Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

IDEEN
INNOVATION
WACHSTUM
Die Hightech-Strategie für Deutschland

Photonik Forschung Deutschland

Licht mit Zukunft

HIGHTECH-STRATEGIE

Ideen zünden!

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Photonik, Optische Technologien
11055 Berlin

Bestellungen
schriftlich an den Herausgeber
Postfach 30 02 35
53182 Bonn

oder per
Tel.: 01805 – 262 302
Fax: 01805 – 262 303
(Festnetzpreis 14 ct / min, höchstens 42 ct / min aus Mobilfunknetzen)

E-Mail: books@bmbf.bund.de
Internet: http://www.bmbf.de

Gestaltung
Bartkowiak GmbH & Co. KG, Tönisvorst

Druckerei
Siebel Druck & Grafik, Lindlar

Bonn, Berlin 2011

Bildnachweis
Philips Lumiblade

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Photonik Forschung Deutschland

Licht mit Zukunft

Inhalt

Was ist Photonik? 3

1. Die Ausgangslage – Photonik im Aufbruch 4

2. Die Strategie: Ausrichtung der Photonik-Forschung 8

3. Die Handlungsfelder der Photonik-Forschung 10

3.1 Photonik in Wachstumsmärkten 10

3.1.1 Beleuchtung – Die Zukunft des Lichts 10

3.1.2 Photonik und Energietechnik 12

3.1.3 Biophotonik – Forschen, Vorbeugen und Heilen mit Licht 14

3.1.4 Digitale Optik 17

3.2 Integrierte photonische Systemtechnologie 20

3.2.1 Faseroptik 21

3.2.2 Integrierte photonische Schaltkreise 22

3.3 Photonische Prozessketten 22

3.3.1 Lösungen für die nächste Generation der Produktion 23

3.3.2 Neue optische Messverfahren 25

3.4 Die Basis der Photonik: neue Strahlquellen, Optiken, Materialien 26

3.4.1 Neue Strahlquellen durch Integration und Automatisierung 26

3.4.2 Materialien, Oberflächen, Schichten und Optiken 27

3.4.3 Organische Optoelektronik 28

3.5 Emerging Technologies – Das Frühbeet der Photonik 31

4. Kooperation und Förderverfahren 34

4.1 Projektförderung 34

4.1.1 Partnerschaften für neue Leitmärkte 34

4.1.2 Erschließung neuer Themen 35

4.2 Photonik-Finanzforum 36

4.3 Photonik in Europa 36

4.4 Photonik Campus Deutschland 37

5. Operative Umsetzung des Programms 39

5.1 Laufzeit und Fördermittel 39

5.2 Förderinstrumente und Finanzierung 39

5.3 Verfahren und Förderkriterien 40

5.4 Evaluation und Fortentwicklung des Programms 41

6. Ansprechpartner und Informationen 42

Anhang 43

A.1 Hightech-Strategie der Bundesregierung: Photonik-Förderung aus einem Guss 43

A.2 Photonische Kommunikationsnetze 44

A.3 Lithographie – Photonische Verfahren in der Halbleiterfertigung 44

A.4 FuE-Infrastruktur und Wissenschaftsorganisationen 44

Was ist Photonik?

Photonik ist die technische Beherrschung von Licht in jeder Form. Im Blickpunkt der Photonik stehen Erzeugung, Kontrolle, Messung und vor allem die Nutzung von Licht in nahezu allen gesellschaftlich und ökonomisch wichtigen Gebieten. Der Begriff „Photonik“ reflektiert dabei den Bezug zum Photon, dem Lichtteilchen, so wie der Begriff „Elektronik“ auf das Elektron verweist.

Das Licht besitzt eine Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften:

- Fokussierbarkeit:
  bis auf den millionsten Teil eines Millimeters (Nanometer)
- Lichtgeschwindigkeit:
  die höchste erreichbare Geschwindigkeit im Universum
- Kürzeste Pulse:
  bis zu einem milliardsten Teil einer milliardstel Sekunde (Attosekunde)
- Höchste Leistungen:
  bis zu Milliarden von Megawatt (Petawatt)
- Ungestörte Überlagerungsfähigkeit:
  bis zu Millionen von Megabit pro Sekunde (Terabit pro Sekunde)

Die Schlüsseltechnologie Photonik macht diese Eigenschaften nutzbar. Ausgehend von einer gemeinsamen technologischen Basis verbindet sie so unterschiedliche Bereiche wie Produktionstechnik, Energie- und Beleuchtungstechnik, Medizintechnik, Umwelttechnik, Plasmatechnologie, Informations- und Kommunikationstechnik. Die Beherrschung und Nutzung des Photons ist zu einem der wichtigsten Innovationstreiber für die moderne Gesellschaft und Wirtschaft geworden. Photonik stellt heute einen global umworbenen, hoch dynamischen Weltmarkt mit einem Umsatzvolumen von 250 Milliarden Euro dar.

1. Die Ausgangslage – Photonik im Aufbruch

Die Bedeutung der Photonik-Branche für Deutschland

Die Bundesregierung hat das Ziel, Deutschlands Rolle als eine der wirtschaftsstärksten und innovativsten Nationen auszubauen und so den Wohlstand unserer Gesellschaft in nachhaltiger Weise zu sichern. Die Technologien zur Beherrschung des Lichts, also die Optischen Technologien bzw. im internationalen Sprachgebrauch: die Photonik, sind dafür unverzichtbar. In der Kombination mit anderen Schlüsseltechnologien liefern sie die entscheidenden Impulse für Energieeffizienz in der Produktion, für umweltgerechte Beleuchtung oder für eine bessere medizinische Diagnose. Die Photonik hat sich deshalb zu einer weltweit umworbenen Wachstumsbranche entwickelt. Eine Führungsrolle im Klimaschutz, in Fragen der Mobilität, bei den Technologien für einen modernen Produktionsstandort, in der Informationsgesellschaft oder der Medizintechnik setzen alle die Beherrschung und Nutzung des Photons als Innovationstreiber zwingend voraus.

Durch intensive Forschungsanstrengungen in den letzten beiden Jahrzehnten konnten die Akteure in Deutschland das Tor zur Photonik weit aufstoßen. Deutsche Unternehmen gehören zu den Weltmarktführern in vielen Bereichen der Photonik wie Lasertechnik, Beleuchtung oder Mikroskopie und Bildgebung. Zunehmend formiert sich die Photonik-Branche in Deutschland, tritt in vielen Bereichen geschlossen auf und treibt Innovationen gemeinsam voran. Die Kenndaten der Branche: [1, 2]

- Bewertet man die makroökonomischen Indikatoren, wie die Entwicklung von Beschäftigung, Wertschöpfung, Nachfrage, Investitionen und Technologie, kann die Photonik als Deutschlands führende Zukunftsbranche bezeichnet werden.[3] Für Europa ist die Photonik unter den fünf wichtigsten Schlüsseltechnologien diejenige mit dem größten Wachstumspotenzial.[4]

- Die Photonik passt zu Deutschland: Sie ist wissensintensiv, diversifiziert und ressourcenschonend. 85 Prozent der Photonik-Unternehmen sind mittelständisch. Sie wachsen seit Jahren mit durchschnittlich etwa acht Prozent pro Jahr und gehen gestärkt aus der Finanz- und Wirtschaftskrise in den Jahren 2008/2009 hervor. Sie haben in der Krise in Forschung und Bildung investiert und schaffen seit Jahren einen Zuwachs an Arbeitsplätzen von durchschnittlich vier Prozent p.a. Der Anteil akademisch ausgebildeter Mitarbeiter liegt bei etwa 20 Prozent.

- Deutschlands Anteil am Weltmarkt für Optische Technologien beträgt etwa neun Prozent, in den Leitmärkten Produktionstechnik, Bildverarbeitung und Messtechnik, Medizintechnik und Life Science, Beleuchtungs- und Energietechnik sowie optische Komponenten und Systeme liegt er über 17 Prozent. Einzelne Segmente, wie etwa industrielle Laserquellen mit einem Marktanteil von 40 Prozent oder Lithographieoptiken für die Herstellung von Computerchips mit einem Marktanteil von über 60 Prozent, werden von deutschen Herstellern dominiert. Am europäischen Photonik-Markt haben deutsche Unternehmen einen Anteil von fast 40 Prozent. Fertigungsnahe Optische Technologien steigern als „Enabling Technologies“ die Wettbewerbsfähigkeit großer heimischer Industriebranchen. Die Photonik beeinflusst so auch einen großen Anteil der über sieben Millionen Arbeitsplätze des produzierenden Gewerbes. Damit trägt die Photonik entscheidend zur Standortsicherung bei.

Photonik in der Wissenschafts- und Forschungspolitik

Der Aufstieg der Optischen Technologien – der Photonik – in Deutschland aus einer Nische heraus zu einer der wichtigsten Zukunftsbranchen hat mehrere Gründe. Basis für diesen Erfolg ist die Innovationskraft der Photonik-Branche mit ihren exzellent ausgebildeten Mitarbeitern und mit Investitionen in Forschung und Entwicklung in Höhe von etwa zehn Prozent des Umsatzes.

Aufgrund dieser Forschungsnähe hat die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft eine besondere Bedeutung für die Photonik. Der Ausbau wissenschaftlicher Einrichtungen im Umfeld von Unternehmen ist daher ein weiterer

---

1 Arnold Mayer, Optech Consulting (Hrsg.): Optische Technologien – Wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland, 2010

2 Josef Auer, Deutsche Bank Research (Hrsg.): Licht bei der Arbeit, Frankfurt, 2010

3 Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH (Hrsg.): Deutschlands Zukunftsbranchen – Empirische Bestandsaufnahme und Ableitung eines Rankings, Köln 2009

4 High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies (Hrsg.): Mid-term Working Document, Februar 2011

Baustein für den Erfolg der Photonik in Deutschland. Dazu gehören etwa die vier Zentren bzw. Cluster der Optik, die im Rahmen der Exzellenzinitiative gefördert werden. Institute der Fraunhofer- und Max-Planck-Gesellschaft – wie das 2009 neu gegründete Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts – sowie zahlreiche Einrichtungen und Aktivitäten der Bundesländer sind weitere Elemente. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) fördert neben dem Normalprogramm die optische Physik und die technische Optik in etwa 70 koordinierten Programmen (Sonderforschungsbereiche, Schwerpunktprogramme etc.).

Auf dieser exzellenten Basis konnten im Rahmen der FuE-Projektförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durch das Programm Optische Technologien – Made in Germany [5] in den letzten Jahren wichtige Technologiesprünge gelingen, zahlreiche neue Anwendungsfelder wurden erschlossen. Beispielsweise konnte die Halbleitertechnik für die Photonik einsatzbereit gemacht werden. Sie revolutioniert heute große Volumenmärkte wie die Allgemeinbeleuchtung. Der Laser hat mit einer Vielzahl von Entwicklungen und Anwendungen sein Potenzial zum Universalwerkzeug unter Beweis gestellt. Optische Verfahren haben die Tür zu einem neuen Kapitel in den Lebenswissenschaften aufgeschlagen: der personalisierten, präventiven Medizin. In Leitmärkten wie der Beleuchtung und der Photovoltaik konnten erfolgreich Innovationsallianzen mit vielen neuen Anwendungspartnern umgesetzt werden. Zugleich ist die Photonik auch ein zentrales Instrument der Wissenschaft. Das Beispiel der STED-Mikroskopie [6] zeigt sehr gut, wie eng in der Photonik wissenschaftliche Durchbrüche, deren Umsetzung in eine technologische Spitzenleistung und deren Nutzung als wissenschaftliches Forschungsgerät miteinander wechselwirken. Ähnliches gilt für die Laser-Messtechnik und in jüngster Zeit für kompakte Röntgenlaser. Deshalb erfolgt die Forschungsförderung der Optischen Technologien in Deutschland in enger Vernetzung der beteiligten Partner.

Ein Zwischenaudit hat 2008 die Ausrichtung und die Praxis des BMBF-Programms Optische Technologien – Made in Germany [5] (2002–2011) untersucht. Maßgebliche Vertreter der Wirtschaft und Wissenschaft bewerten dieses Programm als einen wesentlichen Faktor für den Erfolg Deutschlands in der modernen Hochleistungsoptik. [7,8] Dies wird auch eindrucksvoll belegt durch zahlreiche hochrangige Preise und Auszeichnungen in der Folge der Projektförderung:

- Innovationspreis der deutschen Wirtschaft 2005: Leica Microsystems CMS GmbH, Wetzlar
- Deutscher Zukunftspreis des Bundespräsidenten 2006: Prof. Dr. Stefan W. Hell, Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie, Göttingen
- Innovationspreis der deutschen Wirtschaft 2006: Carl Zeiss SMT AG, Oberkochen
- Deutscher Zukunftspreis des Bundespräsidenten 2007: Dr. Klaus Streubel, Dr. Stefan Illek, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg, Dr. Andreas Bräuer, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena
- Innovationspreis der deutschen Wirtschaft 2007: LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH, Dortmund
- Deutscher Nachhaltigkeitspreis – Deutschlands nachhaltigste Produkte 2008: Martin Goetzeler, OSRAM GmbH, München
- Otto-Hahn-Preis 2009: Prof. Dr. Stefan W. Hell, Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie, Göttingen
- Karl Heinz Beckurts-Preis 2010: Dr. Stephan Lutgen, Dr. Adrian Avramescu, Dr. Désirée Queren, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, Regensburg

[5] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hrsg.): Förderprogramm Optische Technologien – Made in Germany, Bonn, 2002

[6] STED: Stimulated Emission Depletion – Bei diesem Mikroskopie-Verfahren werden einzelne Moleküle dadurch erkennbar, dass eine Probe zunächst mit einem Laser zum Leuchten gebracht (Fluoreszenz) und dann mit einem zweiten Laser teilweise „abgeschaltet“ wird. Damit ist es erstmals möglich, ohne Zerstörung lebender Zellen die sogenannte Abbesche Beugungsgrenze bei der Auflösung in der Mikroskopie zu unterschreiten. Das Verfahren wurde 1999 von Stefan Hell experimentell realisiert und 2006 mit dem Deutschen Zukunftspreis ausgezeichnet. Seit 2007 wird es als industrielles Forschungsgerät in Deutschland produziert. Die Auszeichnung mit dem Familie-Hansen-Preis durch die Bayer Science & Education Foundation im Jahr 2011 unterstreicht die Bedeutung dieser Technologie auch für die forschenden Unternehmen in Deutschland.

[7] Josef Auer, Deutsche Bank Research (Hrsg.): Licht bei der Arbeit, Frankfurt, 2010

[8] Initiative Photonik 2020 (Hrsg.): Memorandum Photonik 2020, 2009

- HERMES-Award 2010 – Internationaler Technologiepreis der Hannover Messe: LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen

Das nächste Kapitel beginnt

Wir stehen im Innovationszyklus der Photonik erst am Anfang. Nach Einschätzung von Experten steht die Photonik heute industriell vor einer vergleichbaren Entwicklung wie in den 1960er Jahren die Elektronik mit der Einführung der Halbleiterbauelemente. Jetzt beginnt eine neue Phase, in der die Photonik in immer weitere Anwendungsbereiche vordringt. Beispiele dafür sind:

- In der Beleuchtung kündigt sich ein Paradigmenwechsel an: von den Glüh- und Entladungslampen hin zu Festkörperlichtquellen auf Halbleiterbasis. So ist es gelungen, die Lichtleistung von LEDs (Licht emittierenden Dioden) in nur drei Jahren zu verdreifachen. Dadurch eröffnet sich ein neuer Massenmarkt für die Photonik. Der Anteil der LED im Beleuchtungsmarkt im Jahr 2020 wird mit bis zu 80 Prozent prognostiziert. Bis zu zwei Drittel der Energie für die Beleuchtung lassen sich so einsparen. Damit verbunden ist eine Neuausrichtung des Lichtmarktes.

- Ende 2010 hat die Gestensteuerung von Computern mit einer populären Spielekonsole [9] den Durchbruch zum Massenmarkt erreicht. Es ist absehbar, dass diese Steuerungstechnik in immer mehr Anwendungsbereichen der Informations- und Kommunikationstechnik zum Einsatz kommen wird. Da sie auf photonischen Komponenten und Verfahren basiert (Infrarotlaser und -sensoren, 3D-Optik, digitale Bildverarbeitung), generiert sie zugleich einen Wachstumsmarkt der Photonik.[10]

- Generative Fertigungsverfahren haben 2010 das experimentelle Stadium verlassen. [11] Ein Beispiel ist der Preisträger des Deutschen Zukunftspreises 2011: Es handelt sich um ein pneumatisches Greifwerkzeug, dessen Greifer mittels keramischer Lasersinterung generativ aufgebaut ist. Photonik ist bei der Mehrzahl der generativen Fertigungsverfahren die Schlüsseltechnologie. Damit könnte – neben der Lasermaterialbearbeitung – künftig auch die generative Produktionstechnik ein Wachstumsmarkt für die Photonik werden.[12]

Die Initiative Photonik 2020 bei der Vorstellung des Memorandums Photonik 2020 im Juni 2009 auf der LASER World of PHOTONICS in München, Quelle: VDI Technologiezentrum GmbH / Andi Schmid

- Photonik wird mehr und mehr zum Innovationstreiber für die Smartphone-Industrie.[13] OLED-Displays [14] oder Kameras für Videoaufnahmen in High Definition sind bereits verfügbar. Neue Entwicklungen wie Mini-Beamer oder Linsen-Arrays und Wafer-Level Kameras für 3D-Aufnahmen stehen an der Schwelle zum Massenmarkt. Damit verbunden sind neue Herstellmethoden für die mikrophotonische Integration, die wiederum wesentliche Treiber für die Entwicklung der Photonik insgesamt sein werden.

Ein Kennzeichen solcher Entwicklungen ist es, dass das Wachstum der Photonik künftig stärker auch von diesen Anwendungsmärkten getrieben werden dürfte. Die Branche selbst hatte in den vergangenen Jahren ein jährliches Umsatzwachstum von etwa acht bis zehn Prozent. Nun kommen weitere Anwendungsmärkte hinzu, die eine starke Nachfrage nach photonischen Schlüsselkomponenten und -kompetenzen auslösen.

9 Microsoft Kinect

10 Zur Förderstrategie in diesem Bereich s. Kap. 3.2 Integrierte photonische Systemtechnologie.

11 So titelte etwa am 10.2.2011 die Wirtschaftszeitung The Economist über diese Produktionsverfahren: „The manufacturing technology that will change the world".

12 Zur Förderstrategie in diesem Bereich s. Kap. 3.3 Photonische Prozessketten.

13 Mike Hatcher, optics.org: Optics drives mobile handset innovation, 15.02.2011 (optics.org/indepth/2/2/1)

14 OLED: Organische LED (Leuchtdiode)

Diese Entwicklung hat auch für die Photonik-Forschung Folgen. Dies haben Unternehmen und Institute der Photonik in einem gemeinsamen **Memorandum** Mitte 2009 dargestellt.[8] So müssen Kooperationen mit wichtigen Anwendungsbranchen gestärkt werden, wie dies etwa mit der Anfang 2010 gestarteten Innovationsallianz Photovoltaik geschieht, in der Unternehmen der Photonik verstärkt Partnerschaften mit der Solarindustrie aufbauen.

Richtung und Tempo der Photonik-Forschung müssen auf die neuen Chancen der Photonik in Zukunftsmärkten ausgerichtet werden. Am fünfzigsten Jahrestag der Entdeckung des Lasers, im März 2010, hat die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Prof. Dr. Annette Schavan, das Startsignal für den **Agendaprozess Photonik 2020** gegeben. In diesem Prozess haben, unter der inhaltlichen Federführung des Programmausschusses Optische Technologien, rund 300 Experten und Entscheider aus Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen gemeinsam Strategien und Leitlinien der Forschung und Entwicklung für die nächsten zehn Jahre erarbeitet. Das Ergebnis dieser Arbeit: die **Agenda Photonik 2020**.[15] Sie beschreibt die Chancen der Photonik in den kommenden Dekaden und die Beiträge, die vonnöten sind, um diese Chancen in Deutschland zu nutzen.

Die Agenda Photonik 2020 haben die Sprecher des Programmausschusses Optische Technologien am 24.11.2010 der Bundesministerin für Bildung und Forschung, Prof. Dr. Annette Schavan, überreicht. Die Agenda macht deutlich:

- Photonik ist eine Technologie, die für Deutschland politisch, wirtschaftlich und wissenschaftlich wichtig ist. Sie schafft Lösungen für gesellschaftliche Herausforderungen ebenso wie wirtschaftliche Chancen und anspruchsvolle Beschäftigung und bietet der Wissenschaft neue Forschungsmethoden und -instrumente.

- Deutschland kann auch zukünftig bei der Entwicklung und dem Einsatz der Photonik eine Führungsrolle einnehmen. Deutsche Unternehmen und die deutsche Wissenschaftsszene sind gut aufgestellt und bereit, neue Wachstumsmärkte zu erobern, entsprechende Innovationsstrategien zu entwickeln und diese in Deutschland umzusetzen.

- Die Branche baut dabei auf die gemeinsam erreichten Erfolge und auf die Fortsetzung der bisherigen Zusammenarbeit von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Die Unternehmen ihrerseits sind bereit, in Forschung und Entwicklung zu investieren: bis zu 30 Milliarden Euro in einem Zehnjahreszeitraum.

Übergabe der Agenda Photonik 2020 durch Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger (geschäftsführender Gesellschafter der TRUMPF GmbH + Co. KG) und Prof. Dr. Andreas Tünnermann (Leiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik, Jena) an Bundesministerin Prof. Dr. Annette Schavan im November 2010, Quelle: VDI Technologiezentrum GmbH / Frank Nürnberger

Die Agenda Photonik 2020 enthält Handlungsempfehlungen für Forschung und Entwicklung entlang der Leitmärkte Produktion, Gesundheit, Kommunikation, Beleuchtung und Energie. Aus den Empfehlungen folgen zentrale Aufgaben für Wirtschaft und Verbände, Wissenschaft und Politik. Das BMBF hat im November 2010 Fachwelt und Öffentlichkeit eingeladen, die Diskussion im Internet weiterzuführen. Dazu wurden die Dokumente des Agendaprozesses veröffentlicht und eine Gruppe „Photonik 2020“ auf der Social-Web-Plattform „ResearchGATE“ eingerichtet.[16] Anregungen aus dieser Diskussionsplattform – wie z. B. die Entwicklung einer „open photonics“-Initiative – sind inzwischen in die vorliegende Programmatik eingeflossen.

[15] Der Programmausschuss für das BMBF Förderprogramm Optische Technologien (Hrsg.): Agenda Photonik 2020, 2010

[16] www.researchgate.net/group/PHOTONIK_2020

2. Die Strategie: Ausrichtung der Photonik-Forschung

Ziele

Die Lösung globaler Herausforderungen in den Feldern Gesundheit und Ernährung, Energie und Klimaschutz, Mobilität, Sicherheit und Kommunikation zählt zu den wichtigsten Aufgaben der Hightech-Strategie der Bundesregierung.[17] Innovationen und Leitmärkte sollen Wohlstand und anspruchsvolle Arbeit in Deutschland sichern.

Die Photonik ist dafür eine Schlüsseltechnologie: Die Agenda Photonik 2020 belegt das in der gesamten Breite der wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten. Die Photonik bietet zahlreiche Ansätze zur Lösung drängender gesellschaftlicher Fragen und trägt dazu bei, Zukunftsfelder für eine ressourcenschonende Wirtschaft zu gestalten. Damit verbunden sind neue Herausforderungen:

- Im Life Science-Bereich gilt es, den Paradigmenwechsel von der Behandlung der Symptome hin zur Prävention von Krankheiten zu meistern. Die Biophotonik liefert hierfür wichtige Grundlagen.
- Die Stärke der Photonik bei Analytik und Sensorik muss genutzt werden, um neue Lösungen für die Umwelttechnik zu erschließen.
- Bei Energie und Beleuchtung müssen neue Anwendungen oder gänzlich neue Felder wie die organische Photovoltaik und die organische Elektronik erschlossen werden. LED und OLED müssen zum Leitprodukt für die Beleuchtung werden.
- In der Produktion gilt es, photonische Prozessketten für eine energiesparende und flexible Fertigung nutzen.
- Mittels photonischer Fertigungsverfahren muss die Effizienz von Solarzellen verbessert, die Fertigungskosten müssen gesenkt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Photovoltaik-Industrie zu stärken.
- In der Kommunikation ist die Photonik eine wichtige Basis dafür, die Anforderungen neuer Dienste und steigender Bandbreiten zu bewältigen. Hier gilt es, die technologischen Grundlagen für die Konvergenz von Photonik und Elektronik zu schaffen.

Es ist die Aufgabe des vorliegenden Programms, diese Vielfalt der Möglichkeiten zu strukturieren und zu gewichten, so dass

- die technologische Spitzenstellung Deutschlands auf diesem Gebiet gesichert wird,
- Schnittstellen und Kooperationen mit anderen wichtigen Schlüsseltechnologien aufgebaut werden,
- Leitmärkte erschlossen werden,
- die Rahmenbedingungen für die deutsche Photonik-Branche nachhaltig verbessert werden und
- das Potenzial der Photonik für Forschung und Wissenschaft genutzt wird.

Strategische Leitlinien

Unter dem Primat der vorgenannten Ziele lassen sich die Herausforderungen und Chancen der Photonik in den kommenden Jahren in den folgenden programmatischen Leitlinien bündeln:

- **Photonik in wichtigen Wachstumsmärkten nutzen**
  Die Photonik wird immer stärker zur Schlüsseltechnologie für wichtige neue Wachstumsmärkte (Energieeffizienz, Kommunikation, Gesundheit usw.). Kennzeichnend dabei ist die Entwicklung von Synergien zwischen verschiedenen Technologien. Mit der Innovationsallianz Photovoltaik oder der LED-Leitmarktinitiative hat sich gezeigt, wie aus FuE-Vorhaben in der Photonik übergreifende Innovationsstrategien mit Anwendungspartnern in anderen Branchen werden können. Dies soll mit dem Programm Photonik Forschung Deutschland weiter ausgebaut werden.

[17] www.hightech-strategie.de

- **Integrierte photonische Systemtechnologie aufbauen**
  Die Photonik steht heute an einer Schwelle, die vergleichbar ist mit dem Übergang von der konventionellen Elektronik zur Mikroelektronik in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Künftig werden Halbleiterlichtquellen und optische Halbleiterbauelemente wesentliche Grundbausteine der Photonik sein. Zusammen mit automatisierten Fertigungsverfahren wird die Vision einer „optischen Fabrik" (analog zu den Wafer-Fabs in der Elektronik) in greifbare Nähe rücken. Strategische Partnerschaften von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik sollen genutzt werden, um diesen Wandel von Technologien und Märkten für die deutsche Photonik-Branche erfolgreich zu gestalten.

- **Photonische Prozessketten realisieren**
  Berührungsfreie photonische Verfahren stellen ein strategisches Element beim Aufbau verteilter, digital integrierter Wertschöpfungsketten für die ressourceneffiziente Produktion dar. Hier bietet sich für einen Kernbereich der deutschen Wirtschaft, nämlich für die „Produktion von Produktivität" eine exzellente Möglichkeit, die klassischen technologischen Kompetenzen in Richtung neuer, flexibler, energieeffizienter und verteilter Prozessketten weiterzuentwickeln.

- **Forschen, Vorbeugen und Heilen mit Licht**
  Die Biophotonik ermöglicht es, Lebensprozesse genauer zu untersuchen und Krankheiten grundsätzlich zu erforschen. Das Verständnis zellulärer Prozesse bis hin zur molekularen Ebene von Lebensvorgängen bildet die Basis für den Paradigmenwechsel hin zu einer stärker präventiv orientierten und personalisierten Medizin. Schwerpunkte der Photonik-Forschung sind dabei grundlegende Methoden, die einen Beitrag für neue Ansätze in Diagnose und Therapie beispielsweise bei altersbedingten Erkrankungen, zur Früherkennung sowie zur stärkeren Verknüpfung von in situ-Diagnostik und Therapieverfahren leisten. Im Bereich der Therapie eröffnet die Plasmamedizin innovative Lösungen z. B. in der Dermatologie und der Heilung chronischer Wunden. Darüber hinaus liefern Biophotonik und Plasmatechnologie wichtige Ansätze für neue Verfahren in der Umwelttechnik.

- **Die Basis der Photonik ausbauen: neuartige Strahlquellen, Optiken, Materialien**
  Deutschland muss seine technologischen Kernkompetenzen in der Photonik schützen und gezielt ausbauen. Die ursprünglich rein wissenschaftliche Lasertechnik in Deutschland industriell zu nutzen, war der Startimpuls für die modernen Optischen Technologien in Deutschland. Jetzt gilt es, das Wechselspiel zwischen wissenschaftlicher und angewandter Photonik in Deutschland noch stärker auszubauen, um neue Forschungsgebiete frühzeitig in die Anwendung zu überführen und in dieser Branche auch künftig ein hoch attraktiver Standort zu bleiben.

- **Photonik kommunizieren und vernetzen**
  Forschung und Innovation brauchen den Dialog mit der Gesellschaft. Die Akzeptanz neuer Anwendungen, die Nachfrage nach neuen Produkten und Investitionen am Hightech-Standort Deutschland werden wesentlich von der Wahrnehmung der Chancen der Photonik beeinflusst. Daher ist es ein wichtiger Bestandteil des Programms, über die Photonik zu informieren und die Forschungsanstrengungen hierzu zu erläutern und zu erklären. In besonderer Weise gilt diese Leitlinie für die Kommunikation der Möglichkeiten der Photonik bei der Berufs- und Studienfachwahl.

3. Die Handlungsfelder der Photonik-Forschung

Die folgenden Handlungsfelder sind das Ergebnis des Dialogs zwischen Expertinnen und Experten der Photonik und einer anschließenden Schwerpunktsetzung durch das BMBF. Sie werden mit den in Kapitel 4 beschriebenen Förderinstrumenten aufgegriffen und kontinuierlich in den einzelnen Themengebieten in Abstimmung mit dem Programmausschuss auf ihre Priorität hin bewertet und umgesetzt.

3.1 Photonik in Wachstumsmärkten

Als eine Schlüsseltechnologie für wichtige neue Wachstumsmärkte muss die Photonik neue Partnerschaften organisieren, für neue Anwendungsfelder, zur Entwicklung von Leitmärkten und für die Wachstumsfinanzierung. Die Verbundforschung baut solche Partnerschaften auf und verstärkt diese. Sie verwirklicht damit den Kerngedanken der Hightech-Strategie: Forschungsergebnisse in Deutschland umsetzen. Dies soll künftig auch in anderen Anwendungsbereichen der Photonik weiter ausgebaut werden. Beispiele sind die Biophotonik – das Licht in Diagnose und Therapie, die Bildgebung und -verarbeitung als neue Querschnittstechnologie („digitale Optik“) oder die optische Analytik und Sensorik in der Produktion und der Umwelttechnik.

3.1.1 Beleuchtung – Die Zukunft des Lichts

Halbleiterlichtquellen leiten derzeit eine Revolution der modernen Lichttechnik ein. Sie kombinieren wie keine andere Lichtquelle zuvor die technischen Erfordernisse unserer Zeit: hohe Energieeffizienz, große Farbvielfalt, Stabilität, lange Lebensdauer, Brillanz und neue Designmöglichkeiten.

Knapp 20 Prozent des weltweiten Stromverbrauchs werden für die Beleuchtung eingesetzt. Mit den künftigen LED-Lichtquellen in Kombination mit intelligenten Lichtmanagementsystemen könnten bis zu zwei Drittel dieser Energie eingespart werden. Neben der Forderung nach Energieeffizienz stehen bei der anstehenden Neuausrichtung des Lichtmarktes aber auch die Lichtqualität sowie die biologische und ästhetische Wirkung von Lichtquellen im Vordergrund; LEDs bieten dafür viele Möglichkeiten.

Der Wechsel zum Halbleiterlicht bietet sowohl Chancen als auch Herausforderungen für den deutschen Beleuchtungsmarkt. Halbleiter- und Elektronikhersteller treten in den Markt ein und üben Druck auf die Hersteller traditioneller Lichtquellen und Beleuchtungssysteme aus. Dies erfordert konsequentes Handeln in Forschung und Entwicklung. Die folgenden Themenfelder sind zu adressieren:

WM-Stadion in Durban mit LED-Lichtbogen, Quelle: OSRAM GmbH

Applikationseffizienz und Systemkosten; das Gesamtsystem optimieren – Um eine breite Marktdurchdringung zu erreichen, müssen sowohl die LED selbst, als auch alle Systemkomponenten (LED, Optik, Elektronik, Kühlung, Gehäuse) im Hinblick auf das Gesamtsystem verbessert werden.

- Halbleiter-, Chip- und Package-Technologien: Lichtausbeute und Helligkeit müssen gesteigert werden. Ziele für 2020 sind kaltweiße LEDs mit einer Effizienz von 240 Lumen pro Watt und warmweiße LEDs, wobei auch Multichip-Gehäuse einbezogen werden, mit 230 Lumen pro Watt. Die Effizienz blauer LEDs muss auf mindestens 90 Prozent gesteigert werden durch Erhöhung der internen Quanten- sowie der Auskoppeleffizienz. Um ausreichende Lichtströme zu erreichen, werden kompakte Multichip-Gehäuse benötigt. Neue Lösungen für die Chip-nahe Farbhomogenisierung sind erforderlich. Die konventionelle Aufbau- und Verbindungstechnik stößt an Grenzen und neue Ansätze müssen erforscht werden, wie z. B. der Ersatz konventioneller Löttechniken durch Sintertechniken. Um die Nachteile elektronischer Vorschaltgeräte zu umgehen, müssen innovative Ansätze für Hochvolt-LEDs und Hochvolt-Multichip-Gehäuse erforscht werden.

- Systemkomponenten und Gesamtsystem: Die Effizienz des Gesamtsystems von LED-Lösungen ist gegenüber den einzelnen LED-Komponenten heute relativ gering. Es treten hohe Verluste in den elektronischen Treibern auf, die zudem in der Regel mit den hohen Lebensdauern der LEDs nicht mithalten können. Zusammen mit thermischen und optischen Verlusten senken sie die Gesamteffizienz des Systems auf etwa die Hälfte der Komponenteneffizienz. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf. Für LED-Lampen und -Leuchten müssen sowohl die einzelnen Komponenten – Elektronik, Sensorik, Optik und Kühlung – als auch das Gesamtsystem optimiert werden. Neuartigen Kühlsystemen fällt eine besondere Bedeutung zu.

Die Kosten der LED-Fertigung müssen bis 2020 um den Faktor zehn reduziert werden, damit diese Technologie im Markt breit akzeptiert wird. Hieraus ergeben sich Herausforderungen für die Materialforschung (Halbleiter, Gehäuse, Optik) sowie die Prozess- und Anlagentechnik (höherer Automatisierungsgrad und Flächenskalierung in der Fertigung). Zudem sind standardisierte Light Engines zu adressieren, die definierte mechanische, thermische und optische Schnittstellen aufweisen. Im Bereich der Leuchten muss das mechanische Design durch Integration aller Einzelkomponenten unter Berücksichtigung von Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Kostenminimierung verbessert werden.

LED-Lichtlösungen; die spezifischen Möglichkeiten der LED nutzen – Die Beleuchtung von morgen wird nicht durch einzelne Lampen bestimmt. Zu entwickeln sind intelligente Lichtmanagementsysteme, die eine hohe Funktionalität bieten und die Energieeffizienz optimieren. Hierzu müssen die spezifischen Eigenschaften des Halbleiterlichts genutzt werden, d. h. seine Flexibilität hinsichtlich elektrischer Steuerbarkeit von Helligkeit, Lichtfarbe und Lichtrichtung. Dabei stehen zwei Herausforderungen im Mittelpunkt: Zum einen ist die Vernetzung von Lichtpunkten und Beleuchtungsanlagen mit dem Betreiber bzw. Anwender notwendig (automatisierte Steuerung des Lichts, selbstkonfigurierende Beleuchtungsinstallationen), zum anderen müssen zunehmend individuelle Bedürfnisse berücksichtigt werden. Neue Funktionalitäten können zudem durch die Zusammenführung von Kommunikation und Beleuchtung erschlossen werden (digitale Informationsübertragung durch die Beleuchtung).

FuE-Arbeiten sollen u. a. auf die Integration von Sensoren und entsprechenden Ansteuermöglichkeiten in die Lichtquelle selbst oder in die Leuchte zielen. Der Sensorik fällt hierbei eine Schlüsselrolle zu, da Farbe, Helligkeit, Wärme und Alterung überwacht werden müssen. Erforderliche Arbeiten umfassen zudem standardisierte Schnittstellen, Protokolle und Bedienoberflächen. Hier ist neben der Photonik auch der Förderschwerpunkt Elektroniksysteme des BMBF betroffen.

„Gutes“ Licht; Wirkung und Möglichkeiten erforschen und ins Bewusstsein bringen – Für Halbleiterlichtquellen ist der heute definierte Farbwiedergabeindex CRI (Color Rendering Index) nicht ausreichend, um die Güte der Farbwiedergabe festzulegen. Vielmehr muss grundlegend erforscht werden, welches Spektrum vom Verbraucher abhängig von der Applikation bevorzugt wird. Hier ist ein Vergleich der Qualität verfügbarer Lichtquellen einschließlich Plasmalichtquellen und Energiesparlampen erforderlich. Die physiologische Wirkung des Lichtes muss besser verstanden werden, um das künstliche Licht in seiner spektralen Verteilung, Intensität und Leuchtdichteverteilung den Bedürfnissen des Menschen bestmöglich anzupassen. Auch lichttherapeutische Anwendungen gewinnen an Bedeutung, setzen aber die detaillierte Kenntnis der biologischen Lichtwirkungen voraus.

Bis auf den Einfluss auf den Melatoninhaushalt und auf den circadianen Rhythmus sind die physiologischen Wirkungen des Lichtes bislang nicht systematisch untersucht. Zur Bestimmung der Auswirkung von Licht auf die Lebensqualität müssen daher Langzeitstudien in verschiedenen Bereichen durchgeführt werden, wie z. B. in der Arbeitsumgebung, im Wohnbereich und in der Altenpflege.

FuE-Arbeiten sollen darauf zielen, die Lichtqualität der Halbleiterlichtquellen zu erforschen, neue Qualitätsstandards zu definieren und das Potenzial physiologisch wirksamer Beleuchtung zu erschließen.

Mit dem Wechsel zum Halbleiterlicht wird sich der Beleuchtungsmarkt grundlegend verändern. Daher sind, flankierend zur Verbundforschung, Maßnahmen erforderlich, um Innovationsbarrieren zu beseitigen und dem Verbraucher und Kunden herstellerneutrale Informationen zu Leistungsparametern und Möglichkeiten von LED-Lösungen zur Verfügung zu stellen. Hierzu hat das BMBF die LED-Leitmarktinitiative gestartet. Wichtiger Bestandteil dieser Initiative sind u. a. Demonstrationsprojekte für einen schnellen Technologietransfer wie der Wettbewerb „Kommunen in neuem Licht“. Basierend auf der wissenschaftlichen Begleitung und Auswertung sollen künftig neue Impulse abgeleitet und umgesetzt werden.

3.1.2 Photonik und Energietechnik

Photovoltaik

Bei den erneuerbaren Energien besitzt Deutschland eine starke Position in der Photovoltaik (PV). Der weltweite Marktanteil deutscher Unternehmen liegt im Durchschnitt aller Wertschöpfungsstufen bei ca. 20 Prozent, der deutsche Solar-Maschinenbau hat Marktanteile bis über 50 Prozent. Künftig gilt es, diesen Weltmarktanteil gegen die wachsende internationale Konkurrenz zu behaupten. Dafür muss die Effizienz von Solarzellen gesteigert werden und die Fertigungskosten müssen sinken. Die Photonik wird hier wichtige Beiträge leisten.

Der Sonne nachgeführte Photovoltaikmodule, Quelle: Soitec Solar GmbH

Um die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Photovoltaik-Industrie langfristig zu sichern und auszubauen, muss die vertikale Kooperation innerhalb der Prozessketten vorangetrieben werden. Deshalb bildet die FuE-Kooperation der Photovoltaik-Hersteller mit Anlagenbauern und Ausrüstern, vor allem aus den Bereichen Lasertechnik, (Plasma-) Beschichtungstechnologien und Handhabungstechnik, einen Schwerpunkt der in 2010 gestarteten Innovationsallianz Photovoltaik. Dieser Weg wird konsequent fortgesetzt werden.

Deshalb sind umfangreiche Forschungsarbeiten zu photonischen Materialien und Verfahrensschritten durchzuführen. Diese sollen insbesondere die nötigen Kostenreduktionen ermöglichen, damit Photovoltaik einen substanziellen Beitrag zur Energiebereitstellung in Deutschland, aber auch weltweit leisten kann. Dazu sind in den einzelnen Technologiefeldern folgende FuE-Aufgaben im Rahmen der Photonik-Forschung zu lösen:

PV-Module auf der Basis kristallinen Siliziums – Mit ca. 80 Prozent Marktanteil in 2009 sind Module mit kristallinen Si-Solarzellen (c-Si) gegenwärtig die führende PV-Technologie. Kommerzielle monokristalline Zellen erreichen Wirkungsgrade bis ca. 20 Prozent. Vorrangige FuE-Aufgaben in der Photonik betreffen hier die bessere Anpassung der Prozessschritte an Ausgangsmaterial verschiedener Qualitäten, die Erhöhung des Automatisierungsgrades und die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren mithilfe von Laser- und Plasmaprozessen.

Dünnschicht-PV-Module – Die Vorteile dieser Technologie liegen in der materialeffizienten, großflächigen Schichtabscheidung, der integrierten Modulfertigung sowie in geringem Materialverbrauch durch Schichten von wenigen Mikrometern Stärke. Nachteile sind die noch zu geringen Wirkungsgrade (zwischen acht und 13 Prozent) und die z. T. zu hohen Fertigungskosten. FuE-Aufgaben der Photonik zielen hier auf die Erhöhung des Wirkungsgrades und die Reduktion der Herstellungskosten von Dünnschicht-PV-Modulen.

Hocheffiziente Mehrfach-Solarzellen für die Konzentrator-PV (CPV) – Solarzellen mit mehreren Übergängen zwischen Bereichen unterschiedlicher Dotierung (p-n-Übergänge), die das Sonnenlicht besser ausnutzen, basieren derzeit hauptsächlich auf III / V-Halbleitern. Sie finden Verwendung in

Konzentrator-Systemen. Der Vorteil dieser Systeme liegt in ihren hohen Wirkungsgraden und einer größeren Sonnenausbeute, ein Nachteil ist die Notwendigkeit der Nachführung, da nur das direkte Sonnenlicht genutzt werden kann.

FuE-Arbeiten in der Photonik zielen auf neue Materialsysteme und neuartige Zell- und Modulkonzepte für höhere Effizienzen sowie hocheffiziente Bearbeitungsprozesse und Fertigungsverfahren mit dem Ziel einer höheren Produktivität und/oder geringerer Herstellkosten. Photonische Technologien bieten hier zahlreiche Lösungsansätze.

Photonische Materialien umfassen u. a. Quantenpunkt-Schichten für Silizium-Tandemzellen, Materialien für optische Spiegel, Kollektoren, Reflektoren und die Konversion von Photonen sowie Konzentrator-Optiken und Sekundär-Konzentratoren für CPV-Anwendungen. Im Bereich des Photonenmanagements sind u. a. Strukturen zur Entkopplung von Front- und Rückkontakt-Lichtstreuung, photonische Kristalle und plasmonische Strukturen für den Lichteinfang sowie Zwischenreflektoren für Tandem-Solarzellen zu betrachten. Herstellungsprozesse umfassen u. a. die Laser-Kristallisation, großflächige Plasmaverfahren zur Reinigung, zum Ätzen und zur Schichtabscheidung sowie Laserverfahren, die zu einer Steigerung der Produktivität und zur Realisierung neuer Zell- und Moduldesigns beitragen können (z. B. Hochgeschwindigkeitsbohren, ortsselektives Dotieren, selektives Abtragen, laserunterstützte Metallisierung und Texturierung, energieminimiertes Löten für die Modulherstellung).

Die Förderung verfolgt das Ziel, die Zusammenarbeit der Photonik- und Photovoltaik-Industrien zu stärken. Dies soll u. a. durch die Innovationsallianz Photovoltaik erreicht werden. Die Chancen aus dieser Zusammenarbeit sollen aufgriffen, bewertet und für weitere Impulse genutzt werden. Damit wird ein wichtiger Wachstumsmarkt der Photonik adressiert. Zudem trägt dieser Ansatz zu einer effizienteren Nutzung der erneuerbaren Energien bei.

Dezentrale Energiespeicherung und alternative Energieerzeugung

Neben der weiteren Erforschung und Optimierung der direkten Umwandlung von Sonnenstrahlung in Strom ist die effektive Speicherung von Sonnenenergie eine wichtige Herausforderung auch für die Photonik. Dazu gehören etwa die optischen Komponenten zur Fokussierung und Weiterleitung des Lichts in solarthermischen Anlagen und photonische Fertigungsverfahren für Elektroden, Funktionsschichten sowie für das athermische Trennen und das energieminimierte Fügen von Elektroden und Zellen sowie beim laserbasierten Verkapseln und beim Laserfügen von Batteriepacks.

Auch die Speicherung der Sonnenenergie mittels Wasserstoff, Methan, Biogas oder anderer Stoffe sowie die Energiegewinnung und Energiespeicherung auf der Grundlage der Photosynthese stellen Herausforderungen für die photonische Forschung dar. Erste Konzepte zur Erzeugung der Brennmaterialien basieren vor allem auf photokatalytischen oder photosynthetischen Verfahren. Hier können Wirkungsgradsteigerungen durch die Implementierung photonischer Konzepte erreicht werden. Erforderliche FuE-Arbeiten umfassen u. a. Materialentwicklungen und Skalierungskonzepte. Die Photonik kann z. B. durch laserspektroskopische Methoden zur Untersuchung der Ladungstransport-Dynamiken in Photokatalysatoren oder durch Übergangsmetallkomplexe mit photoaktiven und katalytisch aktiven Zentren für künstliche Lichtsammeleinheiten zur Gewinnung molekularen Wasserstoffs beitragen.

Die Photonik bietet zahlreiche Lösungsansätze für die Speicherung von Energie und die Gewinnung von regenerativ erzeugten Brennstoffen wie Wasserstoff oder Methan. Diese Arbeiten besitzen zum Teil Grundlagencharakter. Soweit ihre Machbarkeit erfolgreich demonstriert werden kann, werden anschließend gemeinsame FuE-Strategien mit den Anwendern in der Energietechnik nach dem Vorbild der o. g. FuE-Förderung zur Photovoltaik angestrebt.

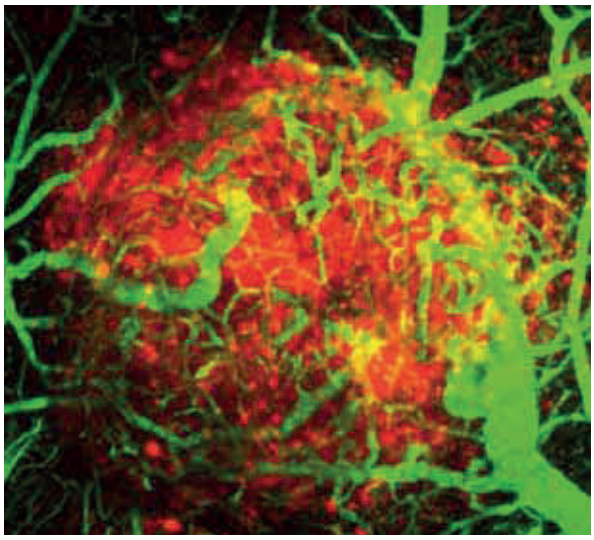
3.1.3 Biophotonik – Forschen, Vorbeugen und Heilen mit Licht

Die Photonik ist heute ein unverzichtbarer Bestandteil von Medizintechnik, Umwelttechnologie und Analytik. Damit verbunden ist ein junger, wachsender Markt, in dem Deutschland gut aufgestellt ist. Hier ergeben sich neue Herausforderungen: Im Life Science-Bereich gilt es, den Paradigmenwechsel von der Behandlung der Symptome hin zur Prävention von Krankheiten zu meistern. Regenerative medizinische Ansätze verlangen neue Verfahren für die Beobachtung und Manipulation lebender Zellen und deren Strukturen bis auf die molekulare Ebene. In-vivo-Verfahren sind der nächste Schritt – die Biophotonik ist ein wichtiger Pfeiler für eine künftige „personalisierte“ Medizin.

Die Photonik-Forschung legt dabei den Fokus auf grundlegende optische Funktionsprinzipien und innovative optische Verfahren für Prävention, Diagnostik und Therapie. Die Entwicklung innovativer Medizinprodukte wird technologieübergreifend im Rahmenprogramm Gesundheitsforschung[18] unterstützt. Dabei kommt der schnelleren Umsetzung von Ideen in ein medizintechnisches Produkt in Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen, Unternehmen sowie klinischen Anwendern und der klinischen Evaluierung der neuartigen Produkte, u. a. in klinischen Pilotstudien, eine große Bedeutung zu. Insofern leistet die biophotonische Forschung wichtige Beiträge, um die Innovationspipeline für die Gesundheitswirtschaft zu speisen.

Zur Unterstützung von Unternehmensgründungen, die aus dem Bereich der Biophotonik-Forschung resultieren, steht die Gründungsoffensive GO-Bio bereit. Einen einfachen Zugang zur Forschungsförderung für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bietet zudem die Förderinitiative KMU-innovativ (BioChance). Um diese Synergien noch besser zu nutzen, wird das BMBF einen engen Austausch zwischen der Förderung in der Medizintechnik, der Bioökonomie und der Photonik etablieren.

[18] www.bmbf.de/de/gesundheitsforschung.php



Molekulare Bildgebung macht Krebstumore im Frühstadium sichtbar. Quelle: Ludwig-Maximilians-Universität München, Zentrum für Neuropathologie, Prof. Dr. J. Herms, Dr. L. von Baumgarten

Bildgebende diagnostische Verfahren

Die Verbindung von Molekularbiologie und optischer Gerätetechnologie ermöglicht neue Verfahren zur Beobachtung und Analyse von Lebensprozessen in Zellen: nahezu ungestört, mit subzellulärer Auflösung, in Echtzeit und dreidimensional. Photonische Verfahren haben das Potenzial zur minimalinvasiven und patientenschonenden bildgebenden Diagnostik für eine Vielzahl von Einsatzgebieten, z. B. in der Onkologie, Ophthalmologie und Dermatologie sowie bei Herz-Kreislauf- und neurodegenerativen Erkrankungen.

Neben der rein strukturell-morphologischen Bildgebung stehen heute auch die körperfunktionsbezogene Bildgebung sowie die molekulare Bildgebung im Fokus des medizinisch-wissenschaftlichen Interesses. Zu den Herausforderungen in Forschung und Entwicklung gehören höchstauflösende optische und dabei physiologisch verträgliche Systeme, die es erlauben, die im Größenbereich von 20 bis 200 Nanometern vorhandenen Ansammlungen von Molekülen, die für die Struktur und Funktion der Zellen relevant sind, in ihrem dreidimensionalen physiologisch relevanten Kontext zu beobachten und zu verstehen. Eine Verknüpfung zellulärer und klinischer Information ist hierbei anzustreben. Um die zunehmende visuelle Informationsvielfalt sicher beherrschen zu können, müssen auch die leistungsfähige Bildverarbeitung, die

Der Augenscan erkennt bereits heute viele Augenerkrankungen – künftig soll er auch helfen, Vorboten von Alzheimer aufzuspüren.
Quelle: Carl Zeiss AG

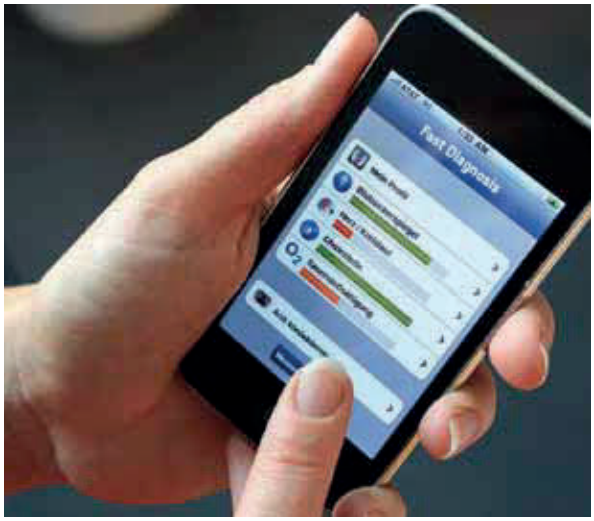
intelligente Visualisierung sowie die automatisierte Merkmalsextraktion und Diagnose vorangetrieben werden. Dabei wird es von großer Bedeutung sein, bildgebende Verfahren, die mit sehr unterschiedlichen räumlichen Auflösungen arbeiten, miteinander zu verschmelzen und in Form korrelativer Verfahren in den Lebenswissenschaften und der medizinischen Diagnostik zu etablieren (korrelative Anbindung von Nano-, Mikro- und Makrowelt). Durch eine hochspezifische und patientenschonende Diagnostik auf der Basis optischer Verfahren leistet die Biophotonik einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung einer individualisierten Medizin, eine der zentralen Herausforderungen der modernen Gesundheitsforschung, die auch im Rahmenprogramm Gesundheitsforschung aufgegriffen wird.

Erheblicher Forschungsbedarf sowie große Chancen bestehen insbesondere in den Bereichen dreidimensionaler Mikroskopie zur Diagnose onkologischer Erkrankungen und Erkrankungen der Haut und Schleimhäute sowie zum Therapie-Monitoring, bei der Entwicklung und Validierung von Markern und optisch auslesbaren Reportereinheiten, bei der Entwicklung effizienter neuer Lichtquellen und Detektoren für kompakte Mikroskopie- und Endoskopiesysteme mit hoher Lichtintensität sowie bei der Reduktion und Auswertung von Bilddaten und der Modellbildung auf der Basis optischer Verfahren.

Therapie und Medizinprodukte

Klinische oder chirurgisch therapeutische Maßnah men verfolgen das Ziel zu heilen, die Gesundheit des Menschen zu erhalten oder wiederherzustellen und seine Lebensqualität zu steigern. Dabei sollen Wunden schnell und komplikationslos heilen und Schmerzen minimiert werden. Sofern ein Zugang i das Körperinnere erfolgen muss, soll dieser Zugan so schonend wie möglich erfolgen (sanfte Chirurgie). Optische Verfahren bieten hierfür hervorragende Möglichkeiten z. B. durch die Verknüpfung von in-situ-Diagnostik und Therapieverfahren (Theragnostik). Wichtige Trends und Forschungsfelder sind die Verschmelzung von Diagnose und Therapie, Endoskopie und minimalinvasiver Chirurgie, die Funktionsmodulation von Zellen und Zellverbänden sowie die Plasmamedizin. Forschungsanstrengungen in diesen Bereichen könne große Fortschritte für biophotonische Verfahren insgesamt bewirken, verbunden mit der Perspektiv einer präventiven, personalisierten Medizin.

Verschmelzung von Diagnose und Therapie – Die photonischen Technologien bieten ein großes Potenzial für die Theragnostik in Medizin und Zahnheilkunde: bildgestützte Navigation, rückgekoppelte Verfahren zur Therapiesteuerung, Erzeugung der Diagnosestrahlung mit Hilfe der Therapieeinrichtung oder auch intraoperative optische Biopsieverfahren zur Optimierung und Minimierung invasiver Eingriffe sind Lösungsansätze, die in den



Zukunftsvision: Das Smartphone als Gesundheitsmonitor?
Quelle: IPHT Jena (Fotomontage)

nächsten Jahren vorangetrieben werden müssen. Die Gesamtkonzepte sollen dabei Therapiekontrolle, Qualitätssicherung und Kostenoptimierung vereinen.

Forschungsbedarf besteht u. a. hinsichtlich der Identifizierung und Optimierung geeigneter diagnostisch verwertbarer Verfahren (optischer Feedbacksysteme) sowie bei Verfahren der Multiplex-Diagnostik, bei denen Mustersignaturen statt einzelner Marker erfasst werden. Unterstützende Technologien z. B. für die Bildverarbeitung müssen dabei berücksichtigt werden.

Endoskopie und minimalinvasive Chirurgie – Für den therapeutischen Aspekt ist die Vision des möglichst schmerzfreien Operierens ein ambitioniertes Ziel. Hier bietet die Laser- und Plasmatechnologie Alleinstellungsmerkmale, die für die endoskopisch geführte OP neue Möglichkeiten eröffnen. FuE-Arbeiten sind u. a. zu richten auf kompakte Laser zum Schneiden und zum Koagulieren von Gewebe, zur Lithotripsie und zum Einsatz in der photodynamischen Therapie.

Funktionsmodulation von Zellen und Zellverbänden – Die Wundheilung bietet sowohl nach akutem Trauma als auch bei chronischen Wunden großes Innovationspotenzial für photonische Produkte und Verfahren. Ein wichtiger Trend ist zudem die instrumentelle Nutzung der Flexibilität des Lichtes hinsichtlich Dosis, Fokussierung und Zeit, z. B. in Form optisch aktiver Pflaster (photodynamische Therapie, Langzeittherapie) und autonomer Systeme zur optisch gestützten Diagnostik und Therapie für unzugängliche Organe. Therapiesysteme bauen dabei auf entsprechenden Entwicklungen in der Photon-gestützten Diagnostik auf (z. B. Lab-on-a-Chip-Systeme). FuE-Arbeiten sind u. a. auf die Entwicklung multimodaler Therapien unter Nutzung verschiedener Optischer Technologien zu richten. Flankierend müssen die Wechselwirkungen von Licht und Gewebe sowie Zusatzstoffen erforscht werden. Ein besonderer Fokus muss dabei in der Untersuchung vitaler Gewebe liegen.

Plasmamedizin – Im Bereich Therapie und Medizinprodukte eröffnet die Plasmatechnologie innovative Ansätze, die den Paradigmenwechsel hin zu einer präventiven, personalisierten Medizin unterstützen. Dabei kommen Verfahren wie z. B. die Plasma-Oberflächenmodifizierung und die Plasmasterilisation und -dekontamination zur Anwendung. FuE-Bedarf besteht u. a. bei (Bio-) Interfaces, die als funktionale und/oder antimikrobiell wirksame Oberflächen etwa von Implantaten, Stents und Kathetern wirken und im Rahmen regenerativer Therapien die selektive und kontrollierte Kultivierung bzw. Anhaftung von Körperzellen, die Prävention von Infektionen oder die kontrollierte Freisetzung von Wirkstoffen (Drug-Release) ermöglichen könnten. Direkte therapeutische Anwendungen z. B. in der Dermatologie, der Zahnheilkunde und der Heilung chronischer Wunden, zeigen signifikantes Potenzial.

Analytische Verfahren

Analytische Verfahren spielen eine große Rolle in vielen Bereichen der Produktion und des täglichen Lebens wie Gesundheit, Pharmazeutik, Medizintechnik, Biotechnologie, Lebensmittelüberwachung und Umwelt. So sind auf dem Gebiet der Gesundheit und Ernährung in den nächsten Jahren Entwicklungen absehbar, die entsprechendes Handeln erfordern. Beispiele dafür sind die dramatische Zunahme von Allergien in der Bevölkerung sowie unzureichende Prognosen von Arzneimittelrisiken und Chemikalientoxizität. Photonische Analyseverfahren bieten hier eine hervorragende Möglichkeit, die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Zielsubstanz und dem menschlichen Organismus künftig auch auf zellulärer Ebene zu untersuchen.

Kontrolle des Gesundheitszustands, Vorsorge, Therapiekontrolle und Nachsorge – Künftig wird die Photonik im Verbund mit anderen Technologien u. a. Grundlagen für implantierbare Mikrolabore bereitstellen, die kontinuierlich wichtige Daten über den Gesundheitszustand insbesondere älterer Menschen liefern können und eine gezieltere medizinische Versorgung erleichtern.

Umweltanalytik – Photonische Prozesse und Plasmaverfahren ermöglichen neue Lösungen für den direkten und permanenten Einsatz vor Ort, z. B. zur Abluft- und Wasseranalyse und -reinigung. Herausforderungen ergeben sich u. a. bei der Entwicklung von Sensoren für die Detektion von Mikroorganismen, der Entwicklung von Lösungen für die Reinigungsoptimierung sowie für drahtlose Sensornetze.

Prozesskontrolle – Der Übergang von „Quality by Testing“ hin zu „Quality by Design“ mittels analy-

tischer Verfahren für die automatisierte Prozessüberwachung ist ein wichtiges Ziel. Hierfür sind hochgenaue photonische Verfahren zu erarbeiten, welche die relevanten Prozesse nicht beeinflussen. Damit könnten auch wichtige Plattformtechnologien für die Prozesskontrolle an der Schnittstelle zwischen Biophotonik und Biotechnologie entstehen, von denen Innovationen in der industriellen Biotechnologie und der Bioverfahrenstechnik stark profitieren könnten.

Vor-Ort-Analytik (POC) – Im Gesundheitsbereich werden Vor-Ort-Analyse-Verfahren unter dem Begriff „Point-of-Care" (POC) zusammengefasst. Basierend auf minimalen Mengen einfach zu gewinnender Proben, wie z. B. Flüssigkeiten oder Gasen, müssen die POC-Geräte in der Lage sein, zuverlässig und schnell Analysen vorzunehmen. Zu entwickeln sind Nachweismethoden auf der Grundlage der Fluoreszenzspektroskopie sowie labelfreie optische und spektroskopische Verfahren wie z. B. Oberflächenplasmonenresonanz, Interferometrie oder oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie.

Pharmakologie und Arzneimittelsicherheit – Photonische Analysemethoden zum Content Screening sind zu erforschen. Hierbei ist der Einsatz zur Bestimmung von Markern wie auch deren Anwendung zum funktionellen Screening hervorzuheben. Daneben sind berührungslos und kontaminationsfrei arbeitende photonische Analyseverfahren für die Überwachung der Qualität von Arzneimitteln in einer online-Prozesskontrolle zu entwickeln.

Zum Erschließen der genannten Anwendungsfelder analytischer Verfahren sind umfangreiche FuE-Arbeiten im Bereich der spektroskopischen Verfahren für eine schnelle, hochspezifische und sensitive Spurenanalytik sowie für die Detektion kleinster Materialmengen, der Entwicklung von Label sowie flankierend auf dem Gebiet der entsprechenden IT- und Systemlösungen erforderlich.

Mit der Biophotonik sollen die Grundlagen für eine stärker präventiv orientierte und personalisierte Medizin geschaffen werden. Dies erfordert ein stark interdisziplinäres Vorgehen bei der Erforschung von Diagnostik und Therapieverfahren. Hierzu sind Forschungseinrichtungen, Unternehmen und klinische Anwender zu vernetzen. Neben der Verbundforschung sollen dabei „Industry on Campus"-Projekte die längerfristige und strategisch orientierte Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft unterstützen. In den Bereichen molekulare Bildgebung/Theragnostik und bioaktive Implantate (Plasmamedizin) wird das BMBF die Kooperation mit den Förderbereichen Neue Werkstoffe und Nanotechnologie weiter intensivieren.

3.1.4 Digitale Optik

Moderne technische Systeme zeigen eine immer stärkere Verzahnung elektronischer und photonischer Funktionsweisen. Der gegenwärtige Umbruch bei den Benutzeroberflächen von IT-Systemen wird von photonischen Technologien angetrieben. Systeme zur Gestensteuerung, zur Navigation in 3D-Darstellungen und zur autostereoskopischen 3D-Projektion basieren überwiegend auf der digitalen Verarbeitung optischer Informationen. Integrierte Systeme etwa für die Hintergrund-/Vordergrundseparation kombinieren RGB-Kamera, Infrarotlaser und -sensor (für die Tiefeninformation) sowie Hard- und Software zur Bildverarbeitung. Diese Technologien werden immer häufiger die heute noch vertrauten Steuerungsoberflächen ergänzen und letztlich vielfach auch ablösen. Hochauflösendes Video und künftig 3D-Video sind die Treiber der Internetentwicklung. Zudem ist die digitale Aufnahme und Auswertung von Bilddaten eine wichtige Grundlage für die intelligente Sensorfusion. Die Generierung synthetischer optischer Information, etwa für Augmented und Virtual Reality, bedient sich ebenfalls zunehmend optischer Prinzipien, beispielsweise des sogenannten Ray Tracing. Vor diesem Hintergrund wird der Markt für leistungsfähige und zugleich preiswerte Lösungen für die Bilderfassung, -verarbeitung und -darstellung auch in Zukunft ein rasantes Wachstum zeigen, mit strategischer Bedeutung für vielfältige Anwendungen von der Sensorik über die Medizintechnik bis zu Information und Kommunikation.

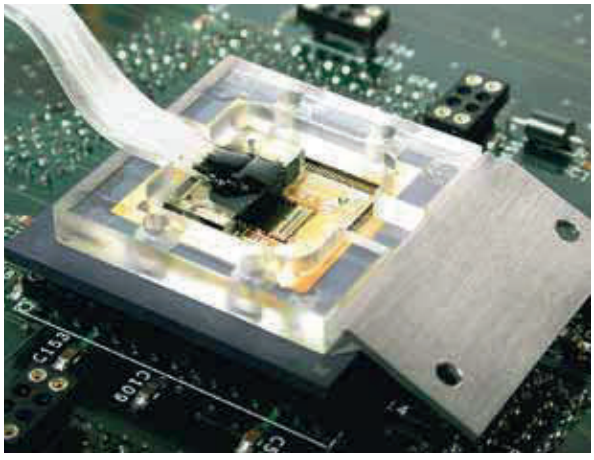
Konvergenz von Photonik und Elektronik

Im Bereich der Informationsverarbeitung führt die rasant wachsende Datenmenge zu einer Integra-

tionsdichte, die elektronische Schaltkreise zunehmend an ihre Grenzen führt. Prinzipielle, physikalisch bedingte Begrenzungen hemmen das weitere Wachstum der Taktfrequenz einzelner Computerchips. Eine Konsequenz ist seit einigen Jahren die Mehrkerntechnik, aus der hohe Anforderungen an die Datenübertragungsraten zwischen den Kernen resultieren. Diese Anforderungen werden künftig nur integrierte photonische Übertragungstechnologien erfüllen können.

Hieraus ergeben sich neue Herausforderungen für die Mikrophotonik: Die Stückzahlen für optische Kommunikationselemente werden signifikant wachsen, die Herstellkosten müssen um eine Größenordnung reduziert werden. Zugleich müssen sich Design- und Herstellmethoden von der heutigen hohen Diversifikation in Richtung Standard-Designflows und Foundry-Modelle entwickeln, wie sie in der Elektronik bereits existieren. Die damit einhergehende Konvergenz von Photonik und Elektronik wird einer der wesentlichen Treiber für die weitere Entwicklung der Photonik sein.

Um optoelektronische Integrationstechniken in Informationsverarbeitung, Sensorik und Messtechnik zur Anwendungsreife zu führen, sind vielfältige technische Herausforderungen zu meistern. Diese betreffen die Realisierung Silizium-basierter optoelektronischer integrierter Schaltkreise, die Substrattechnologie, die Skalierbarkeit von Integrationstechniken für optische Interconnects sowie die automatisierte Aufbau- und Verbindungstechnik für optisch-integrierte Bauelemente.



Optische Inter-Chip-Datenübertragung, Quelle: EU-Projekt OIIC, 2-D VCSEL-Arrays: Universität Ulm, Institut für Optoelektronik

Fahrerassistenzsysteme erkennen Gefahren frühzeitig. Quelle: BMW AG

Basistechnologien für Bauelemente und Integration – FuE-Bedarf besteht bei monolithischer III/V-Integration, insbesondere auch im Hinblick auf eine Vereinheitlichung der Designflows, sowie bei IV-basierter Heterointegration und Silizium-Photonik (z. B. CMOS[19]-Komponenten mit integrierter Lichtquelle, Integration schneller optischer Schalter, vollständige Integration eines Intra-Chip-Transceivers auf einer CMOS-Plattform). Weiterhin sind Hybridintegration und Wafer-Level-Packaging von hoher Bedeutung, um Produktionsverfahren der Mikroelektronik für die Fertigung optoelektronischer Systeme nutzen zu können.

Optische Interconnects – FuE-Bedarf besteht bei Interconnects für die Kommunikation zwischen mehreren Kernen z. B. in einem Multichip-Modul, mittelfristig auch bei Intra-Chip-Interconnects für die komplette Realisierung der optischen Verschaltung in einem gemeinsamen Chip mit der Elektronik.

Mikrophotonik für Sensorik und Messtechnik – Mikro- und Nanosysteme auf der Basis optoelektronischer Bauelemente sind zu adressieren. Anwendungen umfassen die medizinische Sensorik, miniaturisierte Sensor-Arrays für die Labordiagnostik, Sensorsysteme für mehrdimensionales Erfassen und Messen sowie Kombinationen optischer Komponenten mit optoelektronischen Bauelementen für die Sensorik in der Bildgebung.

[19] CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

Bilderfassung und Visualisierung

Aus den zunehmenden Anforderungen bei der Bilderfassung und Visualisierung an Energieeffizienz und Mobilität, verbunden mit den aktuellen Trends hin zu Miniaturisierung und erhöhter Funktionalität bis hin zur 3D-Darstellung, ergibt sich dringender Handlungsbedarf. Zentrale Fragestellungen betreffen die 2D/3D-Bilderfassung, hier insbesondere im Hinblick auf (teil-) automatisierte Prozesse, sowie die (mobile) 2D/3D-Visualisierung von Bildinhalten. Ein weiterer wichtiger Trend ist die „intelligente Sensorfunktion", d. h. die Vernetzung von Sensoren zu im Idealfall selbstkonfigurierenden Systemen für die schnelle und umfassende Ermittlung und Aufbereitung z. B. sicherheitsrelevanter Informationen.

Bei Komponenten und Baugruppen für die Bilderfassung und Visualisierung hat Deutschland starke Kompetenzen, insbesondere in der Beleuchtungstechnik und der abbildenden Optik sowie im Systemdesign. Um hier Entwicklungen zu fokussieren und Stärken auszubauen, wird eine enge Kooperation der Hersteller von Komponenten und Baugruppen mit den Systemherstellern aus den Leitindustrien Medizintechnik, Maschinenbau, Sicherheitstechnik und Automotive angestrebt.

Piko-Projektoren ermöglichen die mobile Projektion von Bildern und Informationen. Quelle: OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Erforderliche FuE-Arbeiten betreffen Lichtquellen, abbildende Systeme, Sensorik und Modulation sowie die Hardware-nahe Datenverarbeitung. Zudem müssen ggf. neue Lösungsansätze für die Datenübertragung Berücksichtigung finden.

2D/3D-Bilderfassung – Die Erfassung von Bilddaten wird künftig über den klassischen 2D-Abbildungsbereich hinausgehen. Viele Anwendungsgebiete werden sich Zusatzinformationen zunutze machen, um bessere Entscheidungsgrundlagen zu erlangen, automatisierte oder teilautomatisierte Abläufe zu initiieren und Prozesse zu kontrollieren und zu regeln. FuE-Bedarf besteht u. a. bei der automatisierten Bildaufnahme, der Kombination verschiedener Bildgebungsverfahren, der Datenfusion und Verarbeitung großer Datenmengen sowie bei 3D-Aufnahmetechniken und der Kombination von Sensorik und Projektion. Im Bereich der Basistechnologien sind u. a. hocheffiziente Lichtquellen, hoch integrierte Systeme, Wafer-Level Kameras sowie Bildgeber-Sensor-Kombinationen zu adressieren.

Mobile 2D/3D-Visualisierung – Die mobile Visualisierung von 2D- und 3D-Bildinformationen erfordert hoch integrierte Projektionseinheiten, d. h. die hybride und monolithische Integration von Lichtquelle, Bildgeber, Optik und Elektronik („projector on a chip"). Zu erforschende Verfahren umfassen u. a. Near-to-eye- und Head-up-Projektion sowie virtuelle und reale 3D-Projektion (holographische Laserprojektion, Autostereoskospie etc.).

Intelligente Sensorfusion – Das Themengebiet „intelligente Sensorfusion" subsumiert neue Messstrategien, die über den Bereich der 2D/3D-Bilderfassung hinausgehen und unterschiedliche Aufnahmekanäle zu komplexen Sensorsystemen verknüpfen. FuE-Bedarf besteht u. a. bei der multispektralen Datenaufnahme in mehreren Kanälen, der Datenfusion und schnellen Datenauswertung sowie bei selbstkonfigurierenden Systemen, die sich auf wechselnde Bedingungen einstellen.

Die digitale Optik ist ein hoch dynamisches, gegenwärtig jedoch noch stark fragmentiertes Themenfeld. Um vielversprechende Technologielinien frühzeitig zu identifizieren und gezielt voranzutreiben, sollen auch Validierungsprojekte durchgeführt werden, die dazu geeignet sind, Forschungseinrichtungen sowie kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der rechtlichen Sicherung ihrer innovativen Ideen zu unterstützen und das wirtschaftliche Potenzial von Forschungsergebnissen zu demonstrieren. Um Unternehmensgründungen zu erleichtern, ist eine Gründungsoffensive GO-Photonik vorgesehen. Dafür sollen im Umfeld dynamischer Märkte neue Förderinstrumente entwickelt und bereitgestellt werden, die in besonderer Weise auf Ausgründungen und junge Unternehmen ausgerichtet sind.

3.2 Integrierte photonische Systemtechnologie

Der Begriffswechsel von „Optischen Technologien“ zu „Photonik“ ist kein Zufall. Darin kommt zum Ausdruck, dass die Halbleitertechnik auch in der Optik dominant wird. Vor zehn Jahren war dies noch offen. Mit dieser Änderung ist ein fundamentaler Wandel der Märkte, der Produktionsverfahren und der Unternehmensstrukturen verbunden. Dies bringt neue Chancen für die deutsche Photonik-Branche mit sich, aber auch neue Herausforderungen.

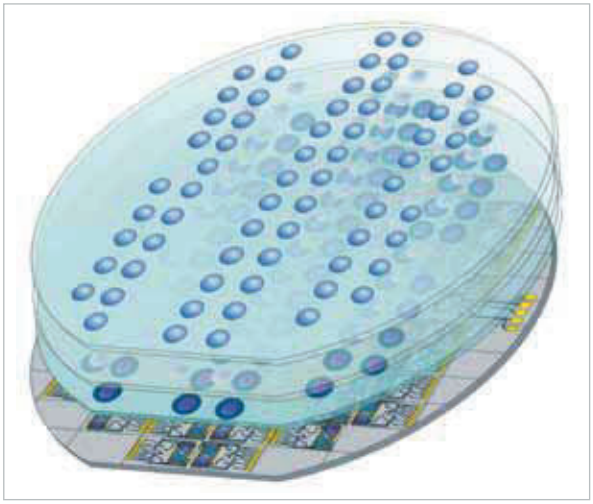
Die Photonik steht heute an einer Schwelle, die vergleichbar ist mit dem Übergang von der konventionellen Elektronik zur Mikroelektronik in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts. Künftig werden Halbleiterlichtquellen und optische Halbleiterbauelemente wesentliche Grundbausteine der Photonik sein. Damit sind zwei Herausforderungen verbunden: Erstens wird die bislang vorherrschende diskrete Aufbautechnologie in der Photonik zunehmend durch kompakte, integrierte Systemansätze ersetzt werden. Und zweitens gewinnt die Integration elektronischer und photonischer Funktionen in einer weitgehend gemeinsamen Aufbautechnik eine überragende Bedeutung. Zusammen mit automatischen Fertigungsverfahren wird die Vision einer „optischen Fabrik“ (analog zu den Wafer-Fabs in der Elektronik) in greifbare Nähe rücken. Mit diesen technologischen Weichenstellungen sind auch erhebliche ökonomische Herausforderungen verbunden, da die Skaleneffekte integrierter Bauelemente besonders groß sind. Hier sind deutlich höhere Investitionssummen erforderlich als in der bisherigen Technik.

Fasergekoppelte Diodenlaser, Quelle: Fraunhofer ILT

Integrierte photonische Komponenten und Systeme werden künftig die Grundlage aller Wachstumsmärkte der Photonik darstellen. Beispiele für diesen Trend sind:

- LED-Beleuchtung:
  Aus der Forderung einer drastischen Kostenreduktion bei LEDs für die Allgemeinbeleuchtung ergeben sich neue Herausforderungen für die Prozess- und Anlagentechnik mit dem Ziel eines höheren Automatisierungsgrades und einer Flächenskalierung in der Fertigung bis hin zur Wafer-Level Fertigung.

- Mobile Visualisierung:
  Hoch integrierte Projektionseinheiten, d. h. die hybride und monolithische Integration von Lichtquelle, Bildgeber, Optik und Elektronik erfordern die Zusammenführung elektronischer und optischer Funktionalitäten in extrem kompakten, justagefreien Bauelementen.



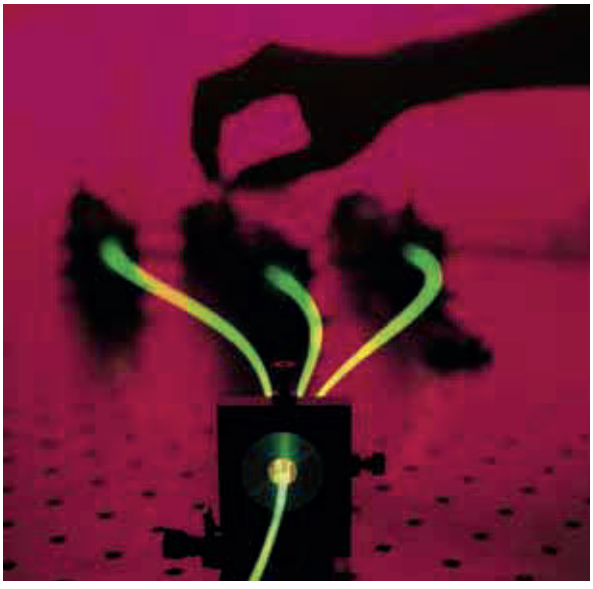
Hybride Wafer-Level 3D-Integration zur Fertigung integriert optoelektronischer Module, Quelle: Fraunhofer IOF / Wolfgang Buß

- Sensorik und Analytik:
  Ausgehend von photonischer und optisch-elektronischer Integration sind kostengünstige miniaturisierte Spektrometer für die Umweltanalytik und die photonen- sowie plasmagestützte Diagnostik zu adressieren (z. B. Lab-on-a-Chip-Systeme).

- Lasertechnik:
  Skalierbare Produktionstechnologien gewinnen mehr und mehr an Bedeutung. Laserstrahlquellen basieren zunehmend auf Halbleitertechnologien, verbunden mit elektronischen Steuerungen z. B. für die zeitliche und räumliche Pulsformung. Die damit verbundene zunehmende Miniaturisierung der Bauelemente hin zu hybrider und monolithischer Integration erfordert verbesserte oder gänzlich neue Laserkonzepte.

- Optiken:
  Eine wesentliche Herausforderung bei High-End-Optiken ist es, mittels automatisierter Montage- und Packaging-Verfahren möglichst viele Funktionalitäten auf einem Bauteil zu integrieren; Ziele sind die monolithische Integration und die Fertigung komplexer Optiken auf Wafer-Level.

- Organische Elektronik:
  Die organische (Opto-) Elektronik ermöglicht flexible, miniaturisierte Komponenten und Systeme auf der Grundlage kostengünstiger, großflächiger Herstellungsverfahren. Ein Ziel ist die Integration organischer und hybrider elektronischer Systeme.



Ytterbium-dotierter Faserverstärker, Quelle: Fraunhofer IOF

Im Rahmen des neuen Programms wird die photonische Integration einen Schwerpunkt der Initiativen zur Verbundforschung bilden. Darüber hinaus wird das BMBF weitere Impulse in Richtung integrierter photonischer Systemtechnologien geben, um kooperative Entwicklungsplattformen zu initiieren und nachfolgende Investitionsentscheidungen für den Standort Deutschland vorzubereiten. Dies betrifft u. a. die nachfolgend genannten Maßnahmen.

3.2.1 Faseroptik

Der zunehmende Einsatz der Lasertechnologie in Fertigungsprozessen hat in jüngster Vergangenheit ein starkes industrielles Interesse an Lasern mit höherer Leistung und deutlich verbesserter Strahlqualität hervorgerufen. Gründe für dieses Bedürfnis sind Gewinne an Flexibilität und Geschwindigkeit und eine Steigerung der Fertigungs- und Prozesseffizienz. Eine äußerst dynamische Entwicklung in diesem Bereich vollzieht gegenwärtig der Faserlaser. Vorteile des Faserlasers sind die hohe Fokussierbarkeit, der hohe Wirkungsgrad sowie die Möglichkeit eines einfachen Aufbaus durch das Ersetzen diskret-optischer Komponenten durch integrierte Lösungen. Hieraus ergeben sich auch wesentliche Impulse in Richtung einer automatisierbaren Montage von Hochleistungs-Laserstrahlquellen.

In den letzten Jahren konnte ausgehend von neuen Faserlaserprodukten eine rasche Reduktion der Preise im gesamten Lasermarkt beobachtet werden. Ursächlich hierfür ist der modulare Aufbau für verschiedenste Leistungsbereiche, der Skaleneffekte bei der Produktion faseroptischer Komponenten und Systeme ermöglicht. Diese Entwicklung wird sich weiter fortsetzen. Um die Chancen, die sich hieraus ergeben, in Deutschland zu nutzen, sollen die erforderlichen Ressourcen für den Auf- und Ausbau der Fasertechnologie in einer gemeinsamen Initiative des BMBF mit dem Land Thüringen, der Fraunhofer-Gesellschaft und Unternehmen der Lasertechnik zusammengeführt werden. Damit soll eine wichtige Grundlage für die Herstellung kritischer Komponenten und die kostengünstige, (teil-) automatisierte Fertigung hoch integrierter Faserlaser-Systeme in Deutschland geschaffen werden.

3.2.2 Integrierte photonische Schaltkreise

In Märkten, die sich durch die Produktion komplexer photonischer Systeme in hohen Stückzahlen bei strikten Kostenvorgaben auszeichnen, ist seit einigen Jahren die zunehmende Verwendung integrierter optischer Systeme zu beobachten. Unter diesen ist der integrierte photonische Schaltkreis hervorzuheben, der seine Funktionen, analog dem integrierten Schaltkreis der Mikroelektronik, auf einer Plattform vereint. Wie in der Mikroelektronik amortisieren sich die erheblichen Investitionen für die Fertigungstechnologie erst bei der Produktion sehr hoher Stückzahlen. Aus diesem Grunde ist damit zu rechnen, dass es zu neuen Geschäftsmodellen in der Produktion derartiger integrierter Photonik-Systeme kommen wird, die sich von der heutigen Branchenstruktur der Photonik stark unterscheiden. Im Hinblick auf diesen Strukturwandel stellt das Foundry-Modell ein mögliches Mittel dar, um die notwendigen Investitionen generieren zu können.

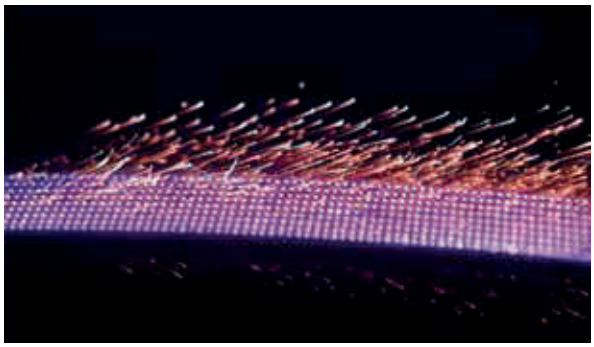
Entsprechende Strukturen können im Bereich der Forschung und Entwicklung mit den verfügbaren Instrumenten (Kapitel 4.1) ebenfalls gefördert werden. Für die Realisierung von Foundry-Modellen strebt das BMBF eine europäische Zusammenarbeit an. Dabei wird das BMBF darauf hinwirken, dass entsprechende Ansätze möglichst früh unter industrieller Beteiligung stehen.

Die deutsche Photonik-Branche soll beim fundamentalen Wandel von Systemtechnologien und Produktionsverfahren unterstützt werden. Um die Wertschöpfungsketten in Deutschland zu erhalten und neue Verfahren für die Fertigung integrierter photonischer Komponenten und Systeme zu etablieren, werden u. a. Public-Private-Partnership-Modelle, z. B. zur Schaffung von Strukturen für verteilte Produktionsstätten angestrebt, die es ermöglichen, durchgehende Prozessketten für die Fertigung integrierter photonischer Systeme zu definieren.

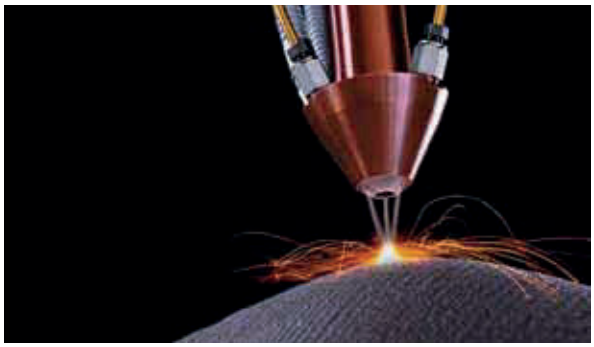
3.3 Photonische Prozessketten

Berührungsfreie photonische Verfahren ermöglichen neue Fertigungsketten für komplexe Produkte unter den stetig wachsenden Anforderungen an flexible und energieeffiziente Prozesse. Adaptive Fertigungs- und Anlagenkonzepte auf der Basis intelligenter Lasernetzwerke und optischer Sensor- und Regelsysteme ermöglichen die Massenfertigung individualisierter Produkte. Darüber hinaus werden auch neue Bearbeitungsprozesse möglich, die mit konventionellen Werkzeugen kaum realisierbar sind. Durch die lokale und gezielte Deposition von Energie können beispielsweise alternative Leichtbauwerkstoffe für den Automobilbau verwendet werden. Zunehmend kommen auch sogenannte generative Verfahren zum Einsatz, bei denen komplexe Werkstücke oder Implantate mittels

Laserschneiden an einem tiefgezogenen Blech, Quelle: TRUMPF GmbH + Co. KG



Hochgeschwindigkeits-Laserbohren von Solarzellen, Quelle: Fraunhofer ILT



Laserbearbeitung mit Pulverzuführung, Quelle: TRUMPF GmbH + Co. KG

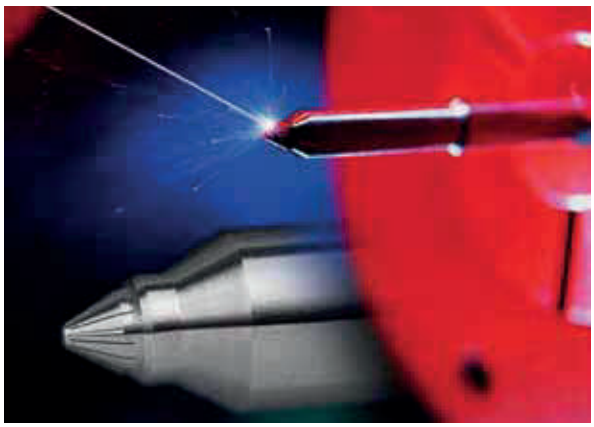
Laser aus dem Rohmaterial Schicht für Schicht aufgebaut werden.[20] Die dazu erforderlichen Geräte („3D-Drucker", „makerbots") sind heute bereits in einer ersten Generation erhältlich und eröffnen in der Weiterentwicklung die Perspektive einer weitgehend unmittelbaren Erzeugung materieller Produkte aus digitalen Daten.

Damit stellt die Photonik ein strategisches Element beim Aufbau verteilter Wertschöpfungsketten dar. Hier bietet sich für einen Kernbereich der deutschen Wirtschaft, nämlich für die „Produktion von Produktivität", eine exzellente Möglichkeit, die klassischen technologischen Kompetenzen in Richtung neuer, flexibler, energieeffizienter und verteilter Prozessketten weiterzuentwickeln.

3.3.1 Lösungen für die nächste Generation der Produktion

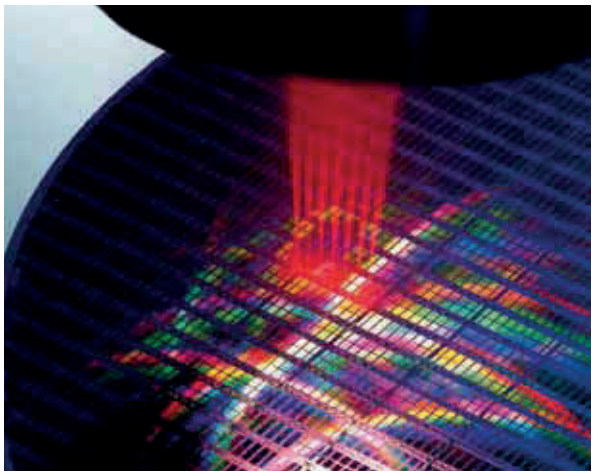
Es gilt, durch die Entwicklung neuer Laser- und Plasmastrahlquellen sowie leistungsfähiger optischer Systeme das gesamte Potenzial des Werkzeugs Licht für industrielle Fertigungsprozesse zu erschließen, um damit durch höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten, selektive, werkstoffangepasste Wirkung und neue, nachbearbeitungsfreie Fertigungsprozesse Wettbewerbsvorteile für die deutsche Industrie zu schaffen. Aber auch umgekehrt müssen Konstruktion und Produktionsabläufe künftig von vornherein deutlich stärker auf optische Fertigungsverfahren ausgerichtet werden. Mit den einzigartigen Eigenschaften der Laserstrahlung und der Plasmatechnologie lassen sich neue Prozessketten mit deutlichen Kosten- und Geschwindigkeitsvorteilen generieren und Bauteile aus einem komplexen Werkstoffmix für die optimale Anpassung von Funktion und Eigenschaft erzeugen. Forschungsbedarf besteht u. a. bei den folgenden Fragestellungen:

Ressourceneffiziente und umweltschonende Bearbeitungsverfahren – Der Laser eröffnet neue Wege zu umweltfreundlicheren Bearbeitungsverfahren, etwa durch den Ersatz nasschemischer Bearbeitungsschritte, und zum effizienteren Energieeinsatz in der Fertigung. Dies betrifft sowohl den energetischen Wirkungsgrad der Laser und der Bearbeitungsmaschinen als auch die Energieeffizienz der mit dem Laser realisierten Bearbeitungstechnologien. Der optische Wirkungsgrad konnte durch den Übergang zu Faser-, Scheiben- und Hochleistungsdiodenlaser schon deutlich erhöht werden. Entsprechend kann der Prozesswirkungsgrad künftig deutlich gesteigert werden, wenn es gelingt, die Energiedeposition verfahrens-, werk-



Hochpräzise Mikrostrukturierung mit dem Laser, Quelle: Robert Bosch GmbH

[20] Ein Beispiel ist das Greifelement des 2010 mit dem deutschen Zukunftspreis ausgezeichneten Roboterarms (Festo AG & Co., Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA), das auf diesem Weg hergestellt wird.



Untersuchung mikroskopisch kleiner Bauteile wie mikro-elektromechanischer Komponenten (MEMS), Quelle: Polytec GmbH

stoff- und bauteilangepasst zu realisieren und die Laserstrahlabsorption zu steigern. Ziele sind höhere Prozessgeschwindigkeiten und eine hochdynamisch zeitlich und räumlich steuerbare Energiedeposition. Insbesondere beim Laserstrahlschneiden, -schweißen, -auftragsschweißen und -bohren können damit deutliche Steigerungen der Prozesseffizienz und gleichzeitig auch der Bearbeitungsqualität erreicht werden.

Prozesstechnik – Aus Sicht der Ressourceneffizienz ist die Verkürzung von Prozessketten eine wesentliche Aufgabe für Forschung und Entwicklung. Hierfür sind fertigungstechnische Lösungen aus Laserquelle, Maschine und Subkomponenten bereitzustellen. Lösungsansätze sind die massiv parallele Bearbeitung mit vielen Laserstrahlen im gleichen Prozess (z. B. Remote-Schneiden bzw. Remote-Schweißen, Remote-Härten) oder die Integration mehrerer Bearbeitungsschritte in einer Bearbeitungsmaschine zur parallelen, teilsequentiellen oder sequentiellen Bearbeitung. Forschungsbedarf besteht u. a. bei Strahlformungs- und Strahlablenkungseinheiten, Remote- und Multi-Parallel-Bearbeitungsköpfen sowie selektiv steuerbaren Laserstrahlquellen für die zeitlich und räumlich gesteuerte Energiedeposition.

Gleichzeitig eröffnen neue Laserprozesse aber auch neue Möglichkeiten bei der Werkstoffwahl. Die Funktionalität eines Bauteils hängt wesentlich vom eingesetzten Werkstoff ab. Heute ist es aufgrund der eingesetzten Fertigungstechniken nicht immer möglich, den für die spätere Anwendung optimalen Werkstoff zu verwenden. Darüber hinaus sind bei einem Bauteil häufig verschiedene Funktionen zu erfüllen, die von einem einzigen Werkstoff allein nicht abgedeckt werden können. Die Lasertechnik kann hier Lösungen mit Fügeverfahren und Strukturierungstechniken liefern, mit denen die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe zu einem Werkstoff-Hybrid kombiniert werden können oder mit denen die spezifischen Eigenschaften eines Werkstoffes gezielt verändert und an die Nutzungsanforderungen angepasst werden können.

Im Zuge der Einsparung fossiler Brennstoffe ist Leichtbau ein wichtiges Themenfeld, das mit der Entwicklung neuer Werkstoffe einhergeht. Dabei werden insbesondere im Zusammenhang mit dem Trend zur Elektromobilität völlig neue Fahrzeugkonzepte diskutiert, die einen Wandel der derzeitigen Karosserie zu einem angepassten Konzept unter Nutzung neuer Werkstoffsysteme bedingen. Durch die sehr lokale und gezielt steuerbare Energiedeposition der Laserstrahlung lassen sich hier neue Fertigungsketten definieren, die den Aufbau von Fahrzeugen im Bereich Automobil, Transportwesen, Schiffbau und Flugzeugbau aus alternativen Werkstoffen ermöglichen. Forschungsbedarf besteht hier vor allem bei folgenden Werkstoffen und Werkstoffkombinationen: Metallische Schäume, Keramiken, CFK- und GFK-Komponenten [21], Verbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen und Metallen mit Faserverbundkunststoffen sowie Metall-Kunststoff-Hybride.

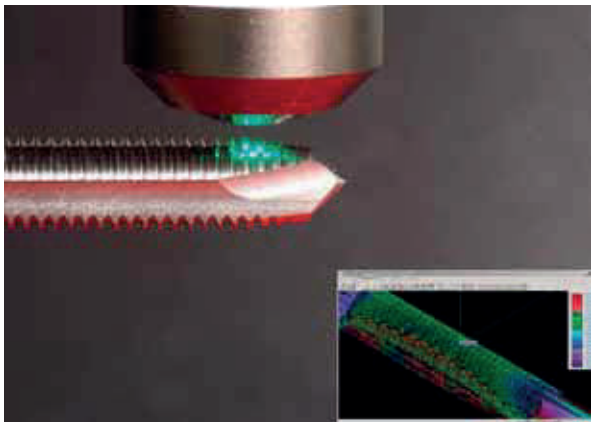
Die Auflistung der Herausforderungen und Anwendungsfelder ist beispielhaft für das Potenzial der Photonik, mittels neuer Laserstrahlquellen und Verfahrensansätze neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Sie ist erweiterbar auf Bereiche wie Elektronik, chemische Verfahrenstechnik, Biotechnologie und andere. Um diese Anwendungsfelder zu erschließen, sind u. a. Forschungsarbeiten auf den folgenden Gebieten durchzuführen:

- Schnelle großflächige Oberflächen-Strukturierungsprozesse im Mikro- und Nanomaßstab auf 2D- und 3D-Bauteilen

[21] CFK: Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff, GFK: Glasfaser verstärkter Kunststoff

- Großflächige Laser-, Plasma- und Hybridprozesse zur Oberflächen- und Volumenmodifikation sowie zur Schichtkonditionierung
- In-Line-Laserverfahren zur Beschichtung und zur schnellen Mikro- und Nanostrukturierung
- Photonisch induzierte chemisch-physikalische Umwandlung von Stoffeigenschaften, Photokatalyse und photochemischer Stoffaufschluss
- Hochgeschwindigkeitsverfahren für Selective Laser Melting (SLM) und Rapid Manufacturing
- Laserbasierte Fügetechnik für artungleiche Werkstoffkombinationen und schwer schweißbare Werkstoffe

Laserorientierte Konstruktion und Produktionsplanung – Die Erforschung neuer verfahrenstechnischer Ansätze und deren Überführung in die industrielle Anwendung erlauben verbesserte oder neue Produkteigenschaften bzw. neue Fertigungsketten für die Herstellung komplexer Produkte unter den stetig wachsenden Anforderungen einer größeren Flexibilisierung, kürzeren time-to-market-Zeiten und einer Minimierung des Rohstoffverbrauchs. Forschungsbedarf besteht u. a. beim Selective Laser Melting (SLM), bei der Nutzung nichtlinearer Prozesse für die Volumenmodifikation von Werkstoffen sowie für die Multiphotonen-Polymerisation, beim Strukturieren mit athermischem Abtrag, beim Laserdotieren sowie bei der laserchemischen oder plasmatechnischen Modifikation von Oberflächen.



Optischer Sensor im Einsatz zur hochgenauen Oberflächenerfassung, Quelle: Werth Messtechnik GmbH

Für die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren mit hoher Produktivität bzw. die Erzeugung neuer Bauteilfunktionalitäten bedarf es einer grundsätzlichen Weiterentwicklung bereits existierender Laser- und Plasmaprozesse sowie der Erforschung und Entwicklung neuer Fertigungsprozesse, bei denen die Eigenschaften des Werkzeugs Licht verstärkt genutzt werden. Hier ist vor allem die Kombination konventioneller Prozesse mit lasertechnischen Verfahren zu nennen, bei denen die Selektivität der Lasertechnik mit der Produktivität flächiger Verfahren kombiniert wird. Darüber hinaus sind neue Ansätze zu finden, um über eine vollständige Prozesskontrolle und selbstlernende Maschinenoptimierung ein Höchstmaß an Prozesssicherheit auch bei kleinen Stückzahlen und flexibler Fertigung zu garantieren.

Im Mittelpunkt stehen photonische Prozessketten für die energieeffiziente und ressourcenschonende Produktion. Hier gilt es, photonische Verfahren für neue Anwenderbranchen zu öffnen. Dies soll u. a. durch strategische Kooperationen im Rahmen einer Innovationsallianz erreicht werden.

3.3.2 Neue optische Messverfahren

Stärker als bisher sollte Licht als berührungsloses und verschleißfreies Messmedium einsetzbar sein. Dies erfordert vor allem auch die Entwicklung neuer Messverfahren statt nur die Optimierung bereits bestehender. Über hochstabile Lichtquellen in definierten Wellenlängenbereichen bis hin zur zerstörungsfreien Werkstückprüfung mit leistungsfähigen Lichtquellen und Kameras vom Terahertz- bis in den Röntgenbereich sind neue Anwendungsfelder mit großem Potenzial zu erschließen. Eine prozessintegrierte, berührungslose Sensorik steht dabei im Vordergrund. Gleichzeitig muss die Sensorik extrem robust und zuverlässig arbeiten und letztlich auch kostengünstig sein, um Investitionshemmnisse zu vermeiden. Dazu gehört auch eine standardisierte Qualifizierung der optischen Sensoren inklusive neuer Kalibrierverfahren der entsprechenden Messtechniken zur Schaffung reproduzierbar gleichbleibender Ergebnisse.

Während in der Vergangenheit die meisten Messmethoden auf zweidimensionaler Erfassung

der Messobjekte beruhten, ist zukünftig auch eine dreidimensionale Form- und Lageerfassung zu ermöglichen, die einen erheblich besseren Einblick in die Prozesse und Bearbeitungsergebnisse erlaubt. Eine direkte Integration in die Fertigungsmaschine ist unabdingbar. Notwendige FuE-Arbeiten umfassen u. a. die schnelle und genaue 3D-Bauteilvermessung im Mikro- und Nanometerbereich, die prozessintegrierte Oberflächenprüfung und -analyse auf großen Flächen, die funktionale Vermessung von Werkstoffeigenschaften mit berührungslosen optischen Methoden sowie die Überwachung und Regelung von Strahlquellen- und Maschinenparametern.

Damit soll eine kognitive Laser-Maschinentechnik zur Sicherstellung gleichbleibender Fertigungsqualität bereitgestellt werden, die sowohl in der Lage ist, Einflüsse von Werkstoffschwankungen zu kompensieren als auch fertigungs- und bedienerbedingte Einflüsse zu eliminieren.

3.4 Die Basis der Photonik: neue Strahlquellen, Optiken, Materialien

Um die wissenschaftlich-technischen Potenziale der Photonik zu nutzen und Wachstumsmärkte zu erschließen, müssen neue Komponenten und Systeme erforscht und entwickelt werden. Strahlquellen, Optiken und Materialien müssen mit den Anforderungen der Anwender Schritt halten. Dabei sind Innovationen sowohl im Hinblick auf Kosten- und Energieeffizienz als auch Leistungsfähigkeit nötig, um Deutschlands technologische und wirtschaftliche Führungsposition in der Photonik auch langfristig zu sichern und auszubauen.

3.4.1 Neue Strahlquellen durch Integration und Automatisierung

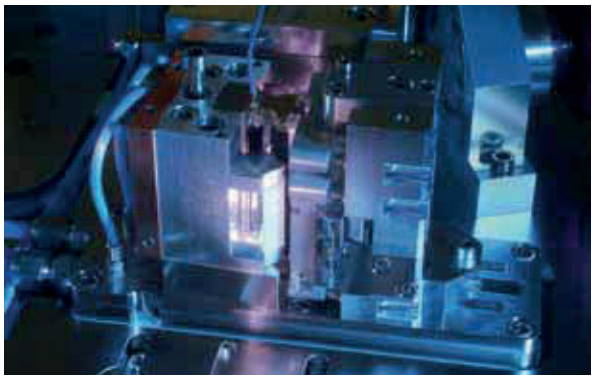
Trotz der großen Fortschritte bei brillanten Laserstrahlquellen (Scheiben-, Faser- und Hochleistungsdiodenlaser) sind noch erhebliche Potenziale bei Kostensenkung, einfacheren Resonatoraufbauten, automatisierten Montagetechnologien, verbesserten, preisgünstigeren Halbleitermaterialien, adaptiven Strahlquellen, neuen Wellenlängenbereichen und einer durchgehenden Standardisierung zur Generierung von Skaleneffekten zu erschließen. Forschungsbedarf besteht u. a. bei den folgenden Themen:

Entwicklung von Diodenlasern, Quelle: LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH / Markus Steur

- Festkörper- und Faserlaser mit höchsten Leistungen oder kürzesten Pulsen
- Diodenlaser mit höchster Effizienz und guter Strahlqualität
- Zusammenführung verschiedener Technologien und Verfahren: Optik, Laser, Elektronik, Mikromechanik und Fluidik
- Kostengünstige Fertigung der Strahlquellen
- Neue Aufbau- und Verbindungstechniken (z. B. für Faserlaser)

Kostengünstige Fertigung: Komponenten, Prozesse und Integration von Funktionen – Um die Wettbewerbsfähigkeit der Laserindustrie am Standort Deutschland zu sichern, müssen neue Konzepte für eine kostengünstige Fertigung von Laserstrahlquellen erarbeitet werden. Kostensenkungspotenziale können durch die Nutzung von Fertigungstechnologien der Halbleiter- und Elektronikindustrie im Hinblick auf Prozesse und höhere Integration erzielt

Kompakter Mikrochip-Laser, Quelle: InnoLight GmbH



Ultrakurzpuls-Verstärker, Quelle: Fraunhofer ILT

werden. Vor diesem Hintergrund ist eine noch stärkere Vernetzung mit anderen Technologien anzustreben, um so Erfahrungen anderer Industriezweige bei Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Miniaturisierung nutzen und für die Lasertechnik adaptieren zu können.

Aufgrund ihrer zunehmenden Marktdurchdringung werden Hochleistungslaser in den nächsten Jahren die für eine Volumenfertigung erforderliche Stückzahl erreichen. Dem muss die Laserindustrie in Deutschland durch neue Fertigungskonzepte Rechnung tragen. FuE-Arbeiten umfassen u. a.:

- Automatisierung, auch Teilautomatisierung der heute noch weitgehenden „Serienmanufaktur“
- Neue Verfahren und Algorithmen zur aktiven, automatischen Justage und Montage
- Simulation der gesamten Prozesskette
- Angepasstes Design der Komponenten für die automatisierte Fertigung
- Standardisierung der Schnittstellen
- Integration, ergänzend oder auch alternativ zur Automatisierung
- Realisierung hoch funktionaler, miniaturisierter Systeme mit integrierten Komponenten, z. B. Halbleiter und Optik
- Wafer basierte Fertigung (z. B. Diodenlaser)

Direkt grün emittierende Laserdiode, Quelle: OSRAM Opto Semiconductors GmbH

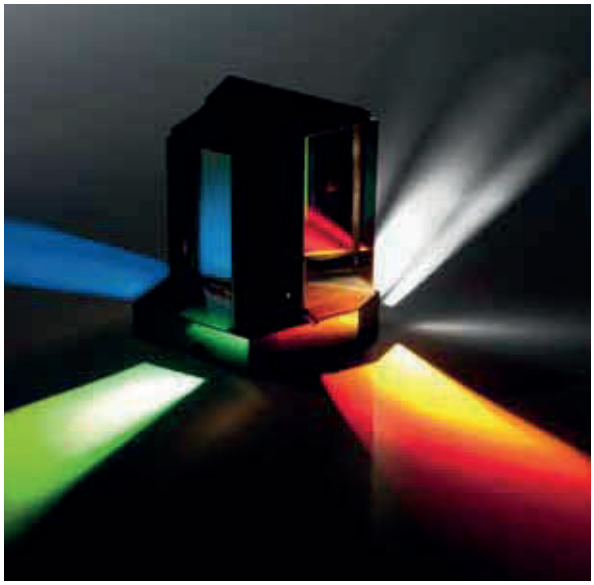
3.4.2 Materialien, Oberflächen, Schichten und Optiken

Optiken sind die Grundbausteine der modernen Photonik. Sie werden eingesetzt zur Kontrolle von Licht in allen seinen Eigenschaften von der Erzeugung bis zur Anwendung. Im Zuge der rasanten Entwicklung der photonischen Technologien ist eine enorme Vielfalt von Optik-Komponenten und Systemen entstanden, deren Funktionsspektrum kontinuierlich ausgeweitet wird.

Heute ist klar abzusehen, dass die gegenwärtig verfügbaren Technologien für die Beherrschung dieser Elemente bei weitem nicht ausreichen werden, um die zukünftigen Anforderungen zu erfüllen. In der nächsten Dekade wird es von entscheidender Bedeutung sein, photonische Komponenten und Bauelemente in einem ganzheitlichen Design zusammenzuführen und damit erstmals eine vollständige Kontrolle von Licht auch unter extremsten Bedingungen in Bezug auf Wellenlänge, Energie und Zeit zu ermöglichen. Ein Ziel ist es zudem, erstmals direkt aktive Strukturen zur Erzeugung und Steuerung von Licht in optischen Systemen monolithisch zu integrieren und mit mechanischen und elektronischen Funktionen zu einer energieeffizienten Photonik zu verknüpfen.

Forschungsbedarf auf dem Wege hin zu der geforderten neuen Klasse von Optiken, die sich unter dem Begriff „Smart Photonic Components“ zusammenfassen lässt, besteht u. a. bei Fertigungskonzepten für neuartige Kristalle, Gläser, Polymere und Keramiken bis hin zu nanostrukturierten Kompositen sowie deren Oberflächenvergütung durch Laser-, Ionenstrahl- und Plasmaverfahren. Von größter Bedeutung ist die Kontrolle der Prozesse auf atomarer Ebene, z. B. für die Herstellung von Sub-Wellenlängen-Strukturen. Letztlich wird die Durchsetzungskraft der Photonik wesentlich von der Verfügbarkeit angepasster High-End-Optiken abhängen. Beispiele sind hybride hoch integrierte Komponenten, die refraktive und diffraktive Strukturen zusammenführen oder optische Nano- und Mikrostrukturen mit Freiformflächen kombinieren. Zudem ist ein ganzheitliches Systemdesign für die Integration und Miniaturisierung optischer Baugruppen erforderlich.

Forschungsbedarf besteht weiterhin bei Software-Tools, die einen effizienten Entwurf optischer Funktionseinheiten und Gesamtsysteme mit hohem Visualisierungsgrad und angepassten Optimierungsalgorithmen ermöglichen. Auf der Grundlage automatisierter Montage- und Packaging-Verfahren muss eine kosten- und energieeffiziente Fertigung entwickelt werden. Dazu gehört auch eine flexible und ganzheitlich planbare Fertigungskontrolle mit vollständiger Datendurchgängigkeit. Zu



Strahlteiler, Quelle: BERLINER GLAS KGaA Herbert Kubatz GmbH & Co

Optikbeschichtung, Quelle: Laser Zentrum Hannover e.V.

berücksichtigen sind zudem Replikationsverfahren, die optische Funktionen bei großen Stückzahlen kostengünstig einprägen können, und die Verdichtung der Funktionalitäten auf möglichst wenig Bauteile, beispielsweise durch eine monolithische Integration. Mit diesen Ansätzen wird die Vision einer optischen Fabrik, ähnlich den Wafer-Fabs in der Halbleitertechnologie, auch für die Photonik in greifbare Nähe rücken.

3.4.3 Organische Optoelektronik

Die Anwendungen der Organischen (Opto-) Elektronik werden unseren Alltag nachhaltig verändern. Organische Leuchtdioden, organische Solarzellen und organische Sensoren werden schon bald die Märkte erobern.

In der Grundlagenforschung ist Deutschland mit zahlreichen Forschungseinrichtungen und den Clustern in Dresden und Heidelberg international an der Spitze. Bei den Basistechnologien – Materialsysteme, Verfahrens- und Drucktechnik – und auch in den Zielmärkten – hier vor allem bei Beleuchtung und Photovoltaik – sind deutsche Unternehmen hervorragend aufgestellt. Es gilt nun, diese starke Position zu nutzen, um Leitmärkte zu entwickeln und die Organische Elektronik mit weiteren Anwendungsbranchen zu vernetzen.

Die organische und großflächige Elektronik umfasst organische Halbleiter und andere Funktionswerkstoffe, die bei niedrigen Temperaturen hergestellt werden. Neue Produktionsverfahren, wie z. B. Dünnschichttechnologien in Kombination mit Rollendruckverfahren, ermöglichen eine kostengünstige und umweltschonende Fertigung

(opto-) elektronischer Komponenten. So entstehen miniaturisierte, flexible Bauteile, die die Grundlage für neue Märkte bilden. Dabei sind vier Themengebiete zu adressieren, in denen die Basistechnologien genutzt werden:

- Beleuchtung
- Organische Photovoltaik
- Gedruckte Elektronik
- Integrierte intelligente Systeme, Displays

An der Schwelle zum Markteintritt befinden sich vor allem Anwendungen in der Photonik. Diese müssen vorangetrieben werden, um in der Folge weitere Gebiete zu erschließen und die Wertschöpfungsketten der Organischen Elektronik in Deutschland erfolgreich auszubauen.

Für die genannten Anwendungsfelder können eine Reihe von Fragestellungen benannt werden, die übergreifend und synergetisch die technologische Basis für das gesamte Themenfeld bilden. Applikationsübergreifende Herausforderungen ergeben sich bei den funktionellen Basismaterialien, bei Prozess- und Fertigungstechnologien, die geeignet sind, um (opto-) elektronische Bauelemente in großem Maßstab und mit hoher Ausbeute herzustellen, sowie bei Simulationsmodellen und -verfahren, um funktionale Schaltungen und Bauelemente auf Basis der neuen Materialien zu entwickeln. Erforderliche FuE-Arbeiten hierzu betreffen u. a. Ladungstransport und Dotiermaterialien, leitfähige transparente Materialien sowie Strukturierungsverfahren.

Eine Zukunftsvision: Transparente OLED-Fenster, Quelle: OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Organische Leuchtdioden (OLEDs)

Zu den wichtigsten Anwendungen der organischen und großflächigen Elektronik zählen organische Leuchtdioden für die energieeffiziente Beleuchtung. Da die Bandlücke in organischen Halbleitern über einen großen Bereich frei einstellbar ist, können OLEDs beliebiger Farben erzeugt werden. Durch Mischen oder Stapeln der Emitter lassen sich prinzipiell beliebige Farbtemperaturen einstellen. Da OLEDs flächig emittieren und im abgeschalteten Zustand transparent sein können, lassen sich neue Anwendungen realisieren.

OLED-Leuchtmittel – Forschungsarbeiten zielen hier primär auf die Verbesserung der externen Quantenausbeute, der Zuverlässigkeit und der Lebensdauer von OLEDs (oberhalb von 100 Lumen pro Watt bei mehr als 10.000 Stunden Lebensdauer) bei hohen Helligkeitswerten (oberhalb von 5000 Candela pro Quadratmeter), z. B. durch eine entsprechende Stack-Entwicklung. Darüber hinaus werden integrierte Lösungen für starre und flexible OLEDs auf Systemebene, einschließlich einer effizienten Ansteuerelektronik und einer zuverlässigen Verkapselung, sowie standardisierte Testverfahren benötigt.

Leistungsfähige Ausgangsmaterialien – Zur Realisierung effizienter OLED-Bauelemente müssen FuE-Arbeiten u. a. zu hocheffizienten (insbesondere zu tiefblauen, auch für die Displaytechnik geeigneten) Emittern, Ladungstransport- und Injektionsmaterialien sowie Werkstoffen, die entweder für eine sehr schnelle, lösungsmittelbasierte Verarbeitung oder für die Abscheidung im Vakuum optimiert sind, durchgeführt werden. Materialien mit höherer Leitfähigkeit, die dickere Schichten ermöglichen, und kostengünstige Dünnschichtverkapselungen müssen entwickelt werden. Perspektivisch sind umgebungsluftbeständige OLED-Werkstoffe zu adressieren. FuE-Bedarf besteht zudem bei geeigneten Materialien (Trägerfolien und Barriereschichten) für flexible und transparente Bauteile sowie bei Analysemethoden für Materialeigenschaften, die einen analytischen Zusammenhang zwischen Materialstruktur und optoelektronischen Eigenschaften herstellen und so das Auffinden neuartiger OLED-Werkstoffe unterstützen.

Produktionsprozesse für die kostengünstige OLED-Fertigung – FuE-Arbeiten zielen insbesondere auf neue Verfahren für die Gasphasenabscheidung von OLEDs, die Herstellungskosten unterhalb von 100 Euro pro Quadratmeter ermöglichen, sowie auf neuartige Laminier- und Druckverfahren zur Herstellung starrer und flexibler OLED-Paneele. Neben der homogenen, industriekompatiblen Abscheidung der Funktionsschichten fällt hierbei der Erforschung der In-Line-Prozesskontrolle sowie der Bereitstellung prozessbeteiligter Materialien und Substrate eine besondere Bedeutung zu.

Es werden starke Synergien der OLED-Entwicklung mit anderen Gebieten der Organischen Elektronik erwartet. Werkstoffe und Verkapselungslösungen aus der OLED-Beleuchtung können beispielsweise im Bereich Displays und Signalgebungs- bzw. Leitsysteme Verwendung finden. Diese Synergien sollen erschlossen werden.

Organische Photovoltaik (OPV)

Organische Solarzellen lassen sich mittels Dünnschichttechnologien auf Basis verschiedener Materialkonzepte und Farbstoffe realisieren. Die erreichten Wirkungsgrade sind noch gering und liegen im Bereich von fünf bis acht Prozent. Der Vorteil der OPV liegt vor allem in der Möglichkeit, künftig kostengünstige Solarzellen mit großflächigen Verfahren, z. B. kontinuierlichen Beschichtungsverfahren, auf flexiblen Substraten zu produzieren und die Zellen in verschiedene Produkte zu integrieren. Damit können neue Märkte erschlossen werden, in denen die Eigenschaften „flexibel“ und „robust“ wichtig sind. Perspektivisch werden (teil-) transparente Solarzellen zur Integration in Fenster und Fassaden angestrebt.

Zu den größten Herausforderungen in der OPV gehören die Steigerung der Effizienz sowie deutliche Verbesserungen bei Langzeitstabilität und Herstellungsverfahren. Mittelfristige Ziele sind Effizienzen von 15 Prozent für Zellen bzw. zehn Prozent für Module bei gleichzeitigen Lebensdauern von 15 bis 20 Jahren. Erforderliche FuE-Arbeiten betreffen u. a. photoaktive Materialien mit optimierten Transport- und Absorptionseigenschaften, die Kontrolle und Langzeitstabilität der Nano-Morphologie, Infrarot-Absorber, Tandemzellen und Strukturen für den Lichteinfang. Prozess- und Fertigungstechnologien umfassen u. a. Verfahren für eine homogene und schnelle großflächige Abscheidung (Aufdampfen oder Drucken), die Dünnschichtverkapselung und Laminiertechniken für Barrierenfolien sowie Verfahren zur selektiven Strukturierung.

Gedruckte Elektronik

Die gedruckte Elektronik ermöglicht künftig eine kostengünstige Fertigung elektronischer Bauelemente mittels hocheffizienter Herstellungsverfahren (z. B. kontinuierliche Druck- und Beschichtungsverfahren). Anwendungsfelder sind u. a. die individualisierte Produktkennzeichnung und der elektronische Markenschutz.

Benötigt werden Basiskomponenten wie z. B. Transistoren, Widerstände, Kondensatoren für die Realisierung von Schaltkreisen und logischen Elementen, gedruckte RFIDs (Radio Frequenz Identifikation) und gedruckte Speicher. Erforderliche FuE-Arbeiten umfassen u. a. lösliche halbleitende Materialien als Basis für neue Herstellungsverfahren wie Rolle-zu-Rolle- oder Digitaldruckverfahren, hochleitfähige Werkstoffe, Halbleiter mit hoher Beweglichkeit und Stabilität sowie hochreine Dielektrika. Im Bereich der kostengünstigen, großflächigen Herstellung müssen Massendurchsatz-Verfahren für das Drucken von Mikrostrukturen mit hoher Passgenauigkeit sowie selbstjustierende Verfahren entwickelt werden. Zudem stellt die Erforschung komplexer Logiken eine zentrale Herausforderung dar. Weitere Forschungsfelder sind Entwurfswerkzeuge für organische Schaltkreise sowie Simulationstools für organische Multischichtsysteme.

Integrierte intelligente Systeme, Displays

Die Organische Elektronik schafft wesentliche Voraussetzungen für integrierte intelligente Systeme (ISS – Integrated Smart Systems), d. h. für die Integration verschiedenartiger Funktionalitäten in Bauelementen und Systemen. Produktoptionen umfassen diagnostische Systeme, großflächige Sensoren, intelligente Beleuchtungslösungen und optische Systeme sowie intelligente Verpackungen. Deutschland ist in diesem Bereich technologisch international in der Spitzengruppe. Ein angrenzendes Themenfeld sind innovative Displays. Die organische und großflächige Elektronik ermöglicht flexible Anzeigeelemente und Displays mit sehr geringem Energieverbrauch. Deutschland besitzt

hier gute Marktpositionen bei Materialien und Fertigungsanlagen. Zudem können Marktanteile künftig u. a. im Bereich der E-Paper-Displays erschlossen werden.

Die weitere Entwicklung von ISS erfordert Fertigungsverfahren, die es ermöglichen, bei der Verarbeitung verschiedene Funktionalitäten in einfachen Systemen zusammenzuführen. Perspektivisch sind ausgehend von einzelnen Folien vollständig eigenständige Systeme und multifunktionale, dreidimensionale Bauelemente anzustreben, z. B. auf Basis einer Kombination von Rolle-zu-Rolle- und Spritzgussverfahren. Erforderliche FuE-Arbeiten betreffen u. a. Werkstoffe für die Integration intelligenter neuer Funktionalitäten mit verbesserter physikalisch-chemischer Stabilität sowie die Integration organischer und hybrider elektronischer Systeme. Neue Konzepte für die großflächige Fertigung, wie z. B. die Fertigung und Integration auf Folien, und für die In-Line-Qualitätsprüfung sind ebenfalls zu adressieren.

Mit der FuE-Förderung will das BMBF die Entwicklung von Leitmärkten in der Organischen (Opto-) Elektronik unterstützen. Zu diesem Zweck sollen auch Maßnahmen zur Beseitigung von Innovationsbarrieren gefördert werden. Mögliche Ansätze sind Strukturen für verteilte Produktionsstätten, Demonstrationsprojekte sowie Maßnahmen zur frühzeitigen Standardisierung. Die strategische Kooperation von Unternehmen und Forschungseinrichtungen soll durch Innovationsallianzen gestärkt werden. Dabei wird mit fortschreitender Entwicklung des Themenfeldes eine Kooperation mit anderen Förderschwerpunkten des BMBF, u. a. Neue Werkstoffe und Nanotechnologie, Elektroniksysteme, Mensch-Technik-Kooperation und Kommunikationssysteme, angestrebt.

3.5 Emerging Technologies – Das Frühbeet der Photonik

Gerade aufgrund der gestiegenen Anwendungsbreite zeigt die Photonik heute auch diverse Ansätze einer disruptiven Technologieentwicklung: Neue Konzepte außerhalb der bisherigen Paradigmen technischer Systeme und Fertigungsverfahren schaffen die Grundlage für gänzlich neue Anwendungen optischer Systeme. Die Quantenoptik und maßgeschneiderte photonische Materialien sind zwei Gebiete, auf denen solch kreative Forschung vorangetrieben werden muss. Die Grundlagenforschung in Deutschland auf diesem Gebiet ist exzellent. Das BMBF setzt mit seiner Förderung darauf, diese deutsche Stärke auszubauen und frühzeitig Brücken zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu schlagen.

Deshalb wird die Vernetzung der Verbundforschung (BMBF-Forschungsförderung) mit den Aktivitäten anderer Förderorganisationen (hier insbesondere der Deutschen Forschungsgemeinschaft) und der in den vergangenen Jahren stark gewachsenen Institutslandschaft der Photonik künftig eine noch stärkere Rolle spielen.

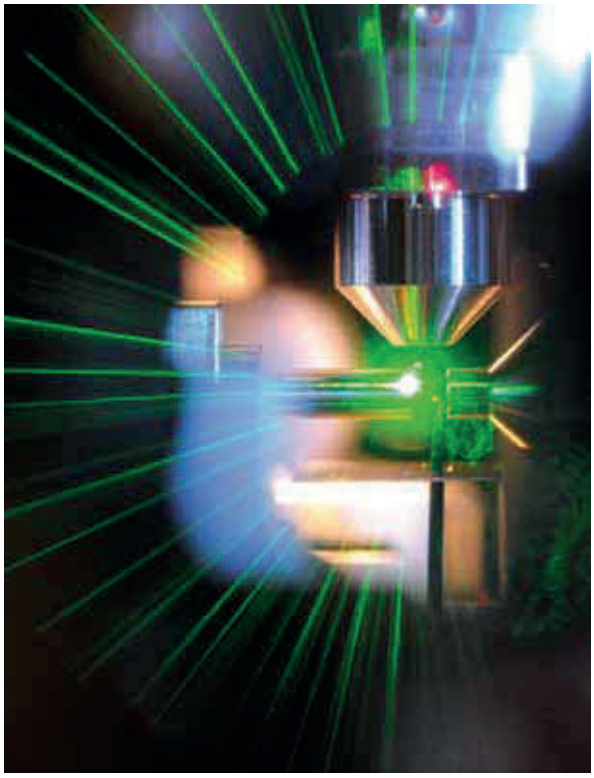
Themen der Grundlagenforschung wie z. B. relativistische und nichtlineare Optik, Höchstfeldlaser, Freie-Elektronen Röntgenlaser (X-FEL) oder Laserfusion werden kontinuierlich beobachtet, um frühzeitig Impulse, die sich für die Projektförderung ergeben, aufnehmen zu können.

Quantenoptik

Die Quantenoptik nutzt die quantenmechanischen Eigenschaften von Licht und Materie gezielt aus, um neuartige, exotische Zustände zu erzeugen und zu manipulieren. Bose-Einstein-Kondensate, verschränkte Photonen, Einzelphotonenquellen und -detektoren sind hierfür Beispiele, die heute im Labor verfügbar sind. Die Quantenschlüsselverteilung für die Kryptographie hat die ersten Schritte zu kommerziellen Anwendungen bewältigt. Sensoren auf der Basis verschränkter Zustände für die Fernerkundung, Atominterferometer zur ultrapräzisen Gravitationsmessung für die Erschließung von Bodenschätzen und Quantenbildgebung sind Anwendungen, die mittelfristig denkbar sind auf dem Weg zu ambitionierten Visionen wie dem Quantencomputer.

Für die Umsetzung der Ideen und Konzepte der Quantenoptik ist es grundlegend, die benötigten Quantenzustände in ausreichender Qualität in kommerzialisierbaren Aufbauten zu erzeugen, zu stabilisieren und zu manipulieren sowie den qualitativen Zusammenhang zwischen der äußeren Umgebung und den störenden Dekohärenzprozessen detailliert zu verstehen. Hierfür sind umfangreiche FuE-Arbeiten erforderlich. Methoden und Verfahren sind grundlegend zu erforschen und bereitzustellen, um sie flexibel für die unterschiedlichen Anwendungen einsetzen zu können.

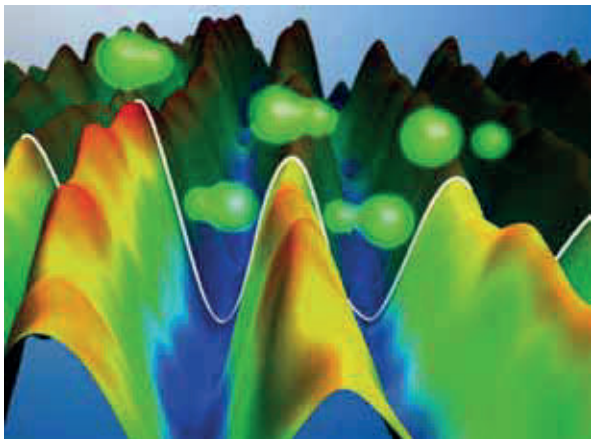
Lichtwellen – Im Bereich der Lichtwellen sind u. a. effiziente und integrierte Quellen nichtklassischen Lichts sowie Detektoren zu erforschen, die über weite Wellenlängenbereiche sehr rauscharm sind. Weiterhin werden neuartige, hocheffiziente Komponenten für die Wellenlängen- und Modenkonversion sowie für die Speicherung optischer Quantenzustände benötigt. Dazu müssen Methoden für die effiziente Übertragung von Quanteninformationen etwa vom Licht zur Übermittlung auf atomare Zustände entwickelt werden. Zudem sind Analysemethoden für die Evaluierung der Komponenten im Hinblick auf die Effizienz, Präzision sowie die Qualität der Verschränkung von Photonen zu adressieren. Die Erhaltung der Quantennatur des Lichts ist in der Quantenoptik eine unabdingbare Notwendigkeit. Dies erfordert Methoden zur effizienten Charakterisierung der Kohärenz.



Ultrakurze Lichtpulse im Attosekundenbereich erschließen neue Zeitskalen für die Beobachtung. Quelle: Max-Planck-Institut für Quantenoptik / Thorsten Naeser

Atomwellen – Für den Bereich der Atomwellen müssen Methoden und Verfahren für die effiziente Manipulation von Atomen mit Laserlicht erschlossen werden. Dazu gehören Methoden zur absolut sicheren Kontrolle von Laserstrahlen innerhalb der Vakuumzelle, in der sich das atomare Ensemble befindet. Phasen- und Frequenzstabilität, Strahlprofil, Wellenfrontqualität, Intensität, Polarisation und Pulsdauer müssen extrem gut kontrolliert werden können. Hierfür sind Lasersysteme notwendig, die Licht bei vielen verschiedenen Wellenlängen mit schmaler Linienbreite und hoher Intensität zuverlässig und gut kontrollierbar liefern können. Die für einen kompakten atominterferometrischen Sensor – möglichst einen „Atomchip" – notwendigen Technologien müssen entwickelt werden. FuE-Bedarf besteht u. a. bei miniaturisierten Vakuumzellen mit Optiken höchster Güte, effizienten Abschirmungen von Magnetfeldern, sogenannten Atomlasern sowie bei geeigneten Feldkonfigurationen für geführte Atomwellen.

Theoretische Methoden – Die Methoden und Verfahren der Licht- und Atomwellen müssen ergänzt werden durch das Erschließen theoretischer Grundlagen. Benötigt werden effiziente Methoden zur Beschreibung der Dynamik multikomponentiger Quantensysteme und zum Auffinden von Grund- und thermischen Zuständen solcher Systeme. Methoden zur Vermeidung der Dekohärenz und des Verlustes von Verschränkung sowie zur Stabilisierung von Quantensystemen sind zu erforschen. FuE-Bedarf besteht weiterhin bei praxisrelevanten Algorithmen für die Quanteninformationsverarbeitung. So müssen z. B. die abstrakten Sicherheitsbeweise für die Quantenkryptographie auf realistische Situationen übertragen werden.

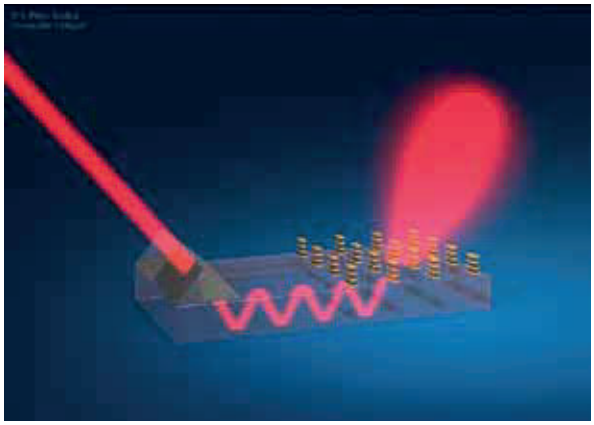


Ein Blick ins Innere von Molekülen, Quelle: Ludwigs-Maximilians-Universität München / Christian Hackenberger

FuE-Arbeiten sollen darauf zielen, geeignete Bauelemente und Komponenten zu identifizieren und ihre Effizienz und Zuverlässigkeit zu verbessern. Zudem bedarf es der Bereitstellung einer leistungsfähigen und hocheffizienten Messtechnik insbesondere auch für die metrologische Charakterisierung der Komponenten selbst.

Maßgeschneiderte photonische Materialien

Maßgeschneiderte photonische Materialien werden auf einer Skala im Bereich der Lichtwellenlänge oder sogar darunter strukturiert. Sie bestehen aus Dielektrika, Metallen oder Polymeren. Schon heute verfügbare Beispiele sind photonische Kristalle und Metamaterialien. Künftig können z. B. kompakte Buntlicht- oder Weißlichtlaser und nanostrukturierte Metalle als plasmonische Elemente für die Analytik in den Lebenswissenschaften, für Solarzellen und LEDs erschlossen werden. Perspektivische Anwendungen umfasssen u. a. Linsen aus Metamaterialien mit idealen Abbildungseigenschaften und sogenannte „optische Tarnkappen“ für makroskopische Gegenstände. Forschungsbedarf besteht sowohl bei den Wirkprinzipien und Materialsystemen, als auch hinsichtlich neuer Designs für mikro- und nanostrukturierte Komponenten und Methoden der Herstellung für neue Funktionalitäten.



Nanoantennen-Array mit Lichtleiter, Quelle: 4. Phys. Institut, Universität Stuttgart

Wirkprinzipien und Materialsysteme – Forschungsarbeiten sind u. a. zu richten auf ein tieferes Verständnis der Nichtlinearitäten im Bereich der Plasmonik und der Metamaterialien sowie der Ankopplung von Quantenemittern an optische Antennen. Die weitere Entwicklung verfügbarer und die Erforschung neuer Materialien und Technologien, wie z. B. hoch dotiertes Indiumzinnoxid (ITO), Siliziumcarbid (SiC), „Schwarzes Silizium“, photonische Kristallfasern und photonische Kristall-Mikrokavitäten, sind ebenfalls zu adressieren.

Fertigungsverfahren – FuE-Bedarf besteht bei neuen Fertigungsverfahren, mit denen Strukturgrößen im einstelligen Nanometerbereich realisiert werden können. Mögliche Ansätze umfassen u. a. neuartige bottom-up Techniken wie DNA-Template oder Selbstorganisation. Des Weiteren müssen reproduzierbare und industrietaugliche Fertigungsprozesse entwickelt werden. FuE-Arbeiten sollen auf die großflächige Herstellung mikro- und nanostrukturierter photonischer Materialien wie z. B. dreidimensionale photonische Kristalle und Metamaterialien zielen. Zudem ist die Kopplung photonischer und elektronischer Eigenschaften für optoelektronische Funktionen zu erforschen.

Der Quantenoptik und maßgeschneiderten photonischen Materialien wird mittel- bis langfristig eine große strategische Bedeutung für die Entwicklung der Photonik in Deutschland zufallen. Weitere Themengebiete der explorativen Forschung, die eine Verwertbarkeit für neue Technologien versprechen, sollen – auch im Zusammenspiel der Förderorganisationen – identifiziert und aufgegriffen werden.

4. Kooperation und Förderverfahren

Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Photonik haben in der Agenda Photonik 2020 dargestellt, welche Chancen die Photonik bietet. Das BMBF will das Innovationssystem der Photonik so weiterentwickeln, dass diese Chancen optimal genutzt werden können. Dabei geht es in den kommenden Jahren verstärkt darum, Partner der Photonik zu gewinnen und einzubeziehen:

- bei Grundlagenforschung und FuE-Infrastruktur,
- für Ausbildung und Nachwuchs,
- für Unternehmensgründungen, die Aktivierung von privatem Investitionskapital und die Einbindung von kleinen und mittleren Unternehmen
- sowie für die Erschließung neuer Anwendungsmärkte.

Das BMBF wird dazu die folgenden Plattformen bereitstellen und unterstützen.

4.1 Projektförderung

Unternehmen und Forschungseinrichtungen wird mit dem Mittel der Projektförderung eine finanzielle Unterstützung für die Durchführung ihrer gemeinsamen Forschungsvorhaben gewährt. Mit der Förderung von FuE-Vorhaben zwischen mehreren Beteiligten sollen künftig verstärkt zwei Ziele erreicht werden: die Vorbereitung von Partnerschaften zwischen der Photonik und ihren Anwendern im Vorfeld neuer Leitmärkte und die Erschließung neuer Themen der Photonik an der Grenze zwischen akademischer Grundlagenforschung und industrieller Anwendung.

4.1.1 Partnerschaften für neue Leitmärkte

Das BMBF wird seine FuE-Förderung verstärkt auf industriegeführte Vorhaben in solchen Gebieten und Themen ausrichten, mit denen begleitend und nachfolgend Investitionen in Deutschland verbunden sind. Das heißt: Im Vordergrund stehen – auch künftig – das Forschungsrisiko und die Innovationshöhe. Für die Auswahl der Projekte und für die Bildung der Konsortien wird aber verstärkt der Aspekt der Umsetzung in den Vordergrund treten, weil und soweit die Photonik zu einer Schlüsseltechnologie mit strategischer Bedeutung in Wachstumsmärkten wird. Hierzu stehen folgende Förderverfahren zur Verfügung (siehe dazu auch www.hightech-strategie.de):

Industrielle Verbundprojekte – Das wichtigste Instrument zur Unterstützung eines schnellen Technologietransfers sowie zum Aufbau von Kooperationen ist die Verbundforschung. Gefördert werden grundlegende Forschungsarbeiten, die gekennzeichnet sind durch ein hohes wissenschaftlich-technisches Risiko. Sie sollen an der Innovations- und Wertschöpfungskette entlang auf konkrete Anwendungen und Leitmärkte ausgerichtet werden. In diesen Verbundprojekten arbeiten die zur Lösung der jeweiligen Problemstellung erforderlichen Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Projekte sollen durch die Industrie geführt und koordiniert werden. Um insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) den Zugang zur Forschungsförderung spürbar zu erleichtern, werden im Rahmen von „KMU-innovativ“ (www.kmu-innovativ.de) anwendungsnahe Verbundprojekte zwischen KMU und Forschungseinrichtungen gefördert. Ein zentraler Lotsendienst hilft dabei in allen Fragen weiter, und durch die vereinfachte Bonitätsprüfung haben auch kleine bzw. in der Aufbauphase befindliche Unternehmen eine Chance.

Gründungsoffensive GO-Photonik – Zur Unterstützung von Unternehmensgründungen sollen im Rahmen einer Gründungsoffensive GO-Photonik in besonderer Weise Ausgründungen und junge Unternehmen gefördert werden. Im Zuge von Einzelvorhaben sollen Unternehmen einen wirtschaftlichen Erfolg versprechenden Forschungsansatz verfolgen und auf diese Weise das wirtschaftliche Potenzial einer Erfindung oder eines innovativen Lösungsansatzes schnell erschließen können.

Innovationsallianz – Im Vordergrund dieser strategischen Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft steht die Ausrichtung auf einen bestimmten Anwendungsbereich oder Zukunftsmarkt sowie die Selbstverpflichtung der Unternehmen auf Vorstandsebene zu zusätzlichen Investitionen. Zielmarke ist: Ein Euro des Bundes für fünf Euro der Wirtschaft. Innovationsallianzen entfalten so eine besondere volkswirtschaftliche Hebelwirkung. Das ist auch für KMU von zentraler Bedeutung, da das Wissen um künftige technologische Entwicklungen

sowie das Engagement von Großunternehmen das hohe Risiko bei FuE-Investitionsentscheidungen planbarer machen.

Leitmarktinitiative – Die schnelle und breite Markteinführung neuer Technologien wird oft durch spezifische Diffusionshemmnisse verzögert. Um diese zu identifizieren und zu überwinden, bringt das BMBF im Rahmen von Leitmarktinitiativen alle erforderlichen Akteure zusammen und unterstützt mit gezielten Demonstrationsprojekten die Erschließung neuer Leitmärkte.

Regionale Kooperationen – Die Förderung regionaler Kooperationen zur Konzentration innovativer Akteure wird aufbauend auf vorhandener Expertise und Struktur neue Impulse für eine verstärkte Bündelung der Kräfte von Wissenschaft und Wirtschaft geben. Wissenschaftliche Einrichtungen und vor allem auch Unternehmen sollen künftig in den Regionen noch enger zusammenrücken und die Potenziale ihrer Zusammenarbeit besser nutzen. Dezentral vorhandene und insbesondere auch interdisziplinäre Expertise wird besser verfügbar gemacht. Mit der Förderung regionaler Kooperationen soll aufbauend auf vorhandenen Kompetenzen die Grundlage für eine langfristige Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungsketten der Photonik gelegt werden.

Neben den hier genannten technologiespezifischen Instrumenten bieten angrenzende Forschungs- und Technologieprogramme des BMBF sowie technologieübergreifende Programme im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung weitere Unterstützung. Informationen dazu sind im Anhang dieses Programms zusammengestellt.

4.1.2 Erschließung neuer Themen

Wissenschaftliche Vorprojekte – Völlig neue Ergebnisse aus der Grundlagenforschung sind hinsichtlich ihres späteren Marktpotenzials oft kaum zu beurteilen. Es besteht somit die Notwendigkeit, durch wissenschaftlich-technische Vorarbeiten eine Grundlage zu schaffen, die eine Bewertung ermöglicht, welches Potenzial in der neuen Erfindung bzw. der neuen wissenschaftlichen Erkenntnis steckt. Insbesondere Zukunftsfelder mit strategischer Bedeutung für die Photonik sollen so erschlossen werden. Oft muss dabei schnell reagiert werden, denn je früher den interessierten Unternehmen die Bedeutung des neuen Themas plausibel gemacht werden kann, desto eher werden diese in das neue Thema investieren und versuchen ihre Marktchancen zu nutzen. Zu diesem Zweck können auch „Wissenschaftliche Vorprojekte“ (WiVoPro) als Einzelvorhaben einer Hochschule oder außeruniversitären Forschungseinrichtung zur Durchführung grundlegender Arbeiten mit einem begrenzten zeitlichen und finanziellen Rahmen gefördert werden.

Vorlaufforschung in Forscherverbünden – Ausgewählte Themenstellungen aus der Grundlagenforschung können als wissenschaftliche Projekte gefördert werden, die in Forscherverbünden zwischen Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen durchgeführt werden. Aufgabe der Forscherverbünde ist die Aufbereitung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse im Vorfeld von anwendungs- und industrieorientierten Projekten im Sinne von Vorlaufforschung. Wichtiges Ziel ist dabei auch die frühzeitige Sicherung von Schutzrechten.

Industry on Campus – Vor dem Hintergrund sich rasant verkürzender Innovationszyklen gewinnt die langfristig angelegte, institutionalisierte Kooperation von Wissenschaft und Wirtschaft weiterhin an Bedeutung. Mit „Industry on Campus“-Projekten soll diese Zusammenarbeit von Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft zur Durchführung längerfristig angelegter und strategisch-orientierter Forschungsprojekte unterstützt werden. Im Kern soll dadurch eine neue, intensive Zusammenarbeit von Forschern beider Partner ermöglicht werden. Durch die tägliche Zusammenarbeit werden aktuelle Fragestellungen aus verschiedenem Blickwinkeln analysiert, so dass ein beschleunigter Technologieaustausch zwischen grundlagenorientierter und anwendungsorientierter Forschung möglich wird.

4.2 Photonik-Finanzforum

Die Umsetzung von FuE-Ergebnissen ist ein wesentliches Ziel der Hightech-Strategie. Forschungsergebnisse umsetzen heißt investieren. Neben den unternehmensinternen Entscheidern sind bei Investitionsentscheidungen in der Regel weitere Investoren beteiligt. Diese kommen sowohl aus dem engeren Unternehmensumfeld (Finanzinstitute, Aktionäre etc.), als auch aus dem Kreis professioneller Investoren. Wenn Photonik in Deutschland wachsen soll, dann ist es wichtig, deren Chancen frühzeitig, d. h. bereits in der Forschungsphase, auch in diesem Bereich zu kommunizieren.

Für potenzielle Kapitalgeber und Investoren ist die detaillierte Kenntnis einer Branche und der Technologie ein wesentlicher Faktor zur Risiko- und Chancenbewertung. Diese Bewertung ist ein entscheidender Faktor bei der Umsetzung neuer Technologien, denn sie bestimmt direkt die Finanzierungs- und Versicherungskonditionen. Fehlt sie oder wird sie erst zu spät entwickelt, können Innovationen verzögert oder verhindert werden.

Aus Sicht der öffentlichen Forschungsförderung handelt es sich dabei um das Ziel, den Wettbewerb möglicher Investoren im Anschluss an die FuE-Phase vorzubereiten und zu stärken und damit einen Investorenmarkt zu entwickeln. Da neue Technologien ein erhebliches Know-how auf Seiten der Investoren voraussetzen [22], ist dies – neben der Entwicklung der Märkte für Technologieinvestitionen, die im Rahmen der Finanzmarkt- und Innovationspolitik betrieben wird – auch eine Herausforderung für das BMBF-Programm „Photonik Forschung Deutschland“.

Die Photonik wird als Querschnittstechnologie und Hightech-Branche mit wachsender Bedeutung von Wirtschaftsforschungsinstituten, Analysten- und Bankhäusern zunehmend wahrgenommen. [23] Für die Umsetzung in Deutschland ist es wichtig, diesen Prozess zu unterstützen und so voranzutreiben, dass Deutschland als Standort für Investitionen in die Photonik sichtbar und zugänglich wird. Es wäre dazu u. a. hilfreich, wenn vorhandene Einzelstudien und Datenauswertungen zu einem übergreifenden, regelmäßigen Photonik-Branchenreport weiterentwickelt würden.

Dies ist keine Aufgabe des Staates, sondern eine Aufgabe der Photonik-Community insgesamt und insbesondere ihrer Verbände in Wirtschaft und Wissenschaft. Das BMBF ist jedoch bereit, derartige Bemühungen in angemessener Weise zu unterstützen, etwa durch Bereitstellung von Daten oder durch die Beteiligung an neutralen, wissenschaftlich fundierten Strategien der Fachinformation über die Photonik. Denn der Aufbau eines konstruktiven Dialogs zwischen der Photonik-Community und Investoren dient der Verbesserung der Umsetzungschancen für Forschungsergebnisse am Standort Deutschland. Das BMBF bietet, über den Kreis der Zuwendungsempfänger hinaus, künftig auch professionell agierenden, fachlich kompetenten Investoren einen Dialog an.

Unternehmensgründern stehen darüber hinaus die im Anhang vorgestellten Instrumente der Bundesregierung sowie der Wissenschaftsorganisationen und der Regionen zur Verfügung.

4.3 Photonik in Europa

Die Herausforderungen des globalen Wettbewerbs an unser Wissenschafts- und Innovationssystem bedingen die Einbeziehung der europäischen und internationalen Dimension in die nationale Forschungs- und Technologiepolitik. Das BMBF hat sich frühzeitig und erfolgreich dafür eingesetzt, dass die Photonik zu einem wichtigen Element in der europäischen Forschungspolitik wird. In der Europäischen Technologieplattform Photonics21 mit heute mehr als 1.600 Partnern wurde eine gemeinsame europäische Strategie auf dem Gebiet der Photonik entwickelt. Die Photonik hat damit ihren Platz im europäischen Forschungsraum gefunden. Die EU-Kommission zählt die Photonik mittlerweile zu den fünf „Key Enabling Technologies“ für Europa und sieht darin den wichtigsten technologischen Wachstumsbereich in den kommenden zehn Jahren. [24]

[22] s. dazu zusammenfassend: Andrea Schertler, Path Dependencies in Venture Capital Markets, Juli 2002 (Kiel Working Paper Nr. 1120), S. 29, papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=318907

[23] Institut der deutschen Wirtschaft Köln Consult GmbH (Hrsg.): Deutschlands Zukunftsbranchen – Empirische Bestandsaufnahme und Ableitung eines Rankings, Köln, 2009, sowie Josef Auer, Deutsche Bank Research (Hrsg.): Licht bei der Arbeit, Frankfurt, 2010

[24] High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies (Hrsg.): Mid-term Working Document, Februar 2011

In einem Europa ohne Grenzen müssen Forschung und Entwicklung zunehmend auch gemeinschaftlich vorangebracht werden. Nationale Anstrengungen zur Entwicklung neuer Leitmärkte müssen auf europäischer Ebene flankiert werden. Eine stärkere Beteiligung deutscher Unternehmen und Forschungseinrichtungen an europäischen Forschungsprojekten bietet dabei neue Chancen, da sie

- komplementäres Wissen und Know-how verfügbar macht und zugleich Zugang zu den besten Fachkräften und Spezialisten aus anderen Mitgliedsstaaten schafft,
- neue Märkte für deutsche Produkte in Europa erschließt
- und letztlich auch Zugang zu zusätzlichen Finanzmitteln durch EU-Förderung ermöglicht.

Die Technologieplattform Photonics21 steht heute Unternehmen und Forschungseinrichtungen zur Verfügung, um gezielt Informationen zu finden, europaweite Kontakte zu knüpfen, Kooperationen zu schließen und europaweit Synergien zu nutzen. Mit dem europäischen Forschungsrahmenprogramm oder mit spezifischen transnationalen Maßnahmen können europaweite Forschungsvorhaben im Bereich der Photonik gefördert werden.

Aufgrund seiner Impulse auf der europäischen Ebene konnte und kann Deutschland von dieser Entwicklung profitieren. So erreichen mehr als 30 Prozent der von der EU auf dem Gebiet der Photonik zur Verfügung gestellten Fördermittel deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Dies stärkt nachhaltig die Photonik-Forschung in Deutschland. Gleichzeitig soll Deutschland zu einer ersten Adresse für die besten Forscherinnen, Forscher und Studierenden aus aller Welt werden.

Das BMBF wird die nationalen und europäischen Fördermaßnahmen für die Photonik auch weiterhin eng verzahnen. Im laufenden, siebten Forschungsrahmenprogramm der EU-Kommission nutzt das BMBF dafür vor allem die ERA-NET-Maßnahmen und das ERA-NET Plus Programm der Europäischen Kommission. So wird derzeit ein ERA-NET Plus im Bereich der optischen Kommunikation gestartet. Für ein weiteres ERA-NET Plus im Bereich der Organischen (Opto-) Elektronik hat das BMBF seine Teilnahmebereitschaft bekundet. Für die Förderung in diesem Bereich existiert bereits seit 2009 eine gemeinsame Strategie von EU-Kommission und BMBF. Im geplanten achten Forschungsrahmenprogramm der EU für die Jahre 2014 bis 2020 wird das BMBF die europäische Förderung auf Basis der vorliegenden Programmatik auch weiterhin aktiv mitgestalten.

4.4 Photonik Campus Deutschland

Forschung und Innovation brauchen den Dialog mit der Gesellschaft. Die Akzeptanz neuer Anwendungen, die Nachfrage nach neuen Produkten und Investitionen am Hightech-Standort Deutschland werden wesentlich von der Wahrnehmung der Chancen der Photonik beeinflusst. Daher ist es ein wichtiger Bestandteil des Programms, über Photonik zu informieren und die Forschungsanstrengungen hierzu zu erläutern und zu erklären.

Dies gilt in besonderer Weise für den Nachwuchs. Eine mittelständisch orientierte, forschungsintensive Hightech-Branche wie die Photonik, mit hohem Innovationsdruck und wissensintensiven Produktionsprozessen, ist von einem möglichen Fachkräftemangel besonders stark betroffen. Der akademische Anteil der Beschäftigten in der Photonik-Branche beläuft sich auf über 20 Prozent. Dieser Wert liegt etwa zweieinhalbfach über dem Durchschnitt der gewerblichen Wirtschaft in Deutschland. Für die Photonik-Branche ergibt sich ein Ersatz- und Expansionsbedarf allein von etwa 9.000 akademisch ausgebildeten Beschäftigten bis zum Jahr 2015. Sie muss deshalb besondere Antworten auf die demografische Entwicklung finden. Aber auch die Forschungspolitik muss sich dieser Aufgabe stellen: Ohne entsprechend qualifizierten – und interessierten – Nachwuchs sind Forschung und Innovation in der Photonik in Deutschland insgesamt erschwert oder gefährdet. Gerade ein junges Technologiefeld wie die Photonik steht hier vor einer erheblichen Herausforderung, weil z. B. Firmen- und Markennamen jungen Menschen nicht bereits aus dem Alltag bekannt sind. Zudem verfügt eine stark mittelständisch geprägte Branche in der Wachstumsphase auch nicht über die gleiche Erfahrung und Struktur für die Nachwuchsarbeit und Hochschulkooperation, wie das bei Großunternehmen der Fall ist.

Daher spielen die Themen „Kommunikation über Photonik“ und „Rekrutierung von Nachwuchs“ auch eine besondere Rolle in der Agenda Photonik 2020. Dabei ist festzustellen, dass Forschungspro-

jekte an Hochschulen oder Instituten immer auch der Ausbildung von Studierenden, Bachelor-, Master- und Promotionskandidaten dienen, und zwar in direktem Kontakt zu Unternehmen. Insofern ist die Projektförderung des BMBF heute bereits ein gutes Stück Bildungsprogramm. Sie soll zukünftig noch stärker in Richtung Rekrutierung von Nachwuchs und Weiterentwicklung des Studienangebotes genutzt werden. Hierzu sollen gemeinsame Strategien von Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Verbänden entwickelt werden.

Unter dem Motto „Photonik Campus Deutschland“ sollen deshalb die Anstrengungen von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik gebündelt werden. Diese gemeinsame Plattform soll drei konkrete Ziele verfolgen:

- „open photonics“-Initiative: Die Photonik soll sich für möglichst viele technikinteressierte und -affine Jugendliche mit der Erfahrung „selber machen“ verbinden. Ähnlich wie offene Hard- und Software-Initiativen in der Informations- und Kommunikationstechnik vielfach den Einstiegspunkt in eine professionelle Befassung – Studium, Berufswahl, Unternehmensgründung – bilden, können preiswerte und standardisierte Photonik-Bauelemente einen eigenständigen und kreativen Zugang zur Zukunftstechnologie Photonik erleichtern. Die „open photonics“-Initiative soll von Beginn an stark auf soziale Prozesse und Medien setzen und zu einschlägigen Technologieplattformen der Elektronik anschlussfähig sein.

- Angebote der Photonik im Bereich Sekundarstufe und Grundstudium mit dem Ziel, die Photonik im Umfeld der Studien- und Berufswahl verstärkt zu positionieren

- Angebote im Postgraduiertenbereich mit dem Ziel, besonders qualifizierte Nachwuchskräfte verstärkt auch international für den Forschungsstandort Deutschland zu gewinnen

In den genannten Zielbereichen geht das BMBF davon aus, dass es zu gemeinschaftlich getragenen Maßnahmen mit den Forschungseinrichtungen, Verbänden und Unternehmen der Photonik in Deutschland kommt, an denen sich das BMBF im Rahmen seiner Zuständigkeiten und eigenen Ziele beteiligen wird. Die gemeinsam zu entwickelnden Maßnahmen sollen auf Beiträge weiterer Partner eingehen und Förderinstrumente, die an anderer Stelle zur Verfügung stehen – z. B. das Deutschlandstipendium des BMBF – berücksichtigen und verstärken.

5. Operative Umsetzung des Programms

5.1 Laufzeit und Fördermittel

In der Agenda Photonik 2020 hat die Wirtschaft die Absicht bekräftigt, die eigenen FuE-Aufwendungen in Deutschland im Zeitraum 2010 bis 2020 zu verdoppeln. Das BMBF begrüßt dieses Bekenntnis zum Hightech-Standort Deutschland. Es wird sich als Partner der Photonik am Ausbau der Photonik-Forschung in diesem Zeitraum mit vergleichbarer Dynamik beteiligen. In der mittelfristigen Finanzplanung (2012 – 2015) sind davon insgesamt 410 Mio. € wie folgt veranschlagt:

2012	2013	2014	2015
105	105	100	100

Fördermittel in Mio. €

Die Mittel stehen unter dem Vorbehalt der Haushaltsentscheidungen des Deutschen Bundestages. Ein Rechtsanspruch auf Förderung besteht grundsätzlich nicht.

5.2 Förderinstrumente und Finanzierung

Zentrales Instrument ist die finanzielle Unterstützung von FuE-Projekten, die gekennzeichnet sind durch ein hohes wissenschaftlich-technisches Risiko und eine Verwertungsperspektive in Deutschland aufweisen. Je nach Zielsetzung der jeweiligen Fördermaßnahme werden die Projekte im Verbund zwischen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft oder auch als Einzelvorhaben durchgeführt. Die Arbeiten von Industriepartnern innerhalb solcher Projekte müssen dabei dem vorwettbewerblichen Bereich zugeordnet sein und deutlich über einzelwirtschaftliche Interessen hinausgehen. Die Umsetzungsorientierung der Projekte wird bei der Antragsstellung durch einen Verwertungsplan dokumentiert, der während der Projektlaufzeit fortgeschrieben wird. Die Laufzeit der geförderten Vorhaben wird in der Regel drei Jahre betragen.

Die Höhe der Förderung richtet sich nach der FuE-Intensität der Arbeiten und kann

- bis zu 100 Prozent für die FuE-Kategorie „Grundlagenforschung“,
- bis zu 50 Prozent für die FuE-Kategorie „Industrielle Forschung“ und
- bis zu 25 Prozent für die FuE-Kategorie „Experimentelle Entwicklung“

betragen. Den FuE-Kategorien werden die Definitionen des Gemeinschaftsrahmens für staatliche Beihilfen für Forschung, Entwicklung und Innovation der Europäischen Union [25] zugrunde gelegt. Werden Teile der Arbeiten eines Vorhabens unterschiedlichen FuE-Kategorien zugeordnet, wird die Förderquote für das Vorhaben entsprechend der jeweiligen Anteile der einzelnen FuE-Kategorien gebildet.

Für KMU kann auf die Förderquote ein Bonus in Höhe von zehn Prozentpunkten aufgeschlagen werden.

Bei Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft wird eine angemessene Eigenbeteiligung von mindestens 50 Prozent der entstehenden zuwendungsfähigen Kosten vorausgesetzt. Darüber hinaus wird erwartet, dass sich Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft im Rahmen industrieller Verbundprojekte entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit an den Aufwendungen der Hochschulen und öffentlich finanzierten Forschungseinrichtungen angemessen beteiligen, sofern letztere als Verbundpartner mitwirken.

Im Rahmen dieses Programms kann einem Unternehmen, das einer Rückforderungsanordnung aufgrund einer früheren Entscheidung der Europäischen Kommission zur Feststellung der Rechtswidrigkeit und Unvereinbarkeit einer Beihilfe mit dem gemeinsamen Markt nicht Folge geleistet hat, keine Zuwendung gewährt werden.

[25] Amtsblatt Nr. C 323/1 vom 30.12.2006

5.3 Verfahren und Förderkriterien

Die Schwerpunktsetzung erfolgt durch die Veröffentlichung von Förderthemen in Form von Bekanntmachungen im Bundesanzeiger sowie deren Verbreitung im Internet auf den Seiten des BMBF. Mit diesen Bekanntmachungen werden die Fördermodalitäten bzw. -regularien verbindlich festgelegt.

In einem zweistufigen Verfahren können zunächst Skizzen für Verbundprojekte bei dem beauftragten Projektträger eingereicht werden. Die eingereichten Projektvorschläge stehen im Wettbewerb. Das BMBF und die Projektträger behalten sich vor, sich bei der Auswahl der zu fördernden Projektvorschläge themenspezifisch durch einen unabhängigen Gutachterausschuss beraten zu lassen. Die der Bewertung und Auswahl zugrunde gelegten Kriterien werden in den Bekanntmachungen der jeweiligen Fördermaßnahme veröffentlicht.

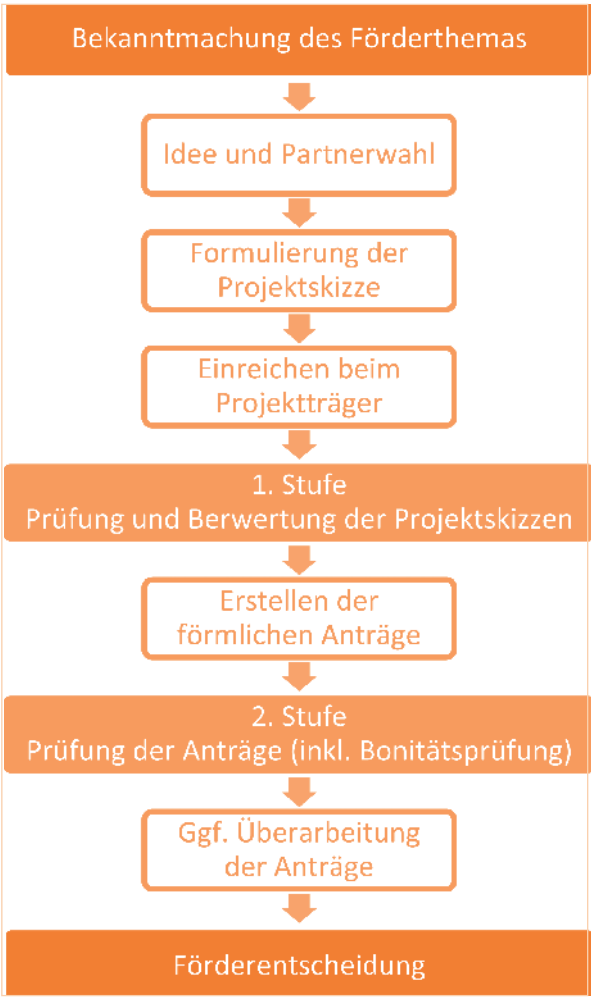
In der zweiten Stufe des Auswahlverfahrens werden die Konsortien der Projektvorschläge mit hinreichend hoher Priorität zur Vorlage eines förmlichen Förderantrages aufgefordert. Der Antrag eines Verbundprojektes besteht grundsätzlich aus einer gemeinsamen Verbundbeschreibung und fachlich-administrativen Teilen der Verbundpartner.

Für die Förderung gelten die Grundsätze der Projektförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung:

- Für Zuwendungen auf Ausgabenbasis sind dies die Allgemeinen Nebenbestimmungen für Zuwendungen zur Projektförderung (ANBest-P) und die Besonderen Nebenbestimmungen für Zuwendungen des BMBF zur Projektförderung auf Ausgabenbasis (BNBest-BMBF 98).

- Für Zuwendungen auf Kostenbasis sind dies die Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des BMBF an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (NKBF 98).

Diese Zuwendungsbestimmungen werden durch das BMBF im Internet unter www.kp.dlr.de/profi/easy/formular.html zugänglich gemacht.



Ablauf des zweistufigen Entscheidungsverfahrens

5.4 Evaluation und Fortentwicklung des Programms

Die strategische Konzeption des Programms Photonik Forschung Deutschland ist auf eine Laufzeit bis 2021 angelegt. Aufgrund der dynamischen Entwicklung der Photonik sowie zu erwartender Veränderungen der ökonomischen und technisch-wissenschaftlichen Rahmenbedingungen sind ein stetiges Monitoring sowie eine Fortentwicklung des Programms erforderlich. Durch eine schnelle, ständige Anpassung an die wissenschaftlich-technischen Entwicklungen und eine Orientierung an den Leitmärkten wird dieser Dynamik Rechnung getragen. Das Programm ist daher angelegt als offener, lernender Handlungsrahmen. Neue Themenfelder können so ggf. identifiziert und die jeweilige Ziel-, Aufgaben- und Prioritätensetzung aktualisiert werden.

Basierend auf Bedarfs- und Wirkungsanalysen sollen begleitend die Förderinstrumente weiterentwickelt werden, wenn sich abzeichnet, dass mit den verfügbaren Instrumenten wichtige Impulse nicht gegeben oder notwendige Partner nicht einbezogen werden können. In diesem Kontext wird insbesondere auch die Finanzierung von Innovationen durch die Bereitstellung von Wagniskapital beobachtet. Finanzierungsbeschränkungen gehören zu den großen Hürden im Innovationsprozess, insbesondere für KMU und innovative Gründungen. Der Mobilisierung von Wagnis- und Beteiligungskapital fällt somit eine wichtige Rolle zu.

Durch Technologieanalysen, Foresight-Prozesse sowie Experten- und Fachgespräche werden im Vorfeld von Bekanntmachungen die Fördermaßnahmen dem tatsächlichen Entwicklungsstand in Wissenschaft und Wirtschaft angepasst. Das BMBF wird hierbei durch einen Programmausschuss beraten. Dieser repräsentiert die maßgeblichen Fachbereiche und -partner im wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Umfeld der Photonik.

Den mit dem Agendaprozess Photonik 2020 intensivierten Dialog mit Wissenschaft und Wirtschaft wird das BMBF zur Qualitätssicherung, Fortschreibung und Weiterentwicklung fortführen, um auf technologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen abgestimmt und zeitnah reagieren zu können. Darüber hinaus ist geplant, etwa zur Mitte der Laufzeit erneut ein unabhängiges Audit durchzuführen, so dass Erkenntnisse zu Wirksamkeit, Einbindung der Akteure, Angemessenheit der Instrumente und Zielerreichung in die Fortentwicklung des Programms einfließen können.

6. Ansprechpartner und Informationen

Zentraler Ansprechpartner bei sämtlichen Fragen
zu allen Maßnahmen ist das zuständige Fachreferat
im Bundesministerium für Bildung und Forschung:

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Referat 513
Photonik, Optische Technologien
53170 Bonn

www.bmbf.de

Anhang

A.1 Hightech-Strategie der Bundesregierung: Photonik-Förderung aus einem Guss

Die Photonik-spezifischen Instrumente dieses Programms dürfen nicht isoliert betrachtet werden. Sie sind eng verknüpft mit weiteren Maßnahmen zur Stärkung der Innovationskraft im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung.

Angrenzende Programme des BMBF – Aufgrund der vielfachen Berührungspunkte und des Zusammenwirkens der Photonik mit anderen Schlüsseltechnologien ergibt sich die Notwendigkeit einer technologieübergreifenden, koordinierten Vorgehensweise. Eine solche abgestimmte Förderpolitik findet im BMBF durch die Bündelung aller Schlüsseltechnologien statt. Synergien sind insbesondere zwischen dem Programm Photonik Forschung Deutschland und den folgenden Förderschwerpunkten zu erwarten:

- Informations- und Kommunikationstechnik
- Neue Werkstoffe und Nanotechnologie
- Elektroniksysteme
- Produktionstechnik
- Zivile Sicherheit
- Mensch-Technik-Kooperation

Instrumente technologieübergreifender Förderprogramme – Als Ideengeber für die Wirtschaft kann die Wissenschaft exzellente Beiträge leisten, denn neue Durchbrüche und Sprunginnovationen entstehen oft aus der akademischen Forschung heraus. Häufig fehlen allerdings die Ressourcen, die wirtschaftliche Nutzbarkeit von Forschungsergebnissen zu prüfen. Für die Wirtschaft ist zu diesem Zeitpunkt das Risiko zu hoch, die Idee bereits aufzugreifen. Das BMBF setzt mit der Maßnahme Validierung des Innovationspotenzials wissenschaftlicher Forschung – VIP hier an und unterstützt Forschungseinrichtungen dabei, Ergebnisse aus der öffentlichen Grundlagenforschung hinsichtlich der technischen Machbarkeit und des wirtschaftlichen Potenzials zu überprüfen und in Richtung Anwendung weiterzuentwickeln. Dadurch wird die Lücke zwischen akademischer Forschung und wirtschaftlicher Verwertung weiter geschlossen und der Wirtschaft werden neue Anschlussoptionen eröffnet. Weitergehende Informationen werden unter www.validierung-foerderung.de bereitgestellt.

Zur Förderung von Innovationen bei KMU wird auch auf das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie verwiesen. Mit diesem technologieoffenen Förderprogramm sollen mittelständische Unternehmen zu größeren Anstrengungen für Forschung, Entwicklung und Innovationen angeregt werden. Weitere Informationen dazu sind unter www.zim-bmwi.de verfügbar.

Unterstützung von Unternehmensgründungen – Da Innovations- und Beschäftigungsimpulse gerade auch von Unternehmensgründungen ausgehen, sind solche Gründungen im Anschluss an die Projektförderung des BMBF erwünscht. Unterstützung bietet hier der High-Tech Gründerfonds der Bundesregierung. Informationen dazu werden bereitgestellt unter www.high-tech-gruenderfonds.de.

Das BMBF unterstützt Unternehmensgründungen auf der Basis neuer Forschungsansätze in den Lebenswissenschaften im Rahmen der Gründungsoffensive GO-Bio. Informationen dazu werden bereitgestellt unter www.go-bio.de.

Das Förderprogramm EXIST des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie strebt eine Verbesserung des Gründungsklimas und die Verbreitung von Unternehmergeist an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen in Deutschland an und soll eine Steigerung der Anzahl technologieorientierter und wissensbasierter Unternehmensgründungen bewirken. Weitere Informationen sind unter www.exist.de abrufbar.

A.2 Photonische Kommunikationsnetze

Der flächendeckende Umbau der kabelgebundenen Telekommunikationsanschlüsse auf Glasfaserverbindungen bis zum Endkunden erzeugt einen starken Anstieg der Nachfrage nach optischen und optoelektronischen Bauelementen und Modulen. Der steigende Bandbreitebedarf ist Motor der Entwicklung photonischer Kommunikationsnetze. Der in der Agenda Photonik 2020 dargestellte Handlungsbedarf wird im Rahmen des Förderschwerpunkts Informations- und Kommunikationssysteme durch das BMBF aufgegriffen.

A.3 Lithographie – Photonische Verfahren in der Halbleiterfertigung

Photonische Fertigungsverfahren sind von zentraler Bedeutung für die moderne Mikroelektronik. Insbesondere die optische Mikrostrukturierung der Chips gehört zu den Schlüsseltechnologien. Zudem wird das Werkzeug Licht auch bei der Inspektion, Herstellung und Reparatur von Photomasken und Wafern eingesetzt. Europa und Deutschland sind hier hervorragend positioniert. Der insbesondere auch vor dem Hintergrund des Übergangs zur EUV-Lithographie[26] in der Agenda Photonik 2020 dargestellte Handlungsbedarf wird durch das BMBF im Rahmen des Förderschwerpunkts Elektroniksysteme aufgegriffen.

A.4 FuE-Infrastruktur und Wissenschaftsorganisationen

Das Programm verfolgt den Ausbau des Wechselspiels zwischen wissenschaftlicher und angewandter Photonik in Deutschland, um neue Kooperationen zu initiieren und neue Forschungsgebiete frühzeitig für die Unternehmen in Deutschland zu erschließen. Die Basis hierfür sind eine leistungsfähige FuE-Infrastruktur und zahlreiche Aktivitäten der Wissenschaftsorganisationen auf dem Gebiet der Photonik.

Fraunhofer-Gesellschaft

Fraunhofer betreibt in Deutschland mit 60 Instituten an rund 80 Standorten angewandte Forschung für alle wesentlichen Bereiche der deutschen Wirtschaft. Mehr als 18.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bearbeiten dabei ein jährliches Forschungsvolumen von 1,65 Milliarden Euro. Davon entfallen 1,40 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Über 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt angewandte Forschung u. a. auf dem Gebiet der Optik und Photonik und entwickelt mit ihren Partnern in Wissenschaft und Wirtschaft innovative Lösungen für die Bedarfsfelder Energie und Umwelt, Information und Kommunikation, Gesundheit und Medizintechnik sowie Sicherheit und Mobilität. Wesentliche Beiträge der aktuellen Forschung sind im Folgenden zusammengefasst:

- Fraunhofer-Forschern ist es gelungen, neue Spitzen-Wirkungsgrade für einfach herzustellende großflächige Silizium-Solarzellen zu erreichen. Mit gegenüber dem heutigen Industriestandard weiter entwickelten Zellstrukturen konnten sie demonstrieren, dass in naher Zukunft Wirkungsgrade von 20 Prozent industriell realisierbar sind. Fraunhofer wurde in diesem Bereich im Jahr 2010 mit dem höchstdotierten Forschungspreis Frankreichs, dem Preis „Fondation Louis D“ ausgezeichnet.

- Für die Entwicklung kompakter energiesparender LED-Lichtquellen auf der Basis neuartiger Dünnschicht-LEDs wurden Fraunhofer-Forscher gemeinsam mit Forschern von OSRAM mit dem Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten ausgezeichnet. Dünnschicht-LEDs finden inzwischen vielfältige Anwendungen in der Innen- und Außenbeleuchtung. Großes Potenzial zur Senkung des Energieverbrauchs besteht in der intelligenten umgebungsangepassten Steuerung der Beleuchtungsstärke sowie der Leuchtdichteverteilung.

- Halbleitermaterialien und moderne Schichttechnologie ermöglichen zudem die Herstellung von Komponenten für die Telekommunikation. Fraunhofer ist in den Bereichen der Laserherstellung sowie der aktiven und passiven Komponenten aktiv.

[26] EUV: engl. extreme ultra violet

- In der Entwicklung organischer Leuchtdioden (OLED) erarbeitet Fraunhofer von der Materialentwicklung über die Fertigung von Leuchtmitteln bis zum System die Wertschöpfungskette.

- Die Entwicklung kompakter industrietauglicher Ultrakurzpuls-Festkörperlaser mit Leistungen im Multi-Kilowattbereich eröffnet neue Einsatzmöglichkeiten für eine kostengünstige und energieeffiziente Produktion. Fraunhofer-Forscher erzielen hier im Verbund mit Forschern der Partner-Hochschulen Spitzenleistungen.

  Der Laser ist in der modernen Fertigungstechnik unverzichtbar. Fraunhofer arbeitet an vielfältigen neuen Einsatzgebieten wie bei Fügetechnologien, bei der Strukturierung von Oberflächen oder der Unterstützung von Beschichtungsprozessen. In diesem Zusammenhang sind auch die generativen Fertigungsverfahren zu nennen.

- Optische Technologien ermöglichen die berührungslose Überwachung von Produktionsprozessen und ermöglichen eine Schnittstelle zwischen der realen und der digitalen Welt. Die Entwicklung optischer Mess-, Prüf- und Charakterisierungssysteme und Sensoren für Anwendungen in der Produktion, der Sicherheit oder der Medizintechnik ist ein bedeutendes Geschäftsfeld von Fraunhofer.

- Maßgeschneiderte optische Systeme unter Verwendung von Freiformoptiken ermöglichen eine neue Qualität optischer Systeme in Bezug auf Funktion und Leistungsfähigkeit bei minimiertem Bauraum für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern. Fraunhofer-Forscher arbeiten am Design und der Entwicklung effizienter Verfahren zur Fertigung von Freiform-Komponenten für kostengünstige Konsumeranwendungen oder zur Integration in optische Präzisionssysteme.

- Photonische Technologien sind entscheidend für die Herstellung künftiger Generationen von Computerchips mit Strukturbreiten kleiner als 20 Nanometer. Durch die Forschungen bei Fraunhofer zu Laserstrahlquellen zur Erzeugung von Strahlung im extrem-ultravioletten (EUV) Spektralbereich bei 13,5 Nanometer sowie zu EUV-Kollektor- und Strahlführungsoptiken für Lithographiesysteme profitieren deutsche und europäische Hersteller.

- Die Erderkundung aus dem Weltall zum Monitoring von Klimaveränderungen und Umwelteinflüssen erfordert hochgenaue optische Präzisionssysteme. Fraunhofer-Forscher verfügen über herausragende Kompetenzen in der Fertigung ultrapräziser Spiegelsysteme für optische Spektrometer und Teleskope zur satellitenbasierten Erderkundung.

Einen übergreifenden Schwerpunkt bildet das Thema Green Photonics – nachhaltige Lösungen für die Zukunft mit Licht. Zielrichtungen sind die Entwicklung alternativer Methoden der Energiegewinnung, Senkung des Energieverbrauchs, effizienter Umgang mit Ressourcen, Erhaltung von Klima und Umwelt sowie Sicherung der Ernährung und Gesundheitsvorsorge.

2010 wurde am Fraunhofer IOF in Jena der Fraunhofer-Innovationscluster „Green Photonics“ errichtet. Der Cluster bündelt im Rahmen eines Public-Private-Partnerships zwischen Industrie, Wissenschaft, Bund und Freistaat Thüringen die Kräfte mit dem Ziel, Beiträge zur Lösung drängender Zukunftsfragen unter Anwendung von Licht zu entwickeln, neue Märkte in wichtigen Zukunftsfeldern für die Branche zu erschließen und damit die Grundlagen für nachhaltiges Wachstum am Produktionsstandort Deutschland zu schaffen.

Die Forschungsaktivitäten der Fraunhofer-Gesellschaft in der Optik und Photonik sind u. a. im Fraunhofer-Verbund „Light & Surfaces“ zusammengefasst. Darüber hinaus gehört die Entwicklung optischer Verfahren und Systeme auch an vielen anderen Fraunhofer-Instituten zum Profil. Die starke nationale und internationale Vernetzung der Fraunhofer-Institute begründet die hohe Sichtbarkeit der Aktivitäten von Fraunhofer auf dem Gebiet der Photonik und die aktive Mitwirkung an der Strategieentwicklung sowohl national im Rahmen des Agendaprozesses Photonik 2020 als auch durch Teilnahme an der europäischen Technologieplattform Photonics21.

Die Fraunhofer-Institute verstärken gemeinsam mit den Partner-Hochschulen und -Universitäten ihre Aktivitäten in der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Bereich Optik und Photonik. Dazu gehört die Entwicklung neuer Studiengänge, die Internationalisierung der Ausbildung, beispielsweise im internationalen Studiengang Master in Photonics in Jena oder die Ausgestaltung von Kooperationsbeziehungen mit ausländischen Hochschulen.

Einen weiteren wichtigen Beitrag leistet Fraunhofer im Bereich der technologieorientierten Ausgründungen. Schwerpunkte sind die Standorte Aachen, Dresden, Jena und Berlin. In den letzten zehn Jahren konnten über 15 Ausgründungen im Bereich der Photonik realisiert werden.

Mit den Universitäten ist Fraunhofer eng vernetzt. So wird in Dresden innerhalb des Dresdner Innovationszentrums Energieeffizienz u. a. an Lösungen unter Verwendung von Licht zur Ressourcenschonung gearbeitet. In Jena wurde eine Graduiertenschule gemeinsam mit den universitären Partnern etabliert. In Aachen ergänzen sich die Fraunhofer-Aktivitäten mit dem geplanten „Forschungscluster Optische Technologien“ der RWTH.

Helmholtz-Gemeinschaft

Die Helmholtz-Gemeinschaft ist mit über 30.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in 17 Forschungszentren und einem Jahresbudget von rund drei Milliarden Euro die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft legen die Inhalte ihrer Forschung innerhalb ihres jeweiligen Forschungsbereichs in strategischen Programmen fest – mit Kooperationen über die Grenzen von Institutionen und Disziplinen hinweg.

Die Arbeiten in der Helmholtz-Gemeinschaft konzentrieren sich auf sechs große Forschungsbereiche: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Schlüsseltechnologien, Struktur der Materie, Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr. Die Photonik ist dafür eine wesentliche Grundlage. Dabei sind insbesondere die Aktivitäten der folgenden Forschungszentren zu nennen:

- **Forschungszentrum Jülich (FZJ)**

Das FZJ betreibt interdisziplinäre Forschung zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen in den Bereichen Gesundheit, Energie und Umwelt sowie Information. Im Bereich der Photonik werden die folgenden Themenkomplexe erforscht: Silizium-Photonik, nanophotonische Bauelemente in III/V-Technologie, Lichtmanagement – Kopplung zwischen Photonik und photosensitiven Halbleitermaterialien.

Silizium-Photonik: Silizium ist der bedeutenste Halbleiter für die Mikroelektronik. Anwendungen mit höchsten Anforderungen an die Packungsdichte von Transitoren kommen dabei an ihre Grenzen. Ein wesentliches Konzept ist daher die Ausgliederung der Aufgaben einer integrierten Schaltung in optische Signale. Dazu sind optische Komponenten, Lichtquelle, Lichtleiter und Photodetektor auf dem Silizium-Chip zu integrieren. Das FZJ entwickelt in diesem Zusammenhang Silizium-Germanium Quantenkaskadenstrukturen und ist hier international mit führend.

Nanophotonische Bauelemente in III/V-Technologie: III/V-Verbindungshalbleiter sind die Grundlage für optoelektronische Bauelemente (Leuchtdioden, Laser). Nanoskalige Bauelemente befinden sich noch im Entwicklungsstadium und sind wichtige Bausteine z. B. für die Quantenkryptografie und zukünftige Quanteninformationstechnologien. Hier sind in den letzten Jahren unter Beteiligung des FZJ rasante Fortschritte erzielt worden.

Lichtmanagement – Kopplung zwischen Photonik und photosensitiven Halbleitermaterialien: Die möglichst vollständige Einkopplung von Sonnenlicht in Solarzellen ist ein integraler Bestandteil photovoltaischer Energiewandlung. Die besonderen Chancen, die sich bei der Verwendung photonischer Strukturen für die Verbesserung der Lichteinkopplung speziell für Dünnschichtsolarzellen eröffnen, wurden am FZJ frühzeitig erkannt und in der ersten Periode der programmorientierten Förderung als Additional Funding Projekt „Photonen Management“ speziell gefördert.

Die Forschungsarbeiten des FZJ erstrecken sich von der Analyse großflächiger mikrostrukturierter Antireflexschichten bis zum Einbau photonischer Kristalle als selektive Zwischenreflektoren in Dünn-

schichtsolarzellen. Die Kompetenzen des FZJ bei der Kopplung zwischen Photonik und photosensitiven Halbleitermaterialien werden u. a. als Partner im Projekt PhoNa (Photonische Nanomaterialien) im Rahmen des Programms Spitzenforschung in den Neuen Ländern eingebracht.

- **Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB)**

Ein Schwerpunkt des HZB ist die Erforschung neuer Materialien und komplexer Materialsysteme. Zweiter Arbeitsschwerpunkt des HZB ist die Solarenergieforschung.

Im Bereich Solarenergie erforschen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Solarzellen der nächsten und übernächsten Generation – mit neuen Materialklassen und innovativem Zellenaufbau. Langfristziele der Forschungsarbeit sind effiziente und wettbewerbsfähige Dünnschicht-Solarzellen und Multispektralzellen. Das Forschungsgebiet der HZB-Solarenergieforschung reicht von den grundlegenden atomar-strukturellen und elektronischen Eigenschaften photovoltaischer Materialien bis zur Suche und Erprobung neuer technologischer Produktionsprozesse in enger Zusammenarbeit mit der Industrie.

- **Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)**

Das HZDR verfolgt die Schwerpunkte neue Materialien, Krebsforschung und nukleare Sicherheitsforschung. Insbesondere bei der Erforschung des Verhaltens von Materie unter dem Einfluss hoher Felder und in kleinsten Dimensionen besitzt die Photonik große Bedeutung.

Ultrakurzzeit-Spektroskopie: Am HZDR betreibt eine Gruppe international stark sichtbare Aktivitäten in der Ultrakurzzeit-Spektroskopie von Halbleiter-Nanostrukturen und anderen Festkörpersystemen, die für die zukünftige Informationsverarbeitung relevant sind. Dabei werden ultraschnelle elektronische und vibronische Prozesse in diesen Materialien und Strukturen auf der Zeitskala von 100 Femtosekunden studiert.

Terahertz-Technologie: Eng verzahnt mit der Kurzzeitspektroskopie ist die Terahertz-Technologie. Die Aktivitäten reichen von der Terahertz-Spektroskopie bis zur Entwicklung photonischer, d. h. durch ultrakurze optische Pulse getriebener, Terahertzquellen und -detektoren. Auf diesem Gebiet existieren bereits Kooperationen des HZDR mit KMUs, an deren Intensivierung gearbeitet wird.

Silizium-Nanophotonik: Schließlich hat das HZDR auch Aktivitäten auf dem Gebiet der Silizium-Nanophotonik. Hier wird daran gearbeitet, optische Funktionalitäten auf Silizium-Basis zu erforschen, z. B. um eine optische Signalübertragung auf einem Chip zu ermöglichen. Die drei genannten Aktivitäten werden zurzeit im Bereich „Terahertz-Spektroskopie und Photonik“ gebündelt.

Photonische Nanostrukturen für die Photovoltaik: Das HZDR beschäftigt sich auch mit photonischen Nanostrukturen und Prozessen für Anwendungen in der Photovoltaik. Dabei wird u. a. „Nanoschwamm“-artiges Silizium hergestellt, das höhere Lichtabsorption mit guten elektrischen Eigenschaften für Dünnschichtsolarzellen kombiniert.

Hochleistungslasersysteme: Ein weiteres Kerngebiet ist die Entwicklung und Anwendung von Hochleistungslasersystemen. Das HZDR arbeitet an vorderster Front an der Entwicklung energieeffizienter Hochleistungslasersysteme. Mit einem 150 Terawatt Ultrakurzpulslasersystem wird die Wechselwirkung intensiver Laserstrahlung mit Materie im extrem nichtlinearen sogenannten relativistischen Regime untersucht. Dabei steht die Entwicklung plasmabasierter kompakter Beschleunigerkonzepte im Vordergrund, die beispielsweise medizinische Anwendungen finden können.

- **Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

Das KIT ist aus dem Zusammenschluss des Forschungszentrums Karlsruhe und der Universität Karlsruhe hervorgegangen. Die Forschungsschwerpunkte sind: Energie, Klima und Umwelt, NanoMikro, Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik, COMMputation, Mensch und Technik, Mobilitätssysteme, neue und angewandte Materialien sowie Optik und Photonik.

Transformationsoptik und Metamaterialien: Dem KIT gelang die weltweit erstmalige experimentelle Realisierung einer dreidimensionalen optischen Tarnkappe im nahen Infrarot. Damit verbunden, in logischer Fortsetzung der Herstellung dreidi-

mensionaler photonischer Metamaterialien, ist eine neue Herangehensweise an das Design komplexer optischer Systeme. Zukünftige Arbeiten am KIT fokussieren sich auf das Design ungewöhnlicher Linsensysteme oder Polarisationsoptiken.

Photonische Nano- und Mikrosysteme für die Gesundheitsvorsorge, Kommunikation und Messtechnik: Im Hinblick auf eine flexible Fertigung und Montage kombinierter Mikrosysteme z. B. für Anwendungen in der Biophotonik und in der optischen Kommunikation verfolgt das KIT einen modularen Ansatz, bei dem LIGA-basierte Packaging-Technologien (Lithographie, Galvanik und Abformung) und Montageprozesse angewendet werden. Zur Erhöhung des Integrationsgrades wird der Übergang von planaren Wellenleitern auf räumliche Anordnungen verfolgt. Im Hinblick auf eine schnelle Prüfung in industriellen Produktionsprozessen arbeitet das KIT an optischen Verfahren zur hochpräzisen Distanzmessung und zur Erfassung dreidimensionaler Objekte.

Nanophotonische Systeme für die Informationstechnik: Die Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauches erfordert eine konsequente weitere Miniaturisierung, den Übergang von planaren zu dreidimensional integrierten Technologieplattformen sowie eine konsequente Verflechtung von Elektronik, Photonik und Plasmonik. Das KIT arbeitet an optischen Übertragungsverfahren und -systemen, die höchste Datenraten energetisch hocheffizient bewältigen können. Dabei werden u. a. integriert-optische Lösungen auf Silizium erarbeitet. Auf dem Gebiet der Hybridintegration von organischen Materialien auf Silizium nimmt das KIT international eine Spitzenstellung ein.

Chip-basierte Systeme für die Biophotonik: Für die zeitnahe medizinische Überwachung von Patienten müssen Home-Care-Systeme entwickelt werden, die dem Patienten Angaben über seinen Gesundheitszustand liefern. Hierfür eignen sich einfach bedienbare chip-basierte Systeme. Das KIT stellt sich diesen Herausforderungen mit seinen Aktivitäten zur Herstellung miniaturisierter Laser in Chips auf Polymerbasis für Analysen mittels Spektroskopieverfahren sowie mit der Entwicklung chip-basierter Systeme mit integrierten optischen Resonatoren für Bindungsnachweise in Biomedizin und Chemie.

Röntgenoptiken für hochauflösende Röntgenbildgebungsmethoden: Um die Qualität der Röntgenanalyse in der Medizintechnik und Materialforschung zu verbessern, sind hochauflösende Röntgenbildgebungsmethoden zwingend notwendig. Unter Nutzung des LIGA-Verfahrens wurden am KIT weltweit erstmals Röntgenlinsen mit Aperturen von wenigen Millimetern realisiert.

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ist die Selbstverwaltungsorganisation der Wissenschaft in Deutschland. Organisiert ist die DFG als privatrechtlicher Verein. Ihre Mitglieder sind forschungsintensive Hochschulen, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, wissenschaftliche Verbände sowie die Akademien der Wissenschaften.

Die DFG fördert neben dem Normalprogramm die optische Physik und die technische Optik in etwa 70 koordinierten Programmen (Sonderforschungsbereiche, Schwerpunktprogramme etc.).

Hervorzuheben ist die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder. Hier ist die Photonik aktuell mit zwei Graduiertenschulen und drei Exzellenzclustern vertreten.

- **Graduiertenschulen**

Graduiertenschulen sind ein wesentlicher Beitrag zur Profilierung und Herausbildung wissenschaftlich führender, international wettbewerbsfähiger und exzellenter Standorte in Deutschland. Sie sind ein Qualitätsinstrument zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und folgen dem Prinzip der Qualifizierung herausragender Doktorandinnen und Doktoranden innerhalb eines exzellenten Forschungsumfelds.

Karlsruhe School of Optics and Photonics (KSOP) des Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Im Zentrum der KSOP stehen vier Forschungsbereiche: Photonische Materialien und Komponenten, moderne Spektroskopie, biomedizinische Photonik und optische Systeme. Lehrkräfte aus Physik, Chemie, Biologie, Maschinenbau und Elektrotechnik decken die Gebiete ab. Daneben erwerben die Studierenden und Doktoranden in Kursen der Hector School of Engineering and Management am International Department überfachliche Qualifikationen. Partner

des KIT in der KSOP sind das Forschungszentrum für Informationstechnologie in Karlsruhe und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung in Stuttgart.

Erlanger Graduiertenschule für Fortschrittliche Optische Technologien der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg: Die Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT) bietet ein fakultätsübergreifendes Doktorandenprogramm mit breiter Ausbildungsausrichtung in den Grundlagen der Optischen Technologien und unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Sie ist Teil eines Netzwerks internationaler Eliteuniversitäten und Forschungseinrichtungen. In der Graduiertenschule arbeiten Nachwuchswissenschaftler an den Schnittstellen von Disziplinen wie Photonik, Materialwissenschaft, Messtechnik, Medizin und Produktionstechnik zusammen. Zu den Partnern der Universität Erlangen-Nürnberg gehören das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, das Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB) und das Bayerische Laserzentrum (BLZ gGmbH).

- **Exzellenzcluster**

Mit den Exzellenzclustern sollen an deutschen Universitätsstandorten international sichtbare und konkurrenzfähige Forschungs- und Ausbildungseinrichtungen etabliert und dabei wissenschaftlich gebotene Vernetzung und Kooperation ermöglicht werden. Die Exzellenzcluster sollen wichtiger Bestandteil der strategischen und thematischen Planung einer Hochschule sein, ihr Profil deutlich schärfen und Prioritätensetzung verlangen.

Münchner Zentrum für fortgeschrittene Photonik (MAP): Ziel der wissenschaftlichen Arbeiten im Münchner Zentrum MAP ist es, neue kohärente Lichtquellen und lichtbetriebene Teilchenquellen mit bislang unerreichten Eigenschaften zu entwickeln. Dazu gehören höhere Intensitäten, die sub-Femtosekunden-Kontrolle von Lichtpulsen, eine bessere Frequenzgenauigkeit und höhere Photonenenergien. Diese neuen Lichtquellen eröffnen völlig neue interdisziplinäre Anwendungen in Physik, Chemie, Biologie und Medizin. MAP wird von der Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) und der Technischen Universität München getragen. Beteiligte Institutionen sind das Max-Planck-Institut für Biochemie, das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, das Max-Planck-Institut für Quantenoptik, das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, die Universität der Bundeswehr München, die Universität Stanford (USA) und die Universität Uppsala (Schweden).

Mikroskopie im Nanometerbereich: Molekulare Abläufe in Nervenzellen können nur mit Hilfe hochauflösender Mikroskope untersucht werden. Neueste Entwicklungen, wie beispielsweise die STED-Mikroskopie, erlauben es Biologen mittlerweile, Strukturen in lebenden Zellen im Nanometer-Bereich zu beobachten. Im Rahmen des Exzellenzclusters werden verschiedene Mikroskopiemethoden erforscht, um noch höhere Auflösungen zu erzielen und um sie den Anforderungen moderner molekularbiologischer Experimente anzupassen. Damit wird die Grundlage dafür geschaffen, molekulare Prozesse und Interaktionen in Nervenzellen detailliert zu analysieren, um langfristig Therapien für psychiatrische, neurologische und neurodegenerative Erkrankungen zu verbessern und weiterzuentwickeln. Der Exzellenzcluster wird getragen von der Georg-August-Universität Göttingen. Beteiligte Institutionen sind das Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie und die Universität Buenos Aires (Argentinien).

QUEST – Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research: Die Erforschung von Quanteneffekten zur Herstellung anspruchsvoller Messtechnologien ist ein zentrales Forschungsgebiet des Exzellenzclusters. Im Rahmen von QUEST wird daher an neuen Konzepten gearbeitet, die durch die gezielte Ausnutzung von Quanteneffekten bisherige Messgenauigkeiten um viele Größenordnungen verbessern sollen. Neue Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in der Quantenoptik und Festkörperphysik führen zu innovativen Messtechnologien mit höchster Präzision. Beispielsweise arbeiten die Forscherinnen und Forscher an besonders stabilen und präzisen Lasersystemen, an maßgeschneiderten Optischen Technologien, an speziellen Formen des Lichts (gequetschtes Licht) und an Atom-Interferometern. Der Exzellenzcluster wird getragen von der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Beteiligte Institutionen sind das Laser Zentrum Hannover e.V., das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und die Universität Bremen.

Max-Planck-Gesellschaft

Die derzeit 80 Institute der Max-Planck-Gesellschaft betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Bio-, Geistes- und Sozialwissenschaften. Ihr Forschungsspektrum entwickelt sich dabei ständig weiter. Die Max-Planck-Gesellschaft beschäftigt über 13.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, davon etwa 5.000 Wissenschaftler. Zusätzlich forschen in den Einrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft zahlreiche Nachwuchs- und Gastwissenschaftler.

Die Optischen Technologien spielen in der Max-Planck-Gesellschaft eine prominente Rolle, mit der viele Institute befasst sind. Dabei sind Optikanwendung und Optikforschung zu unterscheiden. Die Optikforschung erschließt die Grundlagen der Optik, aus der gegebenenfalls neue Anwendungen hervorgehen. Die Max-Planck-Gesellschaft hat zwei Institute, die speziell der Grundlagenforschung gewidmet sind: das Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und das 2009 neu gegründete Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen. Durch die Neugründung hat die Max-Planck-Gesellschaft der zunehmenden Relevanz der Optischen Technologien Rechnung getragen, deren Entwicklung das neue Institut durch Grundlagenforschung unterstützen soll. Beide Institute ergänzen sich in ihrer fachlichen Ausrichtung. Garching befasst sich mit optischen Höchstpräzisionsmessungen, Atomoptik, Ultrakurzpulslasern und Attosekundenphysik sowie Quanteninformationsverarbeitung und Quantenoptik, besonders in optischen Resonatoren. Erlangen arbeitet in den Bereichen künstlich mikro-strukturierte optische Materialien, optische Sensorik, nichtlineare Optik, Quantenkommunikation, Nano-Quantenoptik und Biophotonik.

Aber auch andere Max-Planck-Institute befassen sich mit optischer Grundlagenforschung in Teilgebieten, die für das jeweilige Institut relevant sind. Am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen wurde die bahnbrechende sub-Wellenlängen Mikroskopie entwickelt, am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) werden in Hannover die Optischen Technologien erforscht, die für kilometergroße Laserinterferometer zum Nachweis von Gravitationswellen erforderlich sind. Am Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik in Halle wurden u. a. für die Photovoltaik interessante nanostrukturierte Oberflächen gefunden. Am freien Elektronenlaser (XFEL) in Hamburg hat die Max-Planck-Gesellschaft eine Forschungsgruppe eingerichtet, die den XFEL für wissenschaftliche Zwecke nutzen soll und die gute Chancen hat, in naher Zukunft ein Max-Planck-Institut zu werden. Weitere Max-Planck-Institute, die in der Optikforschung bzw. in der Anwendung Optischer Technologien aktiv sind, sind die Kernphysik in Heidelberg, die Polymerforschung in Mainz, die Festkörperforschung in Stuttgart, die Physik komplexer Systeme in Dresden, die Biochemie in Martinsried, die extraterrestrische Physik in Garching und die Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr, um nur einige zu nennen.

Die Verschiedenheit dieser Institute, die sich mit dem Thema Photonik beschäftigen, unterstreicht die Breitenwirkung der Optischen Technologien und der Optikforschung auch in der Max-Planck-Gesellschaft, die ihre Aktivitäten in dieser Richtung in jüngster Zeit deutlich ausgeweitet hat.

Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz

Die Leibniz-Gemeinschaft ist ein Zusammenschluss von derzeit 87 Forschungseinrichtungen mit über 16.000 Beschäftigten, die wissenschaftliche Fragestellungen an der Brücke zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung bearbeiten. Sie stellen Infrastruktur für Wissenschaft und Forschung bereit und erbringen forschungsbasierte Dienstleistungen auf den Gebieten der Natur-, Ingenieur- und Umweltwissenschaften über die Wirtschafts-, Sozial- und Raumwissenschaften bis hin zu den Geisteswissenschaften.

Für die Photonik und die Plasmatechnologie stehen in der Leibniz-Gemeinschaft insbesondere drei Einrichtungen mit weltweit beachteten Forschungsaktivitäten:

Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) führt anwendungsorientierte und industrienahe Forschung auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik durch, insbesondere in den Bereichen Mikro- und Millimeterwellentechnik und Optoelektronik. Das FBH arbeitet in den Bereichen Bauelemente, Schaltungen und Systeme, der Material- und Prozesstechnologie sowie der rechnergestützten Entwurfsverfahren. Das FBH führt u. a. Forschungsarbeiten zu neuar-

tigen Diodenlasern und Diodenlasersystemen auf der Basis der III/V-Halbleitertechnologie durch – vom sichtbaren bis zum nahen Infrarot-Bereich. Im Vordergrund stehen Forschungen zur Steigerung von Brillanz, Effizienz und Zuverlässigkeit von Hochleistungsdiodenlasern. Im Bereich Galliumnitrid-Optoelektronik entwickelt das FBH innovative Lichtemitter auf der Basis von Gruppe-III-Nitriden. Das Materialsystem AlN-GaN-InN deckt einen außerordentlich großen Wellenlängenbereich ab, der sich vom fernen Ultraviolett über den sichtbaren Spektralbereich bis ins nahe Infrarot erstreckt und zahlreiche neue Anwendungsfelder eröffnet.

Das Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie e. V. (INP Greifswald) ist europaweit die größte außeruniversitäre Forschungseinrichtung zu Niedertemperatur-Plasmen, deren Grundlagen und technischen Anwendungen. Im Forschungsbereich „Oberflächen und Materialien“ werden Plasmaverfahren erforscht, die zur Funktionalisierung von planen Oberflächen, insbesondere aber auch für komplexe 3D-Strukturen, geeignet sind. Ein weiteres Gebiet ist der Eintrag plasmabehandelter mikro- oder nanoskaliger Partikel in Werkstoffe zur Entwicklung neuer Materialien. Im Bereich „Umwelt und Energie“ werden Laserdiagnostiken mit hoher Nachweisempfindlichkeit erarbeitet, die auch neue Möglichkeiten der Prozesssteuerung eröffnen. Für die detaillierte Erfassung physikalischer Prozesse in atmosphärischen Plasmen werden moderne Simulations- und Diagnostikmethoden erarbeitet. Hier ergeben sich große Chancen für die Entwicklung neuartiger Verfahren des Schadstoffabbaus auf Basis von Mikroplasmen sowie der Verbesserung von Produktionstechniken. Der Bereich „Biologie und Medizin“ erforscht die Wechselwirkungen physikalischer Plasmen mit lebenden Zellen und Geweben. Anwendungen umfassen u. a. die plasmabasierte biologische Dekontamination empfindlicher Materialien sowie die therapeutische Nutzung von Atmosphärendruckplasmen in der Medizin.

Das Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie (MBI) betreibt Grundlagenforschung auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik und Kurzzeitdynamik bei der Wechselwirkung von Materie mit Laserlicht und verfolgt daraus resultierende Anwendungsaspekte. Es entwickelt und nutzt hierzu ultrakurze und ultraintensive Laser und laserbasierte Kurzpuls-Lichtquellen in einem breiten Spektralgebiet in Verbindung mit Methoden der nichtlinearen Spektroskopie. Das MBI konzentriert sein Forschungsprogramm auf a) neue Quellen für ultrakurze und ultraintensive Lichtimpulse, Pulsformung, Pulscharakterisierung und Messtechniken für ultraschnelle Prozesse in einem breiten Spektralgebiet vom mittleren Infrarot bis hin in den Röntgenbereich und b) ultraschnelle, nichtlineare Phänomene in Atomen, Molekülen, Clustern und Plasmen sowie an Oberflächen und in Festkörpern. Im Rahmen der Applikationslabore konzentriert das MBI seine experimentellen Ressourcen. Im Femtosekunden-Applikationslabor werden ultrakurze Lichtimpulse im Spektralbereich von 100 Nanometer bis 20 Mikrometer verfügbar gemacht. Das Höchstfeldlaserlabor bietet Laser mit Spitzenintensitäten bis zu 10^{19} Watt pro Quadratzentimeter. An der MBI-BESSY Beamline am Berliner Elektronenspeicherring für Synchrotronstrahlung können kombinierte Experimente mit Laser- und Synchrotronstrahlung durchgeführt werden.

Weitere Einrichtungen der Leibniz-Gemeinschaft, die Forschungsarbeiten an der Schnittstelle der Photonik zu angrenzenden Gebieten durchführen, sind u. a. das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung, das neue Verfahren für die Herstellung von III / V-Halbleiterkristallen entwickelt, das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik / Innovations for High Performance Microelectronics, das Vorlaufforschung zu Si-basierten Lichtemittern für die optische Datenübertragung betreibt, sowie das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, das u. a. leitfähige Polymere für organische Leuchtdioden erforscht.

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerberinnen/Wahlwerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.
Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.
Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung