungsstrategien, d.h. gezielte BMBF-Forschungs- und Entwicklungsförderung in Richtung einer wirtschaftlichen Umsetzung als neue optische Technologie. Hierbei steht

die Verbesserung von gepulsten Lasern ( $< 10$  ps) und die Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten derartiger Strahlquellen sowie die Konzeption von industriell nutzbaren Verfahren bis hin zu ihrer technischen Umsetzbarkeit, ggf. mit ersten Funktionsmustern im Vordergrund.

Aktuelle thematische Schwerpunkte sind neue Femtosekunden-Strahlquellen und deren Anwendung. Von besonderer Bedeutung sind neuartige Konzepte zur Verstärkung von Femtosekunden-Laserpulsen für Systeme mit hoher mittlerer Leistung, bzw. kompakte, handhabbare und industriellen Maßstäben genügende Strahlquellen. Ebenso sind hier neue Verfahren und Konzepte zur Frequenzkonversion (Erweiterung des Spektralbereichs, siehe unten) vonnöten. Bezüglich der Anwendungen sind insbesondere Konzepte zu identifizieren, für die ein bedeutendes Nachfrage- und Marktpotential nachgewiesen werden kann oder zu erwarten ist, z. B. in der Informations- und Kommunikationstechnologie, Messtechnik, Prozess- und Umwelttechnik, in der Biochemie und Biotechnologie sowie in der Medizin und Chemie.

### **3.2 VUV- und Röntgentechnologien**

Der Erfolg optischer Technologien gründet sich weitgehend auf die Fähigkeit, Licht durch neuartige Lichtquellen (Laser) in seinen Kohärenzeigenschaften zu kontrollieren. Derartige Lichtquellen existieren hauptsächlich im Spektralbereich des sichtbaren Lichts oder dem unmittelbar angrenzenden Bereich (nahes Infrarot oder nahes Ultraviolett UV), jedoch nicht oder nur sehr beschränkt im Bereich kurzer Wellenlängen, d.h. zwischen dem Vakuum- Ultravioletten (VUV,  $l < 200$  nm) und dem darunter anschließenden Bereich weicher Röntgenstrahlung ( $0,1$  nm  $< l < 10$  nm).

Die Eigenschaften kurzweiliger Strahlung sind andererseits für die Material- und Strukturuntersuchungen nicht transparenter Körper und kleinster Dimensionen, Materialbearbeitung im Mikro- und Nano-Bereich, Medizin, Biologie und Messtechnik, möglicherweise auch in der Informationsübertragung, -verarbeitung und -speicherung von besonderer Bedeutung. Viele dieser potentiellen Anwendungen verlangen - analog zu den Anwendungen im sichtbaren Bereich - kompakte Quellen kohärenter kurzweiliger Strahlung. Die bestehenden inkohärenten Quellen (Synchrotrons, Röntgenröhren) schränken die Anwendungsbreite wegen fehlender Kohärenz, fehlender Mobilität (Synchrotron) bzw. geringer Leistung und Flexibilität (Röntgenröhre) stark ein. Kommerzielle Laser im VUV-Bereich sind bis auf zwei Ausnahmen (ArF- und F<sub>2</sub> - Excimerlaser) derzeit noch nicht erhältlich. In ähnlicher Weise existieren noch Defizite bei den optischen Komponenten und bei der Charakterisierung kurzweiliger Strahlung, insbesondere im Röntgenbereich.

Diese Situation ist zur Zeit weltweit im Umbruch begriffen. Dafür gibt es folgende Gründe:

1. Die Entwicklung von Quellen und Komponenten ist von der Lithographie (Halbleiterherstellung) beherrscht, andere Marktsegmente hinken vom Umfang und der zeitlichen Roadmap hinterher. Die gesamte Lithographie-Wertschöpfungskette sprengt von ihrer wirtschaftlichen Bedeutung nationale Rahmen. Die Industrie benutzt zur Zeit Licht der Wellenlänge 248 nm für die Serienfertigung, die Entwicklung für Komponenten bei 193 nm (VUV-Lithographie) steht kurz vor dem Abschluss. Mit der Entwicklung einer 157 nm Technologie und darunter wird heute begonnen. Komponentenentwicklungen zum EUV (10-15 nm) sind in der Begutachtungsphase.
2. Auf Forschungsebene gibt es eine Reihe neuester Entwicklungen für kompakte VUV- und Röntgenquellen ( $2\text{nm} < \text{Wellenlänge} < 40\text{nm}$ ), die sowohl inkohärentes Licht (Plasmaquellen) als auch kohärentes Licht (Frequenzkonversion sichtbarer Laser, Röntgenlaser) erzeugen. Daneben stehen als neuartige Großanlagen Freie Elektronenlaser im VUV- und Röntgenbereich kurz vor der Inbetriebnahme.

- Bei den VUV- und EUV- Komponenten sind erhebliche Fortschritte bei reflektierender Optik (Multi-Layer Spiegel), diffraktiver Optik und bei der Charakterisierung asphärischer Flächen im nm-Bereich gemacht worden, vielfach getrieben durch die Anforderungen der Lithographie. Aus nationaler Sicht besteht allerdings die Befürchtung, dass gerade auf dem EUV-Gebiet der Anschluss an die internationale Spitzenforschung verloren werden könnte.

## 4. Ausgangslage in Berlin

### 4.1 Anwendungsfelder

Optik ist eine Schlüsseltechnologie oder „enabling technology“, deren Wertschöpfung hauptsächlich darauf beruht, in anderen Technologiefeldern neue Lösungen anzubieten. Diese beruhen auf der Verwendung von Licht als Werkzeug. Am weitesten ist dies in den oben angeführten Technologiefeldern fortgeschritten, die interessanterweise neun der dreizehn Berliner Forschungsschwerpunkte abdecken: 1. Molekulare Medizin/Biotechnologie/Genomforschung, 2. Informations- und Kommunikationstechnik, 3. Verkehrsforschung und -technik, 4. Neue Materialien und Verfahren, 5. Strukturforschung, 7. Mikrosystemtechnik, 8. Produktionstechnik und Maschinenbau, 9. Umweltforschung und 10. Geowissenschaften. Darüberhinaus wird unten gezeigt werden, dass - was für die Zukunftsentwicklung mindestens ebenso wichtig ist - Berlin ganz besondere Stärken auf den künftigen optischen Technologien hat.

Ein Berlin-spezifischer Schwerpunkt liegt auf dem Gebiet „Optische Technologien in der Informations- und Kommunikationstechnologie“, getragen durch verschiedene Universitätsinstitute, eine Reihe großer außeruniversitärer Forschungseinrichtungen sowie durch die enge Vernetzung mit dem Berliner Potential in der Mikrostrukturforschung und Optoelektronik. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf dem Gebiet der „Optischen Technologien im Gesundheitswesen und Biowissenschaften“, wiederum wesentlich getragen durch Universitäten und außeruniversitäre Einrichtungen und vernetzt mit dem Forschungspotential der Berliner Kliniken. Dem gegenüber stehen die Schwerpunkte „Messtechnik und Sensorik“ sowie „Fertigung von optischen Komponenten und Systemen“, die neben einigen bedeutenden Forschungseinrichtungen (DLR, BAM, PTB) zu einem großen Teil von innovativen Firmen, hauptsächlich auf dem WISTA-Gelände in Berlin-Adlershof, getragen werden.

#### Optische Technologien ...

...in der Informations- und Kommunikations-Technologie	...im Gesundheits- Wesen und Bio- Wissenschaften	... in der Beleuch- tung und in Ver- kehrs- Technologien	... in der industri- elen Fertigung	... in der Mess- technik und Sensorik	Fertigung von optischen Kompo- nenten und Systeme- n
Informationstransport Informationsverarbeitung Optische Speicher Displays	Pharmazie Patholo- gie/Mikroskopie Diagnos- tik/Therapie bildgebende Verfahren	Sensoren und Bild- verarbeitungs- Sys- teme Beleuchtung Sensoren und Be- leuchtung im Ver- kehrswesen Energie- Gewinnung mit optischen Me- thoden	Makrotechnik Mikrotechnik Photoneninduzierte chem. Prozesse		
HHI	LMTB	HMI	LMTB	PTB	DLR
DLR	MDC	DLR	Fhl-	BAM	PTB

FBH	FU	TU	BESSY II	FBH	
TU	HU				
MBI	Kliniken				
	MBI				
LOPTEK	MGB	Polytec	Bober	Bestec	LAS
OECA	OptoMed	OSRAM		GAT	Adv. Phot. Systems
Krone	PikoQuant			IOM	Röntec
GMS	Polytec			LLA	GMS
L.O.T.				OPTOSENS	L.O.T.
optec				FISBA	LTB
Polytec				L.O.T Berger	Berger
infineon				Polytec	Polytec
				Bober	SemiLas
				EuroPhoton	Sentech
				Crystal	Halle
					Bestec
					PikoQuant
					Elight
					Halle
					Berliner Glas

## 4.2 Künftige optische Technologien

Auf den Gebieten der Optik-Forschung im engeren Sinne, d. h. auf den Querschnitts-Themenfeldern Erzeugung von Licht, Manipulation von Licht, Übertragung von Licht/Speichern mit Licht sowie Nutzung von Licht hat Berlin mit seinen 3 Universitäten und den unter 5.2 aufgeführten außeruniversitären Einrichtungen ein überdurchschnittliches Potential. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die beiden bedeutendsten Forschungsfelder der Optik, die kurz vor ihrer industriellen Anwendung stehen, in Berlin besonders stark vertreten sind. Es sind dies die Femtosekunden-Technologie und die VUV- und Röntgen-Technologie.

### 4.2.1 Femtosekundentechnologie

Die Erzeugung und Anwendung kurzer und kürzester Lichtimpulse hat lange Tradition in der Berliner Forschungslandschaft; wesentliche Entwicklungen sind hier angestoßen worden. Heute besteht eine Konzentration von Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet in den drei Universitäten und in verschiedenen außeruniversitären Einrichtungen, nicht zuletzt im Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, einem der international größten Institute, das sich ausschließlich mit diesem Thema beschäftigt. Die hervorragende Qualität und enge Vernetzung des Forschungspotentials ist u. a. durch die Einrichtung des Sonderforschungsbereichs [Sfb 450: Analyse und Steuerung ultraschneller photoinduzierter Reaktionen \(FU, HU, MBI der WGL, FHI der MPG\)](#) dokumentiert.

#### **4.2.2 VUV- und Röntgentechnologien**

Berlin und seine unmittelbare Umgebung verfügen über ein im nationalen Maßstab einmaliges Potential auf dem Gebiet der VUV- und Röntgentechnologien. Lediglich Hamburg mit dem Synchrotronlabor HASYLAB, den neuen Entwicklungen zum Freien Elektronenlaser im kurzwelligen Bereich und der geplanten Verlagerung der optischen Universitätsinstitute auf das DESY-Gelände könnte in Zukunft ein ähnliches Potential entwickeln.

Neben BESSY II, einer in diesem Spektralbereich weltweit führenden Synchrotron-Quelle, entwickelt das Berliner Max-Born-Institut neuartige kompakte Kurzpulsquellen für den VUV- und Röntgenbereich und betreibt zusammen mit BESSY II eine Beamline für kombinierte Laser- und Synchrotronstrahlung. Die PTB Berlin ist auf dem Gebiet der Charakterisierung von Quellen, Komponenten und in der Metrologie führend. Bezüglich optischer Komponenten gibt es besonders vielfältige Aktivitäten im Umfeld von BESSY, an denen regionale Forschungsinstitute und Firmen beteiligt sind.

Auf der Seite der Anwendungen besteht durch die „User Facilities“ BESSY II und MBI sowie durch die Bundes- bzw. Großforschungseinrichtungen PTB, BAM, MDC und HMI sowie durch die Berliner Universitäten, Fachhochschulen und Kliniken ein außergewöhnlich großes Potential. Die bisher bekannten Zukunftspläne zur Strukturforschung (BESSY und HMI) und zur Entwicklung eines Freien Elektronenlasers nach Hamburger Vorbild lassen eine künftige beträchtliche Stärkung des Berliner Potentials auf diesem Gebiet erwarten. Wichtige Querverbindungen bestehen auch zur Mikro- und Nanostrukturierung, zum Förderschwerpunkt Nanotechnologie sowie zur Biotechnologie.

#### **4.3 Ausbildung**

Maßnahmen zur Aus- und Weiterbildung sind von immanenter Wichtigkeit für den nachhaltigen Erfolg optischer Technologien. Eine stärkere Durchdringung optischer Technologien - bis in das industrielle Produktionsumfeld - ist nicht zuletzt abhängig vom Aufbau bestehender Lehrpläne. Hierbei besteht sowohl die Notwendigkeit, optisches Wissen über die gesamte Breite der Hochschulausbildung zu vermitteln (Qualifikation der zukünftigen Nutzer) als auch die gezielte Ausbildung entsprechender Spezialisten zu erweitern. Aufbauend auf grundlegenden Lehrkenntnissen ist darüber hinaus eine stärkere Berücksichtigung des Systemgedankens in der Ausbildung anzustreben.

Neben den bestehenden Ausbildungseinrichtungen an den Berliner Universitäten und Fachhochschulen, die z. T. spezialisierte Lehrstühle für Optik (eine Seltenheit im nationalen Umfeld) haben, werden zur Zeit verstärkte Anstrengungen für weiterführende Graduate Schools gemacht. So plant die Humboldt-Universität in Verbindung mit Adlershofer Instituten eine Graduate School auf dem Gebiet der Materialwissenschaften, mit deutlichem Bezug zu optischen Technologien. Die Technische Universität bietet ab Sommersemester 2000 eine Graduierten-Ausbildung über „Optics in Advanced Technologies“ an, ebenfalls in Verbindung mit Adlershofer Instituten. Für die Zukunft nahe Zukunft ist die Entwicklung einer International Graduate School Adlershof geplant. Darüberhinaus gibt es an der Technischen Universität Überlegungen, diese Aktivitäten künftig zu einer Berliner Graduate School zu verschmelzen.

## 5. Die wichtigsten Akteure

### 5.1 Hochschulen und Universitäten

[Technische Universität Berlin, Fachbereich Physik](#)  
[Freie Universität Berlin, Fachbereich Physik](#)  
[Humboldt Universität zu Berlin, Institut für Physik](#)  
[Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin](#)  
[Sfb 450: Analyse und Steuerung ultraschneller photoinduzierter Reaktionen \(FU, HU, MBI der WGL, FHI der MPG\)](#)

### 5.2 Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen

[Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH \(HHI\)](#)

[Institut für Spektrochemie und angewandte Spektroskopie \(ISAS\); Außenstelle Berlin-Adlershof:](#)  
[Labor für Spektroskopische Methoden der Umweltanalytik \(LSMU\)](#)  
[Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik \(FBH\)](#)  
[Institut für Kristallzüchtung \(IKZ\)](#)  
[Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie \(MBI\)](#)  
[Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik \(PDI\)](#)

[Fritz-Haber-Institut](#)  
[der Max-Planck-Gesellschaft](#)  
[Max-Planck-Institut](#)  
[für Plasmaphysik - Bereich Plasmadiagnostik](#)

[Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt \(DLR\), Forschungszentrum Berlin](#)  
[Hahn-Meitner-Institut Berlin \(HMI\)](#)

[Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin \(MDC\)](#)

[Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung](#)

[Physikalisch-Technische Bundesanstalt \(PTB\)](#)

[Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung m.b.H. \(BESSY\)](#)

### 5.3 Unternehmen

#### 5.3.1 In Berlin-Adlershof (WISTA) Innovationszentrum: Photonik, Optik, Optoelektronik und Lasertechnologie

[A.R.T.-Photonics GmbH](#)  
[Advanced Photonic Systems GmbH](#)  
[ATN Automatisierungstechnik Niemeier GmbH](#)  
[BESTEC Laser- und Sensorsysteme GmbH](#)  
[Bober Optosensorik und Messtechnik GbRmbH](#)  
Dr. Ing. Wolfgang ReinickeIngenieurbüro für Optik-Entwicklung  
EuroPhoton mbH für Optische Sensorik

[FISBA OPTIK GmbH](#)

GAT Gamma Analysentechnik GmbH

[GMS Frank Optic Products GmbH](#)

ifg Institut für Gerätebau GmbH

INTAX GmbH

[IOM Innovative Optische Messtechnik GmbH](#)

[L.O.T.-ORIEL GmbH](#)

[Laser- und Medizin-Technologie gGmbH, Berlin](#)

[LLA Umwelttechnische Analytik und Anlagen GmbH](#)

[LTB Lasertechnik Berlin GmbH](#)

MBW & A Dr. J. Bauer

MGB Endoskopische Geräte GmbH Berlin

[optec Gesellschaft für optische Technik mbH](#)

Optikkomponenten & Kristalle Dr. H. Berger

OptoMed Optomedical Systems GmbH

OPTOSENS Optische Spektroskopie und Sensortechnik GmbH

[PikoQuant GmbH](#)

[Polytec GmbH - Physik Instrumente GmbH & Co. KG Büro Berlin](#)

[Quarterwave GmbH](#)

[R÷NTECGesellschaft für Röntgenanalysen-Technik mbH](#)

Röntgenanalytik Apparatebau GmbH

SemiLas Optische Systeme GmbH

[SENTECH Instruments GmbH](#)

### **5.3.2 Unternehmen Berlin (außer Adlershof)**

APE Angewandte Physik und Elektronik GmbH

Bernhard Halle Nachf. GmbH

Berliner Glas KG Herbert Kubatz GmbH & Co.

[CRYSTAL GmbH](#)

Dr. Bruno Lange GmbH

[Infineon Technologies AG](#)

[KRONE AG](#)

LOPTEK Glasfasertechnik GmbH & Co. KG

OECA Optoelektronische Komponenten und Applikations GmbH

## Referenzen

1. Vgl. [„Daten zum Lasermarkt“](#), Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e. V. WLT
  2. WLT - Memorandum:  
[„Optik 21: Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert“](#),
  3. Committee on Optics in Science and Engineering COSE (USA):  
[„Harnessing Light“](#)
  4. Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik e. V. DGaO:  
[„Perspektiven der Optik in Deutschland“](#)
  5. [Positionspapier Industrieverband Feinmechanik und Optik F&O](#)
  6. R&D Institute for Photonics Engineering ([RIPE](#)), Japan
  7. „Dokumentation des Workshops“[VUV-Photonentechnologie](#)“, Göttingen 30.04.1999  
(Veranstalter: Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik e. V.)
- 
- [Prof. Dr. W. Sandner](#)
  - Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie  
Max-Born-Straße 2 a  
12489 Berlin
  - und Fachbereich Physik, Technische Universität Berlin