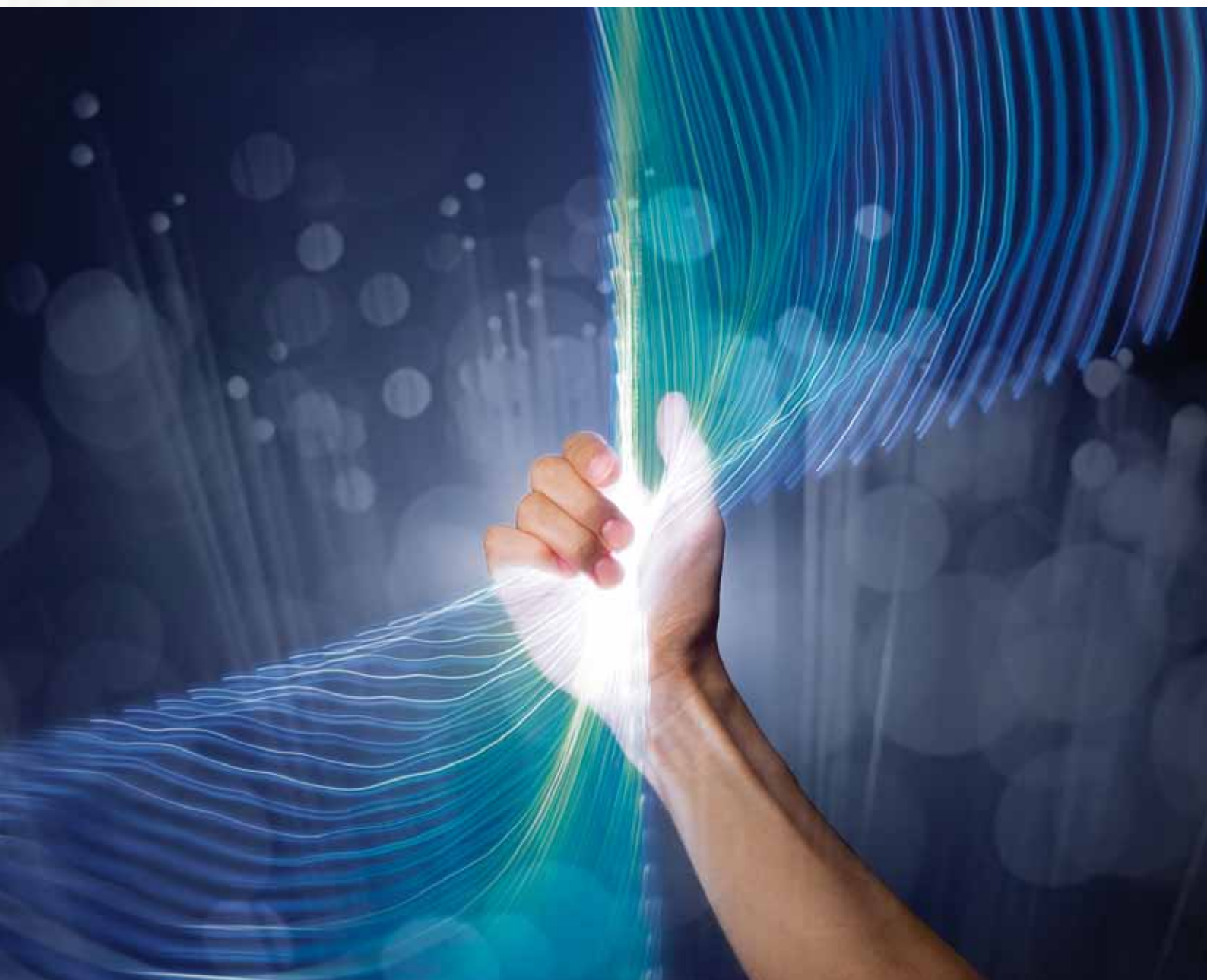


AGENDA PHOTONIK 2020



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Impressum

Herausgeber und verantwortlich für den Inhalt:

Der Programmausschuss für das BMBF-Förderprogramm

Optische Technologien, vertreten durch die Sprecher

Peter Leibinger, TRUMPF GmbH + Co. KG und

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Fraunhofer-Institut

für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF Jena.

Titelfoto: OSRAM GmbH, München

Gestaltung & Umsetzung: Bartkowiak GmbH & Co. KG, Tönisvorst

Druckerei: Siebel Druck & Grafik, Lindlar

Düsseldorf, November 2010

AGENDA PHOTONIK 2020

Der Programmausschuss für das BMBF-Förderprogramm Optische Technologien

NOVEMBER 2010



Für die deutsche Photonik-Branche

Der Programmausschuss Optische Technologien

Lutz Aschke	LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH
Christoph Glingener	ADVA AG Optical Networking
Rolf Günther	ALTONABIOTEC AG
Peter Leibinger	TRUMPF GmbH + Co. KG
Gottfried Neuhaus	Neuhaus Partners GmbH
Jürgen Popp	Friedrich-Schiller-Universität Jena
Wolfgang Sandner	Max-Born-Institut (MBI)
Christine Silberhorn	Universität Paderborn
Klaus Streubel	Osram GmbH
Günther Tränkle	Ferdinand-Braun-Institut (FBH)
Andreas Tünnermann	Fraunhofer IOF
Markus Weber	Carl Zeiss AG
Klaus-Dieter Weltmann	INP Greifswald
Michael Zäh	Technische Universität München

INHALTSVERZEICHNIS

1	ANSTELLE EINER ZUSAMMENFASSUNG – DIE VISION DER PHOTONIK 2020	8
2	WAS DIE PHOTONIK-BRANCHE HEUTE SCHON FÜR DEUTSCHLAND LEISTET	10
	2.1 Wirtschaftsdaten der Branche	10
	2.2 Von DFG bis DAX – Eine Branche formiert sich	13
3	LÖSUNGEN AUS LICHT – DIE CHANCEN DER PHOTONIK	15
	3.1 Produktion und Maschinenbau	15
	3.1.1 Werkzeug Licht – Das gesamte Anwendungsspektrum erschließen	16
	3.1.2 Werkzeug Licht – Lösungen für die nächste Generation der Produktion	25
	3.1.3 Werkzeug Licht – Photonische Verfahren in der Halbleiterfertigung	33
	3.1.4 Innovationen in Licht – Neue Strahlquellen durch Integration und Automatisierung	38
	3.1.5 Innovationen in Licht – Materialien, Oberflächen, Schichten und Optiken	45
	3.1.6 Zusammenfassung	54
	3.2 Life Science und Gesundheit	57
	3.2.1 Bildgebende diagnostische Verfahren	58
	3.2.2 Therapie und Medizinprodukte	68
	3.2.3 Analytische Verfahren	75
	3.2.4 Zusammenfassung	85
	3.3 Kommunikation und Information	88
	3.3.1 Photonische Kommunikationsnetze	89
	3.3.2 Konvergenz von Photonik und Elektronik	97
	3.3.3 Bilderfassung und Visualisierung	104
	3.3.4 Zusammenfassung	111
	3.4 Beleuchtung und Energie	114
	3.4.1 Beleuchtung – Die Zukunft des Lichtes	115
	3.4.2 Solartechnik – Licht als Energieträger	125
	3.4.3 Zusammenfassung	136
	3.5 Organische Elektronik	139
	3.6 Emerging Technologies – Das Frühbeet der Photonik	144
	3.6.1 Quantenoptik	145
	3.6.2 Maßgeschneiderte photonische Materialien	154
	3.6.3 Zusammenfassung	161
4	ACHT DINGE, DIE WIR TUN MÜSSEN	164



Peter Leibinger



Andreas Tünnermann

Zur Einleitung

Deutsche Unternehmen gehören zu den Weltmarktführern in zahlreichen Bereichen der Photonik wie Lasertechnik, LED oder Mikroskopie und Imaging. Aktuell geht die Photonik-Branche in Deutschland gestärkt aus der Wirtschaftskrise hervor: 2009 haben die Unternehmen ihr Personal bewusst gehalten. Es sind die Menschen, die den Erfolg ausmachen. Bereits 2010 werden die Umsätze wieder an die des Jahres 2008 heranreichen. Und die Auftragsbücher sind voll – die Signale stehen auf Wachstum. Basis dieses Erfolgs sind die beispielhafte Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie die Innovationskraft der mittelständisch geprägten und von Weltkonzernen flankierten Photonik-Branche.

Photonik folgt dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung: ressourcenschonend produzieren, Energie effizient erzeugen und nutzen – Photonik liefert als Querschnittstechnologie Lösungen für die Märkte von morgen. Dieses Potenzial müssen wir nutzen, damit Deutschland auch in der nächsten Dekade im weltweiten Wettbewerb um Innovationen ganz vorne liegt.

Im Juni 2009 wurde mit dem Memorandum »Photonik 2020 – Lösungen aus Licht« führender Repräsentanten aus Wirtschaft und Wissenschaft ein Prozess zur konsequenten und nachhaltigen Nutzung des Rohstoffs Licht angeregt. Die Branche hat sich formiert, um Beiträge zur Lösung wirtschaftlicher, gesellschaftlicher und umweltpolitischer Herausforderungen unserer Zeit zu leisten.

Im März 2010 startete die Photonik-Branche mit Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung in Berlin einen industriegeführten Strategieprozess. Etwa 300 Experten fanden sich zusammen, um die Leitlinien der Forschung und Entwicklung für die nächsten zehn Jahre festzulegen. Die vorliegende »Agenda Photonik 2020« ist das Ergebnis dieses Prozesses: eine gemeinschaftliche Zukunftsstrategie zur Entwicklung und Nutzung der Photonik in Deutschland mit Handlungsempfehlungen an Wirtschaft und Verbände, Wissenschaft und Politik.

Es gilt nun, die Herausforderungen anzunehmen, Prioritäten zu setzen und die Chancen entlang der Leitmärkte Produktion, Gesundheit, Kommunikation, Beleuchtung und Energie zu nutzen. Die »Agenda Photonik 2020« ist für uns Roadmap und Verpflichtung zugleich. Die deutsche Photonik-Branche steht zu ihrer Verantwortung, unser Land fit zu machen für den globalen Wettbewerb und so mitzuhelfen, den Wohlstand in Deutschland langfristig zu sichern.

Für den Programmausschuss Optische Technologien

Peter Leibinger
Geschäftsführender Gesellschafter
TRUMPF GmbH + Co. KG

Prof. Dr. Andreas Tünnermann
Direktor des Fraunhofer-Instituts für
Angewandte Optik und Feinmechanik
IOF Jena

1 ANSTELLE EINER ZUSAMMENFASSUNG – DIE VISION DER PHOTONIK 2020

Das anspruchsvolle Ziel der Bundesregierung, Deutschland auch zukünftig zu den wirtschaftsstärksten und innovativsten Nationen zu zählen und so den Wohlstand unserer Gesellschaft zu sichern, werden wir nicht ohne eine starke Position bei den photonischen Technologien erreichen.

Heute steht Deutschland bei der Photonik international mit an der Spitze. Dies ist das Ergebnis einer gemeinsamen Kraftanstrengung von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Diese Position wollen wir in Zukunft nicht nur halten, sondern ausbauen. Deutschland muss ein führendes Land der Photonik bleiben, zu groß ist ihre Bedeutung für jede Gesellschaft und für jeden modernen Wirtschaftsstandort. Eine Führungsrolle im Klimaschutz, in Fragen der Mobilität, bei den Technologien für einen modernen Produktionsstandort, in der Informationsgesellschaft oder der Medizintechnik setzt die Beherrschung und Nutzung des Photons zwingend voraus.

Das Photon ist dabei nicht nur Innovationstreiber, photonische Technologien werden zunehmend selbst zum Produkt. Dieses Potenzial wollen wir nutzen.

- Photonik gehört zu den wichtigsten Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts und ist weltweit eine Wachstumsbranche.
- Photonik wird zunehmend eine entscheidende Rolle im internationalen Wettbewerb einnehmen. Sie ermöglicht nachhaltiges Wachstum in zahlreichen Industriezweigen.
- Photonik hat ein hohes Innovationspotenzial und bietet Lösungen bei gesellschaftlichen Herausforderungen zu Gesundheit, Energie, Sicherheit, Mobilität und Kommunikation.
- In der Photonik gelingt es, in Deutschland die gesamte Innovations- und Wertschöpfungskette auf international führendem Niveau abzubilden. Damit trägt die Photonik entscheidend zur Standortsicherung bei.

- In vielen Bereichen der Photonik sind deutsche Unternehmen Weltmarktführer. Leitmärkte sind Produktion, Gesundheit, Kommunikation, Beleuchtung und Energie. Die Exportquote liegt bei über 65 %.
- Photonik bietet eine wachsende Zahl zukunftsfähiger Arbeitsplätze in Deutschland. Heute beschäftigt die Branche etwa 120.000 Menschen in Deutschland.
- Die Photonik passt zu Deutschland: wissensintensiv, diversifiziert und ressourcenschonend. Die Unternehmen arbeiten eng vernetzt zusammen, die Anforderungen an die Fachkräfte, bei Herstellern und Anwendern, sind hoch – hervorragend ausgebildete junge Menschen sind ein Standortfaktor.

Durch intensive Forschungsanstrengungen in den letzten beiden Jahrzehnten haben wir das Tor weit aufgestoßen. Deutschland hat hier eine hohe internationale Sichtbarkeit erreicht und eine klare Führungsrolle übernommen. Photonische Technologien sind längst umkämpfter Wettbewerbsfaktor – und dennoch stehen wir erst am Anfang dieser Jahrhunderttechnologie. Es geht darum, den Erfolg in Deutschland zu ernten, Schritt zu halten, weitere Chancen durch das Photon zu erarbeiten und neue Leitmärkte zu erschließen. Hierfür müssen wir investieren – in Köpfe, Forschung und Entwicklung und Strukturen. Wirtschaft, Wissenschaft und Politik müssen gemeinsam voranschreiten.

Wir müssen Leitmärkte in den Bedarfsfeldern Gesundheit, Energie, Sicherheit, Mobilität und Kommunikation erschließen. Zugleich müssen wir die Produktion stärken, um Wohlstand und hochwertige Arbeit in Deutschland zu sichern. Dafür bietet die Photonik neue, teilweise sogar revolutionäre Lösungen und Möglichkeiten. Sie stellt uns gleichzeitig vor große Herausforderungen:

Im Life Science-Bereich müssen wir den Paradigmenwechsel von der Behandlung der Symptome hin zur Prävention von Krankheiten meistern. Zukünftige regenerative medizinische Ansätze verlangen neue Verfahren

zur Beobachtung und Manipulation lebender Zellen und deren Strukturen bis auf die molekulare Ebene. In-vivo-Verfahren sind der nächste Schritt – mit der Biophotonik werden wir den Weg in die Kliniken gehen. Die Vision: Echte Prävention von Krankheiten wird möglich.

Bei Energie und Beleuchtung müssen wir neue Anwendungen oder gänzlich neue Felder wie die organische Photovoltaik und die organische Elektronik erschließen. LED und OLED müssen zum Leitprodukt für die Beleuchtung werden. Damit lassen sich bis zu zwei Drittel der Energie einsparen und CO₂-Emissionen reduzieren. Der Paradigmenwechsel zum Halbleiterlicht bringt neue Herausforderungen mit sich: Halbleiterhersteller werden Lichtenbieter, Chemiekonzerne liefern die Materialien für das neue Licht, ein neuer Markt für Lichtversorger entsteht. Diesen Prozess muss Deutschland anführen. Die Vision: Deutschland wird Effizienzweltmeister.

Mit den OLEDs werden wir noch einen Schritt weiter gehen: Transparente Lichtfolien können in Glasscheiben eingesetzt werden, eine Kombination mit der organischen Photovoltaik ist möglich. Die Vision: Beleuchtung und Energieversorgung verschmelzen, Photovoltaik wird bezahlbar.

In der Kommunikation benötigen wir die Photonik zur Beherrschung des Internets, um die Anforderungen neuer Dienste und steigender Bandbreiten zu bewältigen. Ein Trend dabei ist die Konvergenz photonischer und elektronischer Bauelemente. Hier können wir verlorenes Terrain für Deutschland und Europa zurückgewinnen. Die Vision: »Unbegrenzte« Bandbreite ist zu geringen Kosten für jeden überall und jederzeit verfügbar.

Die Stärke der Photonik bei Analytik und Sensorik müssen wir in Marktpositionen umwandeln, neue Lösungen für die Umwelttechnik erschließen. Die Vision: »Green Photonics« wird ein deutscher Exportschlager.

In der Produktion müssen wir photonische Prozessketten für eine energiesparende und flexible Fertigung nutzen. Mit dem Laser werden wir Solarzellen verbessern und

die Leistungsfähigkeit von Energiespeichern steigern. Von der Windkraftanlage bis zum Elektromobil wird der Laser den Einsatz von Materialhybriden ermöglichen. Die Vision: Photonische Prozessketten sind die Basis für »Cleantech made in Germany«.

Es gilt, in der nächsten Dekade das Halbleiterzeitalter der Photonik zu gestalten und neue Einsatzgebiete in den Zukunftsfeldern moderner Industriegesellschaften zu erobern. Es geht um Deutschlands Rolle als eine der weltweit führenden Technationen und um das wissenschaftliche, technologische und wirtschaftliche Potenzial in Deutschland zur Lösung drängender Fragen in wichtigen Feldern unserer modernen Gesellschaft.

Wir, die deutsche Photonik-Community, sind zu diesem erneuten Aufbruch bereit. Das zeigen die FuE-Aufwendungen deutscher Unternehmen von fast 2 Mrd. € p. a. und das hohe Engagement in dreistelliger Millionenhöhe in strategisch angelegten Innovationsclustern. Zehntausende neuer Arbeitsplätze wurden geschaffen, die Unternehmen glänzen mit überdurchschnittlichen Ausbildungszahlen. Das soll auch in Zukunft so bleiben. Eine richtungsweisende, auf die gesamte Branche wirkende Initiative ist notwendig. Photonik muss ein Schwerpunkt der Innovationspolitik der Bundesregierung bleiben.

Gerade vor dem Hintergrund der aktuellen wirtschaftspolitischen Herausforderungen steht die deutsche Photonik-Industrie zu ihrer Verantwortung. Sie ist bereit, das erfolgreiche Public-Privat-Partnership-Modell gemeinsam mit der Bundesregierung fortzusetzen, zu investieren und Arbeitsplätze in Deutschland zu schaffen. Die Vision der Photonik 2020: Licht wird zum Innovationstreiber Nummer eins.

2 WAS DIE PHOTONIK-BRANCHE HEUTE SCHON FÜR DEUTSCHLAND LEISTET

Photonik umfasst die Technologien zur Erzeugung, Verstärkung, Formung, Übertragung, Messung und Nutzbarmachung von Licht. Photonics ist weltweit ein »growth engine«. Und Deutschland steht international mit an der Spitze.

Mit dem Vorlegen dieser Agenda folgen die deutschen Partner aus Forschung und Industrie dem internationalen Sprachgebrauch und wählen für die Technologien rund um das Licht den Begriff »Photonik«. Dieser Wechsel – von den Optischen Technologien zur Photonik – dokumentiert zugleich den erneuten Aufbruch: Kompetenzen aus Bereichen wie Maschinenbau, Lasertechnik, Halbleitertechnik und Medizin wachsen zusammen. Gleichzeitig beschreiten die Optischen Technologien den Weg der Elektronik – von der Manufaktur zur Volumenproduktion, von diskreten zu hoch integrierten Technologien. Mehr und mehr basieren Optische Technologien auf Halbleitern – in der Lasertechnik wie in der Beleuchtung. »Photonik« fasst diese Trends zusammen, die uns enorme Chancen bieten und uns vor große Herausforderungen stellen.

Gemeinsam können wir auf unseren Erfolgen aufbauen. Vor zehn Jahren wurde mit einem in Deutschland einmaligen, industriegeführten Strategieprozess das Zeitalter der Optischen Technologien eingeläutet. Viele hundert Akteure aus allen Bereichen des bis dahin fragmentierten Technologiefeldes wirkten dabei mit. In einer gemeinsamen Anstrengung wurden die Empfehlungen des Strategieprozesses durch Wirtschaft, Wissenschaft und Politik umgesetzt. Das Ergebnis belegt: Es war der richtige Weg. Heute ist die Photonik eines der innovativsten Technologie- und Wirtschaftsfelder in Deutschland. Mit den bisherigen Aktivitäten ist es gelungen,

- dem Wirtschaftsstandort Deutschland mit dem Photon einen der entscheidenden neuen Innovationstreiber zur Verfügung zu stellen,
- eine Community von DFG bis DAX ins Leben zu rufen und sie beispielhaft zu vernetzen – eine Community, die sich nun zu einer Branche formiert,

- einen weltweit anerkannten Hightech-Messeplatz aufzubauen,
- zahlreiche hochrangige Preise und Auszeichnungen für die Photonik zu gewinnen und so Deutschland eine weltweit sichtbare Exzellenz in der Photonik zu bescheinigen,
- insgesamt dem internationalen Ansehen des Wirtschafts- und Forschungsstandortes Deutschland Glanz zu verleihen.

2.1

WIRTSCHAFTSDATEN DER BRANCHE

Geboren aus einer Traditionsbranche fällt die Photonik in Forschung und Industrie auf fruchtbaren Boden und festigt die Stärken unserer Wirtschaft. Unter den Akteuren befinden sich solche mit langer Tradition wie Schott, Carl Zeiss und Jenoptik und Weltmarktführer wie Trumpf und Osram. Dabei sind 85 % der Unternehmen kleine und mittelständische Betriebe.

Die Photonik zählt zu den wichtigsten Wachstums- und Zukunftsbranchen der deutschen Wirtschaft. Als Innovationstreiber und Basis für die Entwicklung und Herstellung der Produkte zahlreicher anderer Branchen beeinflusst sie darüber hinaus einen großen Anteil der über sieben Millionen Arbeitsplätze des produzierenden Gewerbes.

In Deutschland wurden 2008 Produkte der Photonik im Wert von 23,1 Mrd. € hergestellt. Die Produktion stieg damit von 2005 bis 2008 um mehr als 12 % pro Jahr. Im gleichen Zeitraum stieg die Zahl der Beschäftigten in der Photonik-Branche um 27.000 auf 128.000 – ein Plus von über 8 % pro Jahr.¹

¹ OPTECH Consulting, Februar 2010

Sechs Bereiche wiesen ein Produktionsvolumen von mehr als 2 Mrd. € auf und damit einen Anteil von jeweils mehr als 10 % am Gesamtvolumen (siehe Abbildung). Sie sind wichtige Zielmärkte für die Photonik in Deutschland:

- Energietechnik: 5,3 Mrd. €
- Bildverarbeitung und Messtechnik: 4,2 Mrd. €
- Medizintechnik und Life Science: 3,5 Mrd. €
- Optische Komponenten und Systeme: 2,8 Mrd. €
- Produktionstechnik: 2,6 Mrd. €
- Beleuchtungstechnik: 2,5 Mrd. €

In den Export gingen über 65 % der Produktion, in einigen Bereichen über 80 %. Die starke Position am Markt fußt auf einem hohen Anteil der Ausgaben für Forschung und Entwicklung. Die FuE-Quote der deutschen Photonik-Branche beträgt fast 10 %. Bei den Beschäftigten sind etwa 20 % mit einer Hoch- oder Fachhoch-

schulausbildung qualifiziert, mehr als doppelt so viel wie im übrigen produzierenden Gewerbe. Die Unternehmen wissen: Innovation braucht Köpfe.

Der Weltmarkt für Produkte der Photonik im Jahr 2008 betrug 256 Mrd. € (siehe Abbildung). Damit konnten die Unternehmen am Standort Deutschland ihren Anteil auf 9 % erhöhen (2005: 7,8 %), in ihren Leitmärkten sogar auf über 17 % (2005: 15 %).

In 2009 spiegelte sich die Finanz- und Wirtschaftskrise auch in der Photonik wider: Die Produktion in Deutschland ging um 20,4 % auf 18,4 Mrd. € zurück. Dabei profitierte die Branche von ihrer Diversifizierung: Während die photonischen Technologien in der prozyklischen Produktionstechnik einen sehr starken Rückgang zu verzeichnen hatten (minus 46 %), konnte der Markt im Segment Medizintechnik und Life Science fast vollständig gehalten werden (minus 3 %).

Insgesamt konnte sich die Branche in 2009 auf gutem Niveau stabilisieren. Dabei konnten die Unternehmen ihre

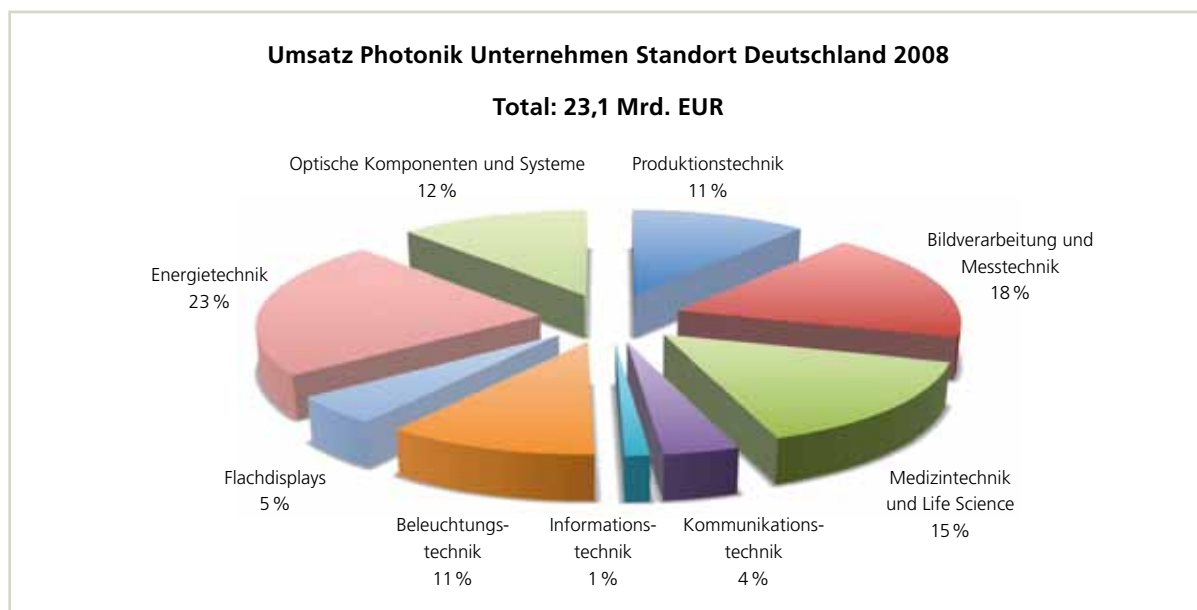


Abbildung 1: Produktionsvolumen der Unternehmen am Standort Deutschland 2008, aufgeteilt nach Marktsegmenten (Quelle: OPTECH Consulting)

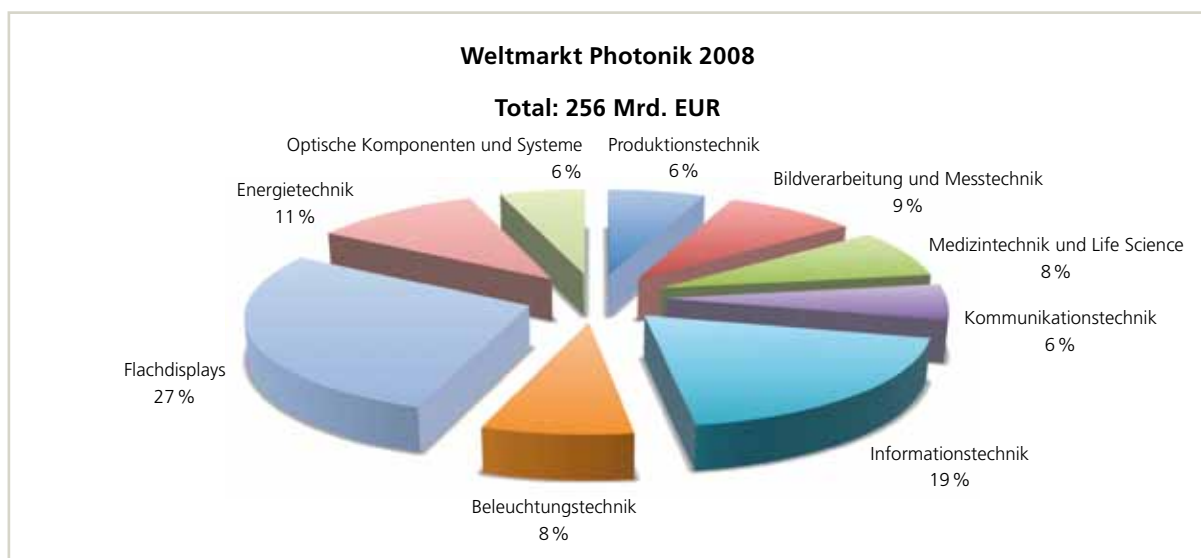


Abbildung 2: Weltmarkt Photonik 2008, aufgeteilt nach Marktsegmenten (Quelle: OPTECH Consulting)

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nahezu komplett halten: 120.000 Beschäftigte bedeuten ein Minus von etwa 6 %. Damit setzt die Branche heute – trotz der Krise – 20.000 Menschen mehr ein als noch 2005.

Und für 2010 stehen die Zeichen auf Wachstum. So erwarten die Unternehmen im Segment Produktionstechnik aktuell einen Anstieg der Umsätze um mindestens 25 %.

Deutsche Unternehmen sind in Märkten aktiv, die in den nächsten Jahren überdurchschnittlich wachsen werden – allem voran Beleuchtung und Energie. Deshalb hält die Industrie an ihren Zielen fest: kräftiger wachsen als der Wettbewerb und neue Arbeitsplätze schaffen. Das Etappenziel für 2015: 20.000 neue Arbeitsplätze in Deutschland.

Die Photonik-Branche wächst zusammen, wird durch Markterfolge sichtbar und steht damit zunehmend im Fokus von Marktforschern und Analysten. Diesen Erfolg bekräftigt das Branchenranking des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW): Die Optischen Technologien sind

Deutschlands Zukunftsbranche Nummer eins – noch vor der Pharmaindustrie.² Die Kernaussagen des Berichts:

- **Innovationskraft:** Spitzenwerte bei den Innovationsausgaben (Platz eins unter den Branchen) und der Anzahl der Patente (Platz zwei) sind die Grundlage für international sehr wettbewerbsfähige Produkte der deutschen Photonik-Industrie.
- **Rahmenbedingungen:** Die frühe und weitsichtige Förderung innovativer Projekte und der damit verbundene Aufbau von Netzwerkstrukturen sind eine Stärke der Photonik am Produktions- und Forschungsstandort Deutschland. Gerade die guten Rahmenbedingungen in Deutschland, so die Analyse, ermöglichen es der Branche, von den globalen Trends, der weltweiten Verflechtung und Wissensintensivierung zu profitieren und die Wettbewerbsposition weiter auszubauen.

² IW, Deutschlands Zukunftsbranchen. Branchenranking. Summary des Berichts, Juni 2009



Und auch der aktuelle Branchenreport der Deutschen Bank betont es:³

- »Licht ist wichtig für Wachstum.«
- »Die Optischen Technologien sind Schlüsseltechnologien für die Zukunft.«
- »Ihr Potenzial ist bei weitem noch nicht ausgereizt.«

2.2

VON DFG BIS DAX – EINE BRANCHE FORMIERT SICH

Erstmals tritt die Photonik-Branche in weiten Bereichen einheitlich auf, eine Fach-Community und regionale Netzwerke bilden sich heraus, Institute, kleine und große Unternehmen arbeiten interdisziplinär zusammen – ein Schulterschluss von DFG bis DAX. Das gemeinsame Engagement von Wirtschaft, Wissenschaft und Staat, das gemeinsame Hinwirken auf das strategische Ziel, in Deutschland mit der Photonik in der ersten Liga mitzuspielen und hierdurch den Wirtschaftsstandort Deutschland zu stärken, haben diesen Erfolg möglich gemacht.

Forschung und Innovation sind immer ein Mannschaftsspiel. In diesem Spiel müssen alle Positionen gut besetzt sein, angefangen bei der Modellierung, bei den Materialien, über Komponenten bis zum System und schließlich bis zum Anwender. Die Mannschaften stehen dabei im Wettbewerb um die besten Ideen und Lösungen, national und international.

Forschung und Innovation bedingen hohe Investitionen und auch Förderung, um frühzeitig – weit im Vorfeld eines Marktes – neue Technologien zu erschließen. Im Jahr 2008 betrugen die Aufwendungen der Unternehmen der Photonik-Branche für Forschung und Entwicklung in Deutschland über 2 Mrd. €.

Dieses Engagement wurde durch das BMBF-Förderprogramm »Optische Technologien – Made in Germany« unterstützt. Im Rahmen der Projektförderung, angelegt in der Verbundforschung von Unternehmen und Instituten, arbeitet die Branche an gemeinsamen Forschungszielen. In den Optischen Technologien wurden seit dem Programmstart im Jahr 2002 fast 150 dieser Verbünde gebildet mit nahezu 1000 Partnern. Großunternehmen, der Mittelstand und Forschungseinrichtungen arbeiten Hand in Hand zusammen. In diesem Rahmen wurden auch drei strategische Partnerschaften für den Standort Deutschland initiiert: zu den organischen LED, zur organischen Photovoltaik und zur molekularen Bildgebung. Allein in diesen Innovationsallianzen engagiert sich die Wirtschaft über zehn Jahre mit ca. 1,5 Mrd. €. Ein aktuelles Highlight ist der Spitzencluster »Forum Organic Electronics« in der Metropolregion Rhein-Neckar. Derartige Erfolge waren nur möglich, weil die wissenschaftliche und wirtschaftliche Basis in Deutschland über viele Jahre systematisch aufgebaut wurde. Dieser Prozess muss fortgesetzt werden.

Deutschland hat heute eine weltweit sichtbare Exzellenz auf dem Gebiet der Photonik erreicht – eindrucksvoll belegt durch zahlreiche hochrangige Preise und Auszeichnungen. Beispiele der letzten Jahre sind:

- Physik-Nobelpreis 2005:
Prof. Dr. Theodor W. Hänsch, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching
- 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

³ Deutsche Bank Research – Licht bei der Arbeit, Februar 2010

- 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 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
- HERMES AWARD 2010:
LPKF Laser & Electronics AG, Garbsen
- Deutscher Umweltpreis 2010:
Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath

Zudem bestätigen Exzellenzcluster und Graduate Schools der Optik in Erlangen, Göttingen, Karlsruhe und München die Spitzenqualität von Forschung und Lehre in Deutschland.

In München, mitten in Europa, ist es gelungen die Welt-Leitmesse LASER.World of PHOTONICS zu etablieren. Mehr als tausend ausstellende Unternehmen, mehr als 27.000 Fachbesucher aus aller Welt sowie der neu geschaffene Kongress »World of Photonics« unterstreichen die weltweite Bedeutung des Messeplatzes und der Photonik.

Die Branche formiert sich auch in Europa: Im Dezember 2005 wurde – unter starker deutscher Mitwirkung – die europäische Technologieplattform »Photonics21« gegründet, in der sich heute mehr als 1.400 Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft aus 35 europäischen Ländern engagieren. Die Europäische Kommission zählt die Photonik mittlerweile zu den fünf »Key Enabling Technologies« für Europa und hat einen ressortübergreifenden Strategieprozess angestoßen. Auch dies zeigt: Die Photonik steht vor einem erneuten Aufbruch.

In einem gemeinsamen Handeln stellen sich die Akteure auch der Herausforderung, den Nachwuchs zu sichern – mit Gemeinschaftsinitiativen von der Grundschule bis zur Universität. Die Wanderausstellung »Faszination Licht« hat in Deutschland bislang etwa 500.000 Besucher erreicht. An den Hochschulen bieten über 200 Lehrstühle der Photonik mehr als tausend Lehrveranstaltungen pro Jahr an. Jüngst wurden in Jena, Karlsruhe und Erlangen mit Hilfe der Industrie im Rahmen einer »Public-Privat-Partnership« internationale Masterstudiengänge für Photonik eingerichtet. Die Akteure unterstützen auch die Initiative »Die Innovationsliga«: In einer gezielten, regionalen Nachwuchsförderung sind Unternehmen und Forschungseinrichtungen der Photonik Partner für Schulprojekte. Die Branche ist bereit, ihren Beitrag zu leisten.

Es liegt auf der Hand: Die Photonik ist auf dem Vormarsch, die Branche formiert sich. Dieser Weg soll konsequent fortgesetzt werden. Dafür müssen wir die Kräfte von Wirtschaft und Verbänden, Wissenschaft und Politik in einer nationalen Anstrengung bündeln.

3 LÖSUNGEN AUS LICHT – DIE CHANCEN DER PHOTONIK



3.1

PRODUKTION UND MASCHINENBAU

Die deutsche Position

Die Produktion ist ein wichtiger Sektor der deutschen Volkswirtschaft. Deutschland muss Standort für forschungs- und entwicklungsintensive Produkte bleiben. In den Szenarien für eine moderne Produktionstechnologie bildet die Photonik einen festen Bestandteil: Allein sieben der 32 Thesen des Bundesverbandes der deutschen Industrie e.V. (BDI) zur Forschung für die Zukunft der industriellen Produktion in Deutschland zielen direkt auf den Einsatz Optischer Technologien.

Weil das »Werkzeug Licht«, der Laser, Prozesse und Verfahren automatisiert und flexibilisiert, Qualität steigert und Miniaturisierung möglich macht, sichern wir nachhaltig die Wettbewerbsfähigkeit des Standorts Deutschland. Lasertechnik schafft die Voraussetzung für neue, bessere Produkte und Verfahren und trägt entscheidend dazu bei, dass »Made in Germany« seine Strahlkraft auch in Zukunft behält.

Deutschland hat sich im Segment Lasertechnik vom Importeur zum Exporteur entwickelt. Die deutsche Lasertechnik ist weltweit an der Spitze: Jedes vierte Lasersystem weltweit ist »Made in Germany«, die Exportquote liegt bei etwa 70 %. Und: Mehr als zwei Drittel aller Lithographiesysteme kommen aus Europa – mit starker deutscher Beteiligung. Lasersysteme sind heute mit mehr als 10 % des gesamten Umsatzvolumens eine wichtige Säule der deutschen Werkzeugmaschinenhersteller.



Remote-Schweißen mit einem Scheibenlaser © Bayerisches Laserzentrum/Fuchs

3.1.1

Werkzeug Licht – Das gesamte Anwendungsspektrum erschließen

Das Werkzeug Licht und insbesondere das Werkzeug Laserstrahlung nimmt in der heutigen Produktion eine Schlüsselposition ein. Die hohe Flexibilität und die berührungslose, verschleißfreie Wirkungsweise sowie die für die jeweilige Fertigungsanforderung adaptierbare Energiedeposition eröffnen insbesondere für automatisierte Produktionsprozesse neue Möglichkeiten. Dies hat in der Vergangenheit zu einer Vielzahl industrieller Anwendungen mit Verfahren wie Schweißen, Schneiden, Bohren, Beschriften und Strukturieren geführt. Durch die Entwicklung leistungsfähiger UV-Laser und den aktuellen Fortschritt bei Hochleistungs-Ultrakurzpulslasern werden zunehmend auch Verfahren industrialisiert, bei denen nicht nur die lokale thermische Wirkung der Laserstrahlung ausschlaggebend für den Einsatz des Lasers ist, sondern auch deren direkte photonische Wirkung, bei der beispielsweise photochemische Prozesse initiiert werden. Das Werkzeug Licht bietet daher Verfahrenstechniken für die industrielle Fertigung, die mit anderen Mitteln nicht umsetzbar sind.

Dabei sind die Möglichkeiten, die das Werkzeug Licht für industrielle Fertigungsprozesse bietet, heute bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Es gilt, durch die Entwicklung neuer Laserstrahlquellen und leistungsfähiger optischer Systeme das gesamte Potenzial zu erschließen, um damit durch höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten, selektive werkstoffangepasste Wirkung und neue Fertigungsprozesse Wettbewerbsvorteile für die deutsche Industrie zu schaffen. Mit den einzigartigen charakteristischen Verfahrenseigenschaften der Laserstrahlung lassen sich beispielsweise neue Prozessketten mit deutlichen Kosten- und Geschwindigkeitsvorteilen generieren und Bauteile aus einem komplexen Werkstoffmix für optimale Anpassung von Funktion und Eigenschaft er-

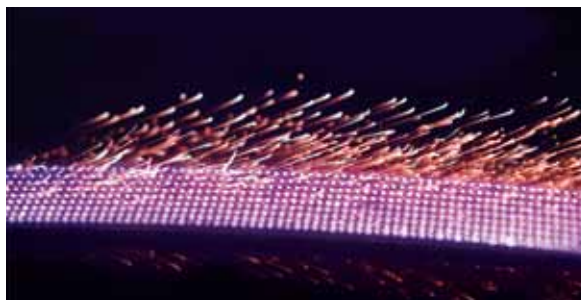
zeugen. Die verschleißfreie Wirkung des Lasers sichert eine gleichbleibende Präzision vom ersten bis zum letzten Werkstück, was insbesondere für Werkstoffe, deren konventionelle Bearbeitung mit einem hohen Werkzeugverschleiß einhergeht, von besonderem Nutzen ist. Diese Vorteile verstärken den aktuellen Trend von der klassischen mechanisch und elektronisch orientierten Fertigung hin zu photonisch gestützten Fertigungstechniken.

Ausschlaggebend für diesen Trend sind dabei nicht nur die bereits etablierten Verfahren wie Schweißen oder Schneiden sondern künftig auch relativ neue verfahrenstechnische Ansätze wie

- Selective Laser Melting (SLM)
- Volumenmodifikation von Werkstoffen durch nichtlineare Prozesse
- Laserdotieren
- Strukturierung mit athermischem Abtrag
- Laserchemie an Oberflächen
- Multiphotonen-Polymerisierung

Diese zum Teil noch völlig neuen Verfahren erlauben gänzlich neue Produkteigenschaften bzw. gänzlich neue Fertigungsketten für die Herstellung komplexer Produkte unter den stetig wachsenden Anforderungen einer größeren Flexibilisierung, kürzeren time-to-market-Zielen und einer Minimierung des Rohstoffverbrauchs.

Neben diesen rein fertigungstechnischen Ansätzen ermöglicht die Lasertechnik auch in anderen Bereichen neue Lösungen, die mit konventionellen Ansätzen nicht zu realisieren sind. Dabei reicht das Spektrum von Consumer-orientierten lasertechnischen Produkten wie holographischem Fernsehen und dezentraler Wasserentkeimung mittels UV-Laserdioden bis hin zu neuen Möglichkeiten der Rohstofferschließung durch Laser-Tiefbohrungen.



3.1.1.1

Die deutsche Position

Die Lasermaterialbearbeitung ist ein herausragendes Beispiel für die hervorragende Position, die sich deutsche Unternehmen im Bereich der Photonik für die Fertigung erarbeitet haben. Deutschland hat sich in diesem Marktsegment vom Importeur zum Exporteur entwickelt. Die Exportquote beträgt etwa 70 %. Jedes vierte weltweit eingesetzte Lasersystem ist »Made in Germany«.

In 2008 beschäftigten die Photonik-Segmente Produktionstechnik, Bildverarbeitung, Messtechnik, optische Komponenten und Systeme etwa 60.000 Menschen in Deutschland.⁴ Mit knapp 10 Mrd. € erreichte Deutschland einen Weltmarktanteil von 18 % und war damit weltweit die Nummer eins. Lasersysteme sind inzwischen mit mehr als 10 % des gesamten Umsatzvolumens zu einer wichtigen Säule der deutschen Werkzeugmaschinenhersteller geworden.

Aktuell wächst der Markt für die Lasermaterialbearbeitung – nach einem starken Rückgang in 2009 – wieder mit zweistelligen Raten, für 2010 wird ein Anstieg um 25 % erwartet. Bislang sind jedoch **erst 10 bis 20 % der Anwendungen erschlossen**. In der weiteren Erschließung dieses Anwendungspotenzials liegt eine der wesentlichen Herausforderungen für die Zukunft. Deutschland, das Land des Maschinenbaus, bleibt mit dem Photon der Ausrüster der Welt.

3.1.1.2

Herausforderungen

Die Herausforderungen, die in nächster Zukunft adressiert werden müssen, orientieren sich neben einer weiteren Erschließung des gesamten Anwendungsspektrums vor allem auch am steigenden Bedarf nach energie- und ressourcenschonenden Produkten. Dies betrifft insbesondere die folgenden Bereiche, in denen die Lasertechnik neue Fertigungslösungen bieten kann und bei denen

Foto links: Hydrophobe Oberfläche durch Lasermikrostrukturierung © Fraunhofer ILT

Foto Mitte: Laserschneiden einer Hüfttraspel für die Medizintechnik © ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co. KG

Foto rechts: Hochgeschwindigkeits-Laserbohren von Solarzellen © Fraunhofer ILT

mit lasertechnischen Verfahren neue Produktqualitäten geschaffen und Kostenvorteile in der Fertigung erzielt werden können:

- Energie
- Elektronik
- Werkstoff-Hybride
- Mass Customization und Rapid Manufacturing
- Drucktechnik und Produktkennzeichnung

Für die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren mit hoher Produktivität bzw. die Erzeugung neuer Bauteilfunktionalitäten bedarf es einer grundsätzlichen Weiterentwicklung bereits existierender Laserprozesse sowie der Erforschung und Entwicklung neuer Fertigungsverfahren, bei denen die Eigenschaften des Werkzeug Lichts verstärkt genutzt werden. Hier ist vor allem an die Kombination konventioneller Prozesse mit lasertechnischen Verfahren zu denken, bei denen die Selektivität der Lasertechnik mit der Produktivität flächiger Verfahren kombiniert wird. Darüber hinaus sind neue Ansätze zu finden, um über eine 100%ige Prozesskontrolle und selbstlernende Maschinenoptimierung ein Höchstmaß an Prozesssicherheit auch bei kleinen Stückzahlen und flexibler Fertigung zu garantieren.

Im Einzelnen ergeben sich Herausforderungen in den folgenden Anwendungsgebieten und Forschungsfeldern.

Energie

Die nachhaltige Bereitstellung von Energie ohne Belastung der Umwelt ist eine der wichtigsten Herausforderungen, der sich die heutige Gesellschaft stellen muss. Durch langfristige Reduzierung fossiler Energieträger wie

⁴ OPTECH Consulting (2009)



Foto links: Automatisiertes Rohrglasfügen mittels Laser für Solarröhrenkollektoren © Laser Zentrum Hannover

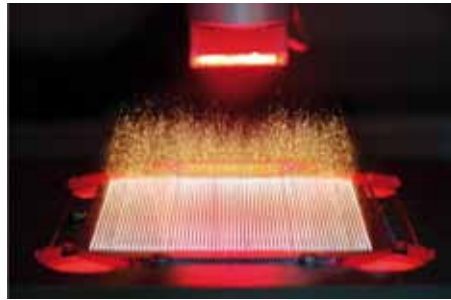


Foto rechts: Laserprozessieren einer Solarzelle © Fraunhofer ISE

Kohle und Öl treten dabei vor allem regenerative Energiequellen, wie Wind, Sonne und Biomasse in den Mittelpunkt des Interesses. Obwohl heute erst ein Bruchteil der Energie über regenerative Energiequellen erzeugt wird, gilt es jedoch gerade jetzt, die maßgeblichen Entwicklungen anzustoßen, um künftig ausreichend Energie zu wirtschaftlichen Konditionen bereitstellen zu können. Das Hauptaugenmerk dieser Entwicklungen liegt dabei in:

- Erhöhung des Wirkungsgrads der Energieerzeugung
- Erhöhung der Produktivität und Reduktion der Kosten bei der Herstellung von Komponenten zur Energiewandlung

Darüber hinaus sind erhebliche Anstrengungen in der Entwicklung neuer Energiespeicher zu leisten, um die systembedingten Nachteile von Wind- und Sonnenenergie zu puffern und elektrische Energie auch mobil mit großer Leistungsfähigkeit bereitstellen zu können. Von den im Bereich der Energietechnik vordringlichsten Forschungsmaßnahmen im Zusammenhang mit der Nutzung photonischer Technologien sind die nachfolgenden Themen zu betrachten:

Photovoltaik – Für die weitere Durchdringung des Energiemarktes mit Photovoltaik-Systemen sind neben neuen Zell- und Modulkonzepten vor allem hocheffiziente Produktionsverfahren gefragt, die eine schnelle Amortisation der hohen Investitionskosten ermöglichen und die Durchsatzraten in der Produktion erhöhen. Neue Laserfertigungsverfahren tragen entscheidend zum Erreichen der gesteckten Ziele bei. So werden Laserverfahren heute bereits in der Kantenisolation an kristallinen Solarzellen und in der integrierten Serienverschaltung sowie der Randentschichtung an Dünnschicht-Solarzellen eingesetzt. Darüber hinaus gibt es für alle Solarzellentypen, angefangen von kristallinen Zellen über anor-

ganische a-Si- und $\mu\text{c-Si}$ -Zellen⁵ und CIS/CIGS-Zellen⁶ bis hin zu organischen Solarzellen eine Vielzahl weiterer Laserprozesse, die neue Zellkonzepte ermöglichen und sowohl eine Erhöhung der Zell- und Moduleffizienz als auch eine Erhöhung der Produktivität und Modulqualität erlauben. Zum Erreichen dieses Zieles gilt es daher die Performance und Qualität bereits bestehender Laserverfahren zu erhöhen als auch neue lasertechnische Verfahrensansätze für die Solarzellenfertigung zu entwickeln und diese für die Massenfertigung zu qualifizieren.

Vorrangig sind dabei heute die folgenden Laserverfahren zu betrachten, die durch eine Effizienzerhöhung zu einer direkten Steigerung der Produktivitätserhöhung und zur Realisierung neuer, bereits im Labor vorhandener Zelldesigns beitragen können:

- Hochgeschwindigkeitsbohren für rückseitenkontaktierte Zellen: Für EWT-Zellen⁷ werden eine Vielzahl von Bohrungen im Durchmesserbereich von 50 – 70 μm benötigt. Unter Fertigungsbedingungen sind hier bis zu 10.000 Bohrungen/Sekunde bei geringstmöglicher Schädigung des Wafers einzubringen.
- Ortsselektives Dotieren von Emitter und Kontaktbereichen: Zur Verbesserung der Zelleffizienz ist eine niedrige Dotierungskonzentration in der Zelloberfläche vorteilhaft. Diese führt allerdings zu hohen Übergangswiderständen im Bereich der Kontakte. Durch selektives Laserdotieren im Bereich der Kontaktfinger kann hier eine Optimierung des lateralen Dotierungsprofils erfolgen.
- Einstellung tiefenselektiver Dotierungsprofile: Künftig kann neben einem lateralen Dotierungsprofil auch eine tiefenselektive Dotierung eine wichtige Rolle in der Zelloptimierung spielen. Dies gilt vor allem für Tandemzellen aus kristallinen und Dünnschichtzellen.

5 a-Si: amorphes Silizium, $\mu\text{c-Si}$: mikrokristallines Silizium

6 CIS: Kupfer-Indium-Disulfid, CIGS: Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid

7 EWT: Emitter-Wrap-Through

- Selektives Abtragen von Multischicht-Systemen für Dünnschicht- und kristalline Zellen: In der Herstellung von Dünnschicht-Solarmodulen ist die Laserstrukturierung unverzichtbares Werkzeug. Insbesondere bei CIS-Zellen und bei flexiblen Zellen besteht jedoch noch erheblicher Entwicklungsbedarf, um zu einer reproduzierbaren und sicheren Abtragstechnik zu gelangen.
- Energieminimiertes Löt- und Schweißen für die Modulherstellung: Dünnere Wafer erfordern ein energieminimiertes Kontaktierungsverfahren, um Bruch und Fehler zu vermeiden. Hier bieten sich Hochgeschwindigkeits-Laserprozesse wie Löt- und Schweißen als Alternative zu konventionellen Lösungen an.
- Laserunterstützte Metallisierungsverfahren
- Lasergestützte Texturierungsverfahren zur Absorptionserhöhung
- Hybridprozesse (Plasma, Laser und Ofenprozesse) sowie selektive Laserfunktionalisierung dünner Schichten

Zur Erhöhung der Ressourceneffizienz in der Fertigung und zur Senkung der Produktionskosten sind generell Entwicklungen zur Substitution von Ofenprozessen durch selektive Laserprozesse mit oberflächennahem Heizen und photonischer Dünnschichtaktivierung zu leisten.

Solarthermie – Neben der Photovoltaik eignen sich solarthermische Kraftwerke sehr gut für die Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie. Voraussetzung ist allerdings eine kontinuierliche Sonneneinstrahlung, die nur in bestimmten Regionen der Erde gewährleistet werden kann. Die Sonnenstrahlung wird in Parabolrinnensystemen, Solarturmkraftwerkssystemen und Dish-Sterling-Systemen konzentriert und heizt in der Regel ein Zwischenmedium (vorwiegend Öl) auf, um anschließend über einen Dampferzeuger einen konventionellen Dampfturbinengenerator anzutreiben. Da diese

Art der Stromerzeugung nur in Wüstenregionen funktioniert, muss der erzeugte Strom über große Distanzen zum Verbraucher geführt werden.

Durch die hohen Temperaturen, bei Parabolrinnen bis ca. 400°C und bei Konzentratorkraftwerken bis ca. 1.100°C werden hohe Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe gestellt. Hieraus ergeben sich für den Bau solarthermischer Kraftwerke folgende Anwendungsszenarien für den Lasereinsatz:

- Laserschweißtechnik für Hochtemperaturwerkstoffe: Hier ist vor allem eine Schweißtechnik für Inconel-Werkstoffe gefordert, die den hohen Ansprüchen an Rissfreiheit, Temperaturwechselbelastung und hohen Dauertemperaturen ohne Geometrie- und Qualitätsverlust gerecht wird. Bisher werden viele Bauteile aus diesen Werkstoffen noch mechanisch bearbeitet. Zur Kostenreduktion sollte eine flexible Schweißtechnik mit Laserstrahlung beitragen. Darüber hinaus ist bei vielen Hochtemperatur-Kollektoren eine Füge-technik für Keramik-Metall- und Glas-Metall-Verbindungen nötig. Während die bei Parabolrinnen verwendeten Glas-Metall-Verbindungen bereits mit dem Laser gefügt werden können, fehlen nach wie vor hochtemperaturfeste Keramik-Metall-Füge-techniken.
- Laser-Texturierung für Absorberstrukturen: Wesentlich für einen hohen Wirkungsgrad der Solarthermie-Kraftwerke ist eine hohe Absorption der Kollektoren. Hier werden derzeit Beschichtungen verwendet, die den Fertigungsprozess und damit das Produkt verteuern. Mit laser- oder plasmabasierenden Nanostrukturierungstechniken, gegebenenfalls als Hybridtechnologie, ließen sich hier deutliche Kostenvorteile erzielen.
- Hochstrom-Gleichstrom-Übertragung: Diese noch relativ neue Hochleistungs-Übertragungstechnik für elektrische Energie könnte maßgeblich für den Erfolg von Solarthermie-Kraftwerken in Wüstenregionen sein, z.B. DESERTEC. Für diese Technologie

werden eine Vielzahl hochtemperaturfester Verbindungen in den Gleichrichtern (IGBTs – Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode) gefordert, für die die Laserschweißtechnik mit Hochleistungsfaserlasern sowie spezielle flächige Laserlötverbindungen eine technische Lösung darstellen kann.

Energiespeicher – Ein wesentliches Element in der mobilen Versorgung mit elektrischer Energie ist ein kostengünstiger Energiespeicher. Die heute verwendeten Lithium-Ionen-Akkumulatoren sind jedoch noch nicht leistungsfähig genug bzw. noch zu teuer, um mit Verbrennungsmotoren in vollem Umfang konkurrieren zu können. Hier bedarf es grundlegender Entwicklungen zu neuen Zelltypen und technologischen Ansätzen sowie einer kostengünstigen Produktionstechnik, die den Anforderungen einer Massenproduktion gerecht wird. Die Lasertechnik kann hier mit verschiedenen Verfahren entscheidend zu einer Effizienzsteigerung und Produktivitätserhöhung beitragen. Im Einzelnen sind hierfür die folgenden Themenbereiche relevant:

- Nanostrukturierung der Elektroden
- Herstellung nanoskaliger Funktionsschichten durch Laserprozesse
- Laserbeschichtung und Konditionierung der Schichten über Laserprozesse
- Athermisches Trennen und energieminiertes Fügen von Elektroden und Zellen
- Laserbasiertes Verkapseln
- Laserfügen von Batteriepacks

Neben diesen Schwerpunkten lassen sich eine Reihe weiterer Anwendungsgebiete im Themenfeld Energie identifizieren, bei denen lasertechnische Verfahren eine besondere Rolle für neue funktionale Bauelemente spielen. Hierzu gehören beispielsweise gewichts- und steifigkeitsoptimierte Rotoren für Windkraftanlagen, die über hybride lasergeschweißte Werkstoffkombi-

nationen aus CFK/GFK⁸-Metall erzeugt werden oder effizienzoptimierte Turbinenbauteile für Hochtemperaturanwendungen, die mittels SLM und laserbasierter Beschichtungsverfahren hergestellt werden. Darüber hinaus bieten Laserverfahren in der Brennstoffzellenfertigung mit dem selektiven Beschichten und dem Hochleistungsstrukturieren von Bipolarplatten hochproduktive Ansätze, die gleichermaßen ressourcenschonend und kosteneffizient sind.

Elektronik

Die Elektronik ist bisher in weiten Bereich von Silizium-basierten Komponenten beherrscht. Prozessoren, Speicher und auch passive Bauelemente werden über CMOS-Verfahren⁹ hergestellt, die eine komplexe und entsprechend teure Maschinentechnik erfordern. Für Höchstleistungs-Bauelemente mit Strukturgrößen < 50 nm steht die EUV-Technik¹⁰ vor dem industriellen Durchbruch. Eine höhere Funktionalisierung der bisherigen CMOS-Bauteile geht einher mit der Integration optoelektronischer Einheiten, die künftig über eine selektive Innenstrukturierung und die Ausbildung von vergrabenen Wellenleitern mittels Lasern im mittleren Infrarot im Volumen erfolgen kann. Mit dem Trend nach stärkerer Funktionalisierung von Bauteilen und Komponenten auch bei niedrigpreisigen Produkten steigt jedoch der Bedarf nach sehr kostengünstigen Elektronikkomponenten, die zum Teil auch als Wegwerf-Komponenten betrachtet werden müssen. Ein Beispiel hierzu ist der zunehmende Einsatz von RFID-Labels¹¹, die heute noch in einer Kombination aus Silizium-Chip und Polymer- oder Papiersubstrat aufgebaut sind.

Organische Elektronik – Eine Lösung für sehr kostengünstige Elektronikkomponenten kann der Einsatz orga-

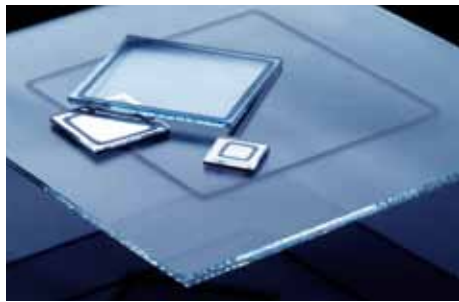
8 CFK: Kohlenstofffaser verstärkter Kunststoff, GFK:

Glasfaser verstärkter Kunststoff

9 CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

10 EUV: extremer UV-Spektralbereich

11 RFID: Radio-Frequency Identification



nisch-elektronischer Bauelemente sein, die jedoch eine gänzlich neue Produktionstechnik erfordern. Die Lasertechnik kann dabei mit verschiedenen Verfahren eine sowohl kostengünstige als auch qualitativ hochwertige Lösung bieten. Folgende Laserverfahren zur Herstellung und Bearbeitung von Produkten und Komponenten der organischen Elektronik zeigen dabei ein hohes Potenzial:

- Direktstrukturierung organischer Elektronik und organischer leitfähiger Schichten, wobei durch die Anwendung von Multiphotonenprozessen Strukturgrößen im Mikrometer- und Submikrometerbereich denkbar sind, so dass trotz geringerer Elektronenbeweglichkeit eine hohe Performance der Bauteile erzielt werden kann
- Laserbasierte Beschichtungsverfahren für organische Elektronik
- Laserbasierte Konditionierung flächig aufgetragener Schichten (nasschemisch, plasmatechnisch)

Mit diesen Prozessen kann die Lasertechnik zu einem Paradigmenwechsel in der Elektronik beitragen, der sich in einer Vielzahl von Consumer-Produkten mit deutlich geringeren Gestehungskosten und »intelligenten« Produkten z.B. im Lebensmittelbereich, in der Textiltechnik und in der Druck- und Identifikationstechnik manifestiert.

Dünnschichttechnik – Elektronische Komponenten sind in der Regel aus einer Vielzahl einzelner Schichten aufgebaut, die in einer Abfolge aus Vakuum-Beschichtungstechnik und Lithographie mit anschließenden Ätzprozessen erzeugt werden. Diese Prozesse sind zwar effektiv, da sie die gleichzeitige Bearbeitung einer Vielzahl von Komponenten erlauben, aufgrund der komplexen Maschinenteknik sind sie jedoch kostenintensiv und nicht immer ressourceneffizient. Fortschritte in der nasschemischen Herstellung ultradünner Schichten lassen jedoch erwarten, dass über eine nachfolgende Laserbehandlung mit exakter örtlicher und zeitlicher Energie-deposition hochfunktionale Schichten mit deutlich verringerten Kosten und hoher Produktflexibilität er-

Foto links: Laserbasiertes Glaslötverfahren für hermetisch dichte Verbindungen © Fraunhofer ILT

Foto rechts: Laserbearbeitung mit Pulverzuführung © TRUMPF GmbH + Co. KG

zeugt werden können. Dies betrifft z.B. die folgenden Prozesse:

- Laserfunktionalisierung nasschemisch deponierter Schichten
- Rekristallisation und thermische Konditionierung dünner Schichten

Weitere Prozesse zur Laserfunktionalisierung sind vor allem im Bereich der organischen Elektronik zu erwarten.

Werkstoff-Hybride

Die Funktionalität eines Bauteils hängt wesentlich vom eingesetzten Werkstoff ab. Dabei ist es heute 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. Aus diesem Grund werden derzeit bezüglich der Werkstoffwahl häufig Kompromisse eingegangen, die zu Lasten der Funktionalität des Bauteils oder auch der Baugröße einer Komponente gehen. Die Lasertechnik kann hier spezifische Lösungen mit entsprechenden Fügeverfahren und Strukturierungstechniken liefern, mit denen die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe im Sinne eines Werkstoff-Hybrids kombiniert oder die spezifischen Eigenschaften eines Werkstoffes gezielt verändert und an die Nutzungsanforderungen angepasst werden können. In diesem Zusammenhang sind die nachfolgenden Themengruppen zu betrachten.

Artungleiche Werkstoffkombinationen – Geringes Gewicht und hohe Festigkeit, hohe elektrische Leitfähigkeit und hohe Härte, Bearbeitbarkeit und thermische wie chemische Beständigkeit – dies sind Eigenschafts-

kombinationen, die selten von einem Werkstoff allein erfüllt werden. Aus diesem Grund werden für elektronische und elektrotechnische Anwendungen, Anwendungen in der Energieerzeugung sowie in der Fahrzeugtechnik vermehrt Werkstoffe miteinander kombiniert. Dabei lassen sich derzeit viele der gewünschten Werkstoffkombinationen mit konventionellen Verfahren nicht oder nur ungenügend fügen. Häufig wird als Fügeverfahren das Kleben eingesetzt, dass jedoch nicht hochtemperaturfest ist und lange Prozesszeiten bedingt. Die Lasertechnik bietet hier aufgrund der sehr selektiven Energiedeposition neue Möglichkeiten stoff- und form-schlüssige Werkstoff-Hybride zu realisieren, die in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt werden können. Prioritär sind dabei die folgenden artungleichen Werkstoffkombinationen:

- Glas-Metall
- Glas-Kunststoff
- Metall-Kunststoff
- CFK/GFK-Metall
- Cermet¹²-Metall
- Keramik-Metall

Selektive Werkstofffunktionalisierung – Für die Einstellung einer speziellen Bauteilfunktionalität ist es häufig nötig die Eigenschaften des Grundwerkstoffs von den Eigenschaften der Oberfläche zu trennen. Hierzu werden derzeit in der Regel Beschichtungsverfahren wie PVD¹³, CVD¹⁴ und Plasmabeschichtungstechniken eingesetzt. Diese Verfahren sind entweder, wie bei den Vakuum-Prozessen notwendig, mit einem Bruch in der Prozesskette verbunden, da von einem In-Line-

Verfahren auf ein Batch-Verfahren umgestellt werden muss oder die thermische Belastung insbesondere bei kleinen Bauteilen zu hoch wird. Daher werden hier neue Ansätze erforderlich. Neben neuen plasmatechnischen Entwicklungen wie pulsaren Plasmaquellen stellt der Einsatz lasertechnischer Verfahren eine Alternative zur bisherigen Vorgehensweise dar. Folgende Prozesse sind Beispiele für die Verbesserung der Gebrauchseigenschaften oder gar neuer Produktfunktionalitäten:

- Mikro- und Nanostrukturierung von Oberflächen zur Erzeugung tribologisch beanspruchter Oberflächen
- Strukturierung von Oberflächen im Nanometermaßstab zur Einstellung optischer Funktionalitäten
- Mikrofunktionalisierung von Oberflächen zur Einstellung von Benetzung und haptischen Eigenschaften
- Selektive Laser-Nachbehandlung nasschemisch aufgetragener Schichten als Alternative zu Vakuum-Beschichtungsprozessen

All diese Verfahren lassen sich als In-Line-Prozess gestalten, so dass hier kostengünstige und auch ressourcenschonende Prozessketten realisiert werden können.

Leichtbauwerkstoffe – Im Zuge der Einsparung fossiler Brennstoffe ist Leichtbau im Fahrzeugbau ein ständig wachsendes 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 bedingt. 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. Im Einzelnen sind dabei die folgenden Werkstoffe und Werkstoffkombinationen zu nennen:

12 Cermet (zusammengesetzt aus engl. ceramic und metal):
Verbundwerkstoffe aus keramischen Werkstoffen und einer metallischen Matrix

13 PVD: Physical Vapor Deposition

14 CVD: Chemical Vapor Deposition



Foto: Hochpräzise Mikromaterialbearbeitung © Lumera Laser GmbH

- Metallische Schäume
- CFK- und GFK-Komponenten
- Verbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen und Metallen mit Faserverbundkunststoffen
- Aluminium-Kunststoff-Hybride

Drucktechnik, Produktkennzeichnung und Schutz vor Plagiaten

Die Flexibilisierung der Drucktechnik ist ein Trend, der seit einigen Jahren zu einem Technologiewechsel in diesem Industriesegment geführt hat. Neben schnellen laserbasierten Verfahren zur Herstellung von Druckwalzen und Druckplatten haben vor allem die digitalen Drucksysteme eine signifikante Geschwindigkeits- und Qualitätsverbesserung erfahren. Eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit ist jedoch mit der derzeitigen tonerbasierten Drucktechnik nicht möglich, so dass neue Verfahren entwickelt werden müssen, um die hohen Anforderungen bezüglich Auflösung, Geschwindigkeit und Farbvermögen erfüllen zu können.

Ein wichtiger Schritt zu einer neuen Drucktechnik ist der Wegfall von Tonern, Druckfarben und Tinten, die alle eine schnelle Auftragstechnik und noch viel wichtiger eine schnelle Trockentechnik benötigen. Unter dem Stichwort Inkless Printing gibt es bereits erste Ansätze über eine thermische Aktivierung die Farbe von Kristallen, die als Dünnschicht auf Papier aufgetragen sind, dauerhaft zu ändern. Diese Ansätze müssen in ihrer Performance jedoch signifikant gesteigert werden, um die Leistungsdaten heutiger Print-on-Demand-Systeme zu erfüllen und langfristig zu übertreffen. Ansätze hierfür können neuartige VCSEL-Systeme¹⁵ mit unterschiedlichen Farben und Pulsparametern sein, mit denen photochrome Materialien adressiert werden oder mit denen über ein funktionales Coating auf dem Papier ein photochemischer Farbumschlag erzielt wird.

Ähnliche Ansätze können künftig auch für die farbige Beschriftung von Kunststoffbauteilen dienen, um die derzeitigen Drucktechniken, die in der Fertigung eine hohe Fehlerquote aufweisen bzw. mit hohem Wartungsaufwand verbunden sind, abzulösen. Direkt adressierbare Additive in Kunststoffen, mit denen eine farbige Markierung in den Grundfarben erzeugt werden kann, würde eine erhebliche Erweiterung des Gestaltungsspielraums für Designer bei einer Vielzahl von Produkten des täglichen Bedarfs bedeuten.

Neben neuen Anwendungen im Druck- und im Designbereich kann eine solche Technik in Kombination mit weiteren optischen Strukturierungstechniken neue Lösungen zur Produkt- und Sicherheitskennzeichnung hervorbringen. Damit ließen sich Lösungen zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Produktpiraterie bereitstellen, die eine der großen Herausforderungen ist, der sich vor allem Unternehmen mit hochpreisigen Produkten und Produkten mit hoher Marge ausgesetzt sehen. Während Software und technische Produkte durch ihre jeweilige Technologie, z.B. Soft- und Hardwarecodes, gegenüber Fälschungen als Original gekennzeichnet und gesichert werden können, ist für alle Produkte, bei denen lediglich die Verpackung als Möglichkeit der Kennzeichnung und Originalitätssicherung dienen kann, eine Fälschungssicherheit nur schwer zu erzielen. Besonders gravierend sind Fälschungen im Pharmabereich, da hier auch vermehrt gesundheitsschädliche Produkte auf den Markt kommen. Nach Angaben des Internationalen Verbandes der Arzneimittelhersteller (IFPMA) sind weltweit rund 7 % der Arzneimittel mit einem Volumen von mehr als 20 Mrd. USD gefälscht. Mit einer sicheren, vom Verbraucher leicht zu verifizierenden Produktkennzeichnung über gedruckte Eigenschaften in Kombination mit volumenholographischen und/oder fluoreszierenden Elementen sowie elektronischen Labels ließe sich die Hürde für Produktpiraterie signifikant anheben.

¹⁵ VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

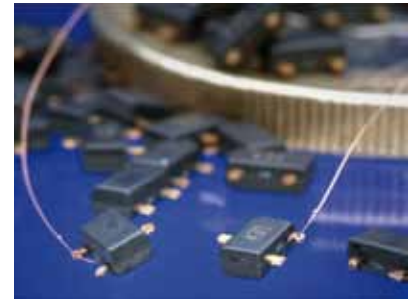
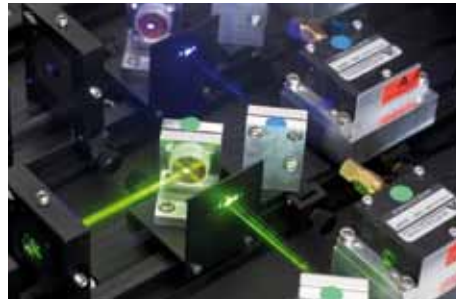
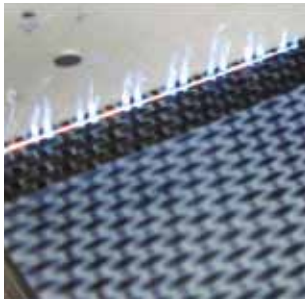


Foto links: Selektives Freilegen der Faserstruktur eines CFK-Bauteils
© Laser Zentrum Hannover

Foto Mitte: Laserbasierte Belichtungstechniken garantieren farbechte und qualitativ unübertroffene Bildqualität © Fraunhofer IPM

Foto rechts: Laserstrahlschweißen zum Kontaktieren von Kupferlackdraht mit elektronischen Bauelementen © Fraunhofer ILT

3.1.1.3 Handlungsfelder

Die dargestellte Auflistung der Herausforderungen und Anwendungsfelder ist beispielhaft für das Potenzial der Optischen Technologien, mittels neuer Laserstrahlquellen und Verfahrensansätzen neue Anwendungsgebiete zu erschließen. Sie ist erweiterbar auf Bereiche wie Lebensmitteltechnik, chemische Verfahrenstechnik, Biotechnologie und andere.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der Lösungsansätze ist jedoch die konzentrierte Erforschung und Entwicklung photonischer Prozesse und hier im speziellen von Laserprozessen auf den folgenden Gebieten:

- Schnelle großflächige Oberflächen-Strukturierungsprozesse im Mikro- und Nanomaßstab auf 2D- und 3D-Bauteilen
- Großflächige photonische und Hybridprozesse zur Oberflächen- und Volumenmodifikation sowie zur Schichtkonditionierung
- Großflächige Laserheiz- und Konditionierungsverfahren als Ersatz für Ofenprozesse
- In-Line-Laserverfahren zur Dotierung, Beschichtung und 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 Füge- und Verbindungstechnik für artungleiche Werkstoffkombinationen und schwer schweißbare Werkstoffe

Neben diesen prozesstechnischen Fragestellungen sind für die genannten Anwendungen fertigungstechnische Lösungen aus Laserquelle, Maschine und Subkomponenten bereitzustellen, mit denen ein Höchstmaß an Reproduzierbarkeit und Produktivität gewährleistet werden kann. Die Entwicklung von Hochgeschwindigkeits-scannern und Multi-Parallel-Bearbeitungsoptiken sowie selektiv steuerbaren Laserstrahlquellen gehört dabei ebenso dazu wie eine durchgängige Prozesskontrolle. Hierzu müssen die folgenden Themenfelder adressiert werden:

- Schnelle und genaue 3D-Bauteilvermessung im Mikro- und Nanometerbereich
- Prozessintegrierte Oberflächenprüfung und -analyse auf großen Flächen sowie die funktionale Vermessung von Werkstoffeigenschaften mit optischen berührungslosen Methoden
- Überwachung und Regelung von Strahlquellen- und Maschinenparametern

Unter Anwendung dieser Systemkomponenten und mittels eines durchgängigen Verständnisses des jeweiligen Bearbeitungsprozesses soll langfristig eine kognitive Laser-Maschinentechnik zur Sicherstellung gleichbleibender Fertigungsqualität entstehen, die sowohl in der Lage ist, Einflüsse von Werkstoffschwankungen zu kompensieren, als auch fertigungsbedingte und bedienerbedingte Einflüsse eliminiert.



Foto: Flexible Systeme zum Laserschweißen erlauben schnelle Prozessgeschwindigkeiten und hohe Präzision bei geringerer Energieeinbringung in das Bauteil © KUKA Systems GmbH

3.1.2

Werkzeug Licht – Lösungen für die nächste Generation der Produktion

Neben dem bereits geschilderten Potenzial des Werkzeugs Licht für neue Anwendungen besitzen innovative Lasertechniken in Kombination mit einer optischen Prozessüberwachung eine große Hebelwirkung in modernen, flexiblen Produktionsverfahren und tragen wesentlich zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland bei. So können beispielsweise im Automobil- und Flugzeugbau verstärkt Leichtbaukonstruktionen eingesetzt, Schweißverbindungen verbessert und Bearbeitungsgeschwindigkeiten erhöht werden. Zudem ergeben sich aus der zunehmenden Miniaturisierung und den ständig wachsenden Ansprüchen an Qualität und Leistungsfähigkeit Anforderungen an die Fertigungstechnik, die immer häufiger von klassischen Verfahren nicht mehr erfüllt werden können. Die berührungslose Mess- und Wirkungsweise und die damit verbundene Eignung zur Automatisierung, die hohen Prozessgeschwindigkeiten sowie die Qualität der erzielbaren Prozessergebnisse stellen nur einige der Vorteile dar, die durch die Integration des Werkzeugs Licht in die Produktion gewonnen werden können.

Künftige Trends und Entwicklungen in der Fertigungstechnik umfassen insbesondere adaptive Fertigungs- und Anlagenkonzepte, ressourceneffiziente, umweltschonende Bearbeitungsverfahren und Prozesse für neue Werkstoffe, Werkstoffkombinationen und Werkstoffverbunde. Aber auch eine Massenherstellung individualisierter Produkte oder die Minimierung von Nacharbeit und Ausschuss gehören zu den Aufgaben der Zukunft. Das Werkzeug Licht bietet für all diese Herausforderungen Lösungen an. Um ihre führende Position in der Laserfertigungstechnik zu erhalten und auszubauen,

müssen Laserhersteller und Laseranwender in Deutschland Innovationen für die nachfolgenden aufgeführten Herausforderungen vorantreiben.

3.1.2.1

Adaptive Fertigungs- und Anlagenkonzepte durch Automation, Sensorik und Prozessüberwachung

Der Standort Deutschland ist geprägt durch hohe Beschäftigungskosten, so dass qualitäts- und kostengerechte Produktion die treibenden Faktoren für unsere Exportwirtschaft sind. Extrem kostengünstige Produkte aus Fernost stellen dabei die größte Gefahr im Wettbewerb dar. Notwendigerweise wird die Entwicklung intelligenter Fertigungssysteme immer intensiver vorangetrieben. Da Laserstrahlquellen extrem flexible Werkzeuge sind, können mit ihnen komplexe Fertigungssysteme aufgebaut werden. Es besteht prinzipiell die Möglichkeit, individuelle Produkte in Massenfertigung herzustellen, bei denen Einfahr- und Rüstzeiten auf ein Minimum beschränkt werden können. Dies erfordert einen hohen Grad an Autonomie für das Fertigungssystem, wobei in der Produktionskette intelligente Sensor- und Regelkomponenten, Prozessplanungswerkzeuge sowie geschlossene, mehrstufige Regelkreise notwendig sind. Neue Ansätze in den Prozessketten, bei denen komplexe Prozesse einfacher gestaltet werden und neue Produktionsverfahren, die durch Zusammenführung neuer und existierender Verfahren und Technologien entstehen, müssen entwickelt werden.

Handlungsbedarf

Aus den genannten Forderungen und Randbedingungen lassen sich die folgenden Handlungsfelder ableiten, die intensiv bearbeitet werden müssen, um einerseits die Produktion am Standort Deutschland wettbewerbsfähig



Foto links: Inspektion mikroskopisch kleiner elektromechanischer Bauteile © Polytec GmbH

Foto Mitte: Remote-Schweißen – Der Faserlaser ermöglicht große Arbeitsabstände © IPG Laser GmbH

Foto rechts: Solarzellenproduktion © BP Solar Deutschland GmbH

zu halten und andererseits die Position Deutschlands als Ausrüster der Weltwirtschaft zu sichern:

Neue optische Messverfahren – Stärker als bisher sollte Licht als berührungsloses und verschleißfreies Messverfahren 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, sind zukünftig auch dreidimensionale Form- und Lageerfassung zu ermöglichen, die einen erheblichen besseren Einblick in die Prozesse und Bearbeitungsergebnisse erlauben. Eine direkte Integration in die Fertigungsmaschine mittels closed loop control ist unabdingbar zur Erreichung der übergeordneten Ziele.

Modellbasierte Gesamtprozessoptimierung – In der nächsten Generation von Qualitätsüberwachungssystemen ist der Schritt zu einer ganzheitlichen Betrachtung der Regelkreise in den verschiedenen Fertigungsebenen zu beachten, ausgehend von der Fabriksteuerung über

die Zellenplanung bis hinein in die kaskadierten Regelkreise des Fertigungssystems mit unterschiedlichen Anforderungen an Echtzeitverhalten. Eine vollständige Prozessregelung ist langfristig unabdingbar. Dies erfordert allerdings eine Vielzahl an vorbereitenden Maßnahmen.

Zunächst sind separate Sensor- und Aktorsysteme durch geeignete Kombination oder Kopplung miteinander zu fusionieren, wobei eindeutige Schnittstellen zu schaffen sind und letztlich jeder Teilprozess für sich kontrollierbar sein muss, besser noch sich selbst kontrolliert. Unterschiedliche Prozessmodule (z.B. Bearbeitung, Handhabung, Messen) stellen dabei die Basis für einen optimierten Gesamtprozess in der Fertigung dar. Letztlich muss die gesamte Wertschöpfungskette von der Materialbereitstellung über die Fertigung bis hin zum Recyceln nach der Nutzungsdauer der Produkte in der Planung berücksichtigt werden. Dies betrifft auch periphere Komponenten wie beispielsweise »intelligente Spanntechnik« .

Zur Erreichung dieses herausfordernden Zieles ist eine modellbasierte, interdisziplinäre Entwicklung der Teilprozesse und Verfahren erforderlich. Die Virtualisierung in der Planungsphase nimmt dabei einen zunehmend wichtigeren Teil des Gesamtfertigungsprozesses ein und erfordert daher die Schaffung geeigneter Prozessmodelle bis hin zu Metamodellen zur inversen Beschreibung der Fertigungszusammenhänge.

Schlussendlich führt diese Herangehensweise zu fehlertoleranten Systemen, bei denen der Anlagenbediener jederzeit über den aktuellen Zustand der Maschine und des Bauteils informiert ist und mit seinem Expertenwissen über geeignete Schnittstellen eingreifen kann.

Ergonomische Benutzerführung – Planung und Durchführung von Bearbeitungsaufgaben können für den Bediener gegenüber dem heutigen Stand der Technik durch Nutzung moderner Geräte zur Verarbeitung von Haptik und Gestik noch deutlich anwendungsfreundlicher gestaltet werden. Ziel ist insbesondere, komplizierte Vorgänge und Prozesse dem Bediener

einfach darzustellen und ihn in seiner Entscheidungsfindung zu unterstützen. Dazu ist die Hinterlegung von geeignetem Expertenwissen, beispielsweise in Form von Prozess- und Maschinenmodellen, erforderlich. Eine Virtualisierung des Bearbeitungssystems und der Prozesse kann dazu beitragen, kostengünstig die Fertigungsaufgabe offline zu programmieren und testen. Der Laser als Universalwerkzeug bringt dazu die besten Voraussetzungen mit, da durch den Aufbau flexibler und intelligenter »Lasernetzwerke« die jeweils bestgeeignete Anlage für die jeweilige Bearbeitungsaufgabe ausgewählt werden kann. Mit diesem »Laser on demand«-Prinzip sind prozessadaptive, autonome Fertigungssysteme herzustellen, die langfristig die Fertigungskosten deutlich senken werden, da notwendige Rüstzeiten und Einfahrphasen deutlich kürzer gehalten werden können.

3.1.2.2

Ressourceneffiziente und umweltschonende Bearbeitungsverfahren

Neben dem bereits dargestellten Potenzial des Werkzeugs Licht bei der Fertigung energieeffizienter Produkte eröffnet der Laser auch 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 drastisch erhöht werden. Entsprechend kann der Prozesswirkungsgrad künftig deutlich gesteigert werden, wenn es gelingt, die Energiedeposition Verfahrens-, Werkstoff- und Bauteil-angepasst zu realisieren und die Laserstrahlabsorption zu steigern. Dazu sind in erster Linie höhere Prozessgeschwindigkeiten und eine hochdynamisch zeitlich und räumlich steuerbare Energiedeposition nötig. Insbesondere beim Laserstrahlschneiden, -schweißen, -auftragsschweißen und

-bohren sind damit deutliche Steigerungen der Prozesseffizienz und gleichzeitig auch der Bearbeitungsqualität zu erwarten.

Handlungsbedarf

Systemtechnik – Trotz der überzeugenden Vorteile in verfahrenstechnischer Sicht sind Laser gegenwärtig im Vergleich zu konkurrierenden Energiequellen (z.B. Plasma, Induktion) z. T. kostenintensive Quellen. Aus Sicht der Wettbewerbssituation trifft das insbesondere auf die Randschicht- und RP-Technologien (Rapid Prototyping) zu. Eine Reduzierung der Fertigungskosten moderner Festkörperlaser im Leistungsbereich 1–10 kW würde ein stark wachsendes Marktpotenzial auf dem Gebiet der Randschicht- und RP-Technologien nach sich ziehen. Handlungsbedarf besteht hier sowohl auf dem Gebiet der Strahlquellen als auch bei den Optiken für die Bearbeitungsverfahren.

Eine wesentliche Aufgabe wird dabei in der Entwicklung von Optiken zur hochdynamischen Strahlmanipulation gesehen. Das prozesstechnische Anwendungsfeld modernster Festkörperlaser höchster Brillanz ließe sich enorm erweitern, wenn es gelänge den Laserstrahl im Bereich 3-10 kHz orts-, zeit- und leistungsaufgelöst zu steuern. Gleichzeitig wird damit den zu erwartenden industriellen Anforderungen nach einem maßgeschneiderten Energieeintrag bezüglich Werkstoff, Bauteil und Verfahren begegnet. Damit neu zu erschließende Anwendungsfelder können z.B. sein:

- Erweiterung der Schweißbarkeit von Mischverbindungen
- Energieoptimierte Härtungszonen und Auftragschweißungen für 3D-Anwendungen oder thermisch empfindliche Werkstoffe
- Verbesserung der Schneidqualität bei größeren Blechdicken
- Tribologisch optimierte Motorbauteile

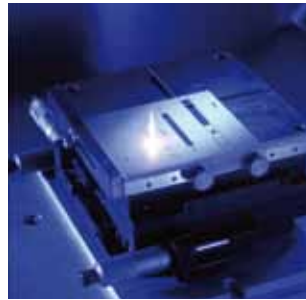
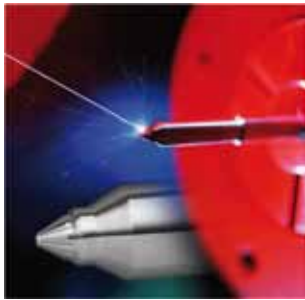


Foto links: Hochpräzise Mikrostrukturierung mit dem Laser
© Robert Bosch GmbH

Foto Mitte: Bauteilbeschriftung mittels Laser © ROFIN-SINAR Laser GmbH

Foto rechts: Modular aufgebauter Bearbeitungskopf zum
Schweißen, Beschichten und Schneiden © Precitec KG

Die sehr guten Strahlqualitäten moderner Festkörperlaser gestatten die Durchführung aller etablierten Bearbeitungsverfahren mittels eines Lasers und einer geeigneten Strahlformungseinheit. Aus Kosten- und Flexibilitätsgründen wird deshalb der Trend industriell wichtig werden, mit einer Laserstrahlquelle und einer geeigneten Systemtechnik kombinierte Prozesse (z.B. Laserstrahlschneiden, -schweißen und -härten) sehr kosteneffizient durchführen zu können.

Dazu müssen angepasste Laserstrahlbearbeitungsköpfe erforscht und entwickelt werden. Wesentlich begünstigt würde der Mehrzweckeneinsatz hocheffizienter Laserstrahlquellen durch elektrisch schaltbare, auf die Bearbeitungsprozesse angepasste Strahlqualitäten.

Prozesstechnik – Die enormen Fortschritte der hochbrillanten Festkörperlaser gestatten es, bisherige werkstoff-, fertigungs- und prozesstechnische Grenzen zu überschreiten. Mit den neuen Lasertypen sowie Prozess- und Werkstoff-angepassten Behandlungsstrategien lassen sich neue, deutlich effizientere Fertigungsverfahren für teilweise neuartige Produkte entwickeln.

Aus Sicht der Ressourceneffizienz ist die Verkürzung von Prozessketten eine wesentliche Entwicklungsaufgabe: Lösungsansätze könnten in der massiv parallelen Bearbeitung mit vielen Laserstrahlen im gleichen Prozess (z.B. Remote-Schneiden, -Schweißen, und -Härten) oder in der Integration mehrerer Bearbeitungsschritte in einer Bearbeitungsmaschine zur parallelen, teilsequentiellen oder sequentiellen Bearbeitung liegen.

Für die massiv parallelen Bearbeitungsstrategien müssen verfahrensabhängig geeignete Strahlformungs- und Strahlableitungseinheiten oder Remote-Bearbeitungs-

köpfe entwickelt werden. Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Entwicklung hochfrequenter Remote-Technologien und der hochfrequenten zeitlich und räumlich gesteuerten Laserenergiedeposition innerhalb der Laserprozesse sowie bei Mehrstrahltechnologien zur Entwicklung massiv paralleler Bearbeitungsverfahren.

Eine besondere Herausforderung für die prozesssichere industrielle Anwendung von Remote-Technologien stellt darüber hinaus die Entwicklung geeigneter Prozessüberwachungs- bzw. -regelungssensoren dar (hohe örtliche Auflösung bei großem Gesichtsfeld; relativ kleine Prozesszone im Vergleich zum großen Gesichtsfeld; thermisch extrem hochdynamische Prozesse).

Die besondere Forschungsnotwendigkeit auf diesem Gebiet ergibt sich nicht zuletzt daraus, dass neue Lösungen gleichermaßen für alle Varianten der Lasermakromaterialbearbeitung wie dem Schneiden, Schweißen, Randschichtveredeln, Auftragschweißen, Rapid Prototyping und Bohren vordringlich sind.

Eine ressourceneffiziente Verwendung von Werkstoffen erfordert den Übergang zu Multimedial-Systemen. Das Fügen von Multimaterial-Systemen stellt aus Gründen der metallurgischen Unverträglichkeit eine besondere Herausforderung dar. Lösungsmöglichkeiten könnten hier in der Erforschung laserbasierter Fügeverfahren bestehen. Diese können eine atomare Bindung in der festen Phase durch gleichzeitige Einwirkung von Druck und Temperatur erzeugen oder erlauben gezielt einstellbare Mischungsverhältnisse in der Schweißzone.

3.1.2.3

Mass Customization und Rapid Manufacturing

Die direkte Herstellung von Bauteilen in einem »Druckprozess« mit voller Funktionalität ohne die Vorhaltung von Werkzeugen und Halbzeugen ist ein zunehmender Trend, der nicht nur aus der Möglichkeit einer völlig freien kundenspezifischen Anpassung der Bauteile resultiert, sondern auch aus der Möglichkeit beinahe beliebige

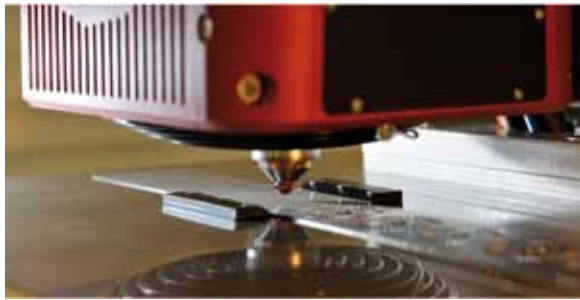


Foto: Hochdynamischer Form-Cutter © Fraunhofer IWS

Bauteile ohne Zeitverzug und Lagerhaltung herstellen zu können. Voraussetzung für die Realisierung dieses Fertigungsprinzips ist allerdings eine gegenüber konventionellen Ansätzen konkurrenzfähige Fertigungsgeschwindigkeit. Gegenwärtig wird diese Vorgehensweise in der Herstellung von Werkzeugen für den Spritzguss und für Umformwerkzeuge sowie bei individuell angepassten Bauteilen der Medizintechnik und bei Einzelstücken bereits umgesetzt. Als Verfahren zur Herstellung der Bauteile kommt das generative Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) zum Einsatz, das sich zur direkten Herstellung von metallischen Funktionsbauteilen bereits in einigen Branchen der Industrie bewährt hat. Auf der Grundlage von 3D-CAD Daten werden mit einem Laserstrahl dünne Metallpulverschichten selektiv aufgeschmolzen. Das Verfahren dient beispielsweise im Werkzeugbau zur Produktion von Kleinserienteilen oder Funktionsprototypen. Während für die Verarbeitung von Titan- und Stahlwerkstoffen bereits umfangreiche Kenntnisse der SLM-Prozessführung und der resultierenden mechanischen Eigenschaften vorliegen, sind für die Vielfalt der übrigen Werkstoffe noch große Anstrengungen zu leisten, um das Verfahren zu qualifizieren und in die Serie umzusetzen.

Die Vorteile des SLM-Verfahrens zum Rapid Prototyping sowie zum Rapid Manufacturing sind dabei nicht nur in der schnellen Umsetzung eines Bauteils vom CAD-System zum realen Bauteil zu sehen. Durch den schichtweisen Aufbau lassen sich auch Bauteile mit unterschiedlichen Eigenschaften von Bulk und Oberfläche erzeugen. Gegenüber klassischen Fertigungsverfahren sind mit dem SLM-Verfahren darüber hinaus völlig neue Designmöglichkeiten verbunden, so dass Hohlstrukturen und Leichtbauelemente direkt aus dem Pulver erzeugt werden können.

Bisher war dieses Verfahren nur für kleine Stückzahlen bzw. für zeitunkritische Bauteile wirtschaftlich. Mit neuen Ansätzen zum Einsatz von Hochleistungslasern und einer massiven Parallelisierung der Bearbeitung kann es jedoch gelingen, das Verfahren und die Prozesskette für

die Herstellung von Massenbauteilen zu qualifizieren. Allerdings sind hierfür noch erhebliche Forschungen und Entwicklungen zur Stabilität des Prozesses, zum Verhalten der Werkstoffe und zur Erhöhung der Aufbaugeschwindigkeit durchzuführen. Gelingt dies, steht der Fertigungstechnik ein neues Verfahren zur Verfügung, mit dem Einzelbauteile und kleine Stückzahlen just-in-time gefertigt werden können und bei Ersatzteillieferungen eine signifikante Verkürzung der Reaktionszeit erreicht werden kann. Das Werkzeug Licht eröffnet so Möglichkeiten für völlig neue Produktions- und Logistikkonzepte. Für einige Anwendungen kann die generative Fertigung grundsätzlich eine wirtschaftliche Alternative zur formgebundenen Fertigung wie beispielsweise dem Druckguss sein, da hier die Werkzeugerstellung entfallen kann und Prozessketten deutlich verkürzt werden.

Handlungsbedarf

Im Hinblick auf eine Umsetzung dieser Technologie in die Massenfertigung besteht folgender Forschungsbedarf:

- 3D-Aufbautechnik für komplexe Bauteile bei großen Dimensionen
- Hohe Oberflächenqualitäten für Werkzeuge und Bauteile durch Kombinationsprozesse und neue Verfahrensstrategien mit angepassten Pulverfraktionierungen
- Kombination aus Selective Laser Melting und Laser Metal Deposition für selektiv funktionale Bauteilstrukturen
- Massive Parallelisierung des Prozesses zur Erhöhung der Fertigungsgeschwindigkeit
- Ersatz werkzeuggebundener Fertigungsverfahren durch 3D-Aufbautechnik
- Monolithischer Aufbau von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen mit spezifischen funktionellen Eigenschaften

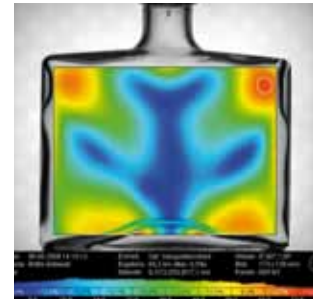


Foto links: Laserschweißen eines Getriebeteils
© TRUMPF GmbH + Co. KG

Foto Mitte: Laserschneiden an einem tiefgezogenen Blech
© TRUMPF GmbH + Co. KG

Fotos rechts: Falschfarbendarstellung der Spannungsverteilung
in der Seitenwand eines Glasflakons © ilis GmbH

3.1.2.4

Werkzeuge für neue Werkstoffe

Es zeichnet sich ab, dass sich die bisher führenden Märkte für die Lasermaterialbearbeitung wie Automobilbau einschließlich Motor-, Powertrain-, Karosserie- und Chassisbau, deren Zulieferindustrie, Werkzeug- und Maschinenbau, Elektrotechnik und Elektronik auf einen Umbruch hoher Intensität und Dynamik vorbereiten müssen. Für die Lasermaterialbearbeitung bedeutet das, sich neuen Herausforderungen hinsichtlich der zu verarbeitenden Werkstoffe, der Prozessgeschwindigkeit, der Bearbeitung und dem Handling dünner oder folienartiger Halbzeuge, neuer Bauteile und neuer Bearbeitungsverfahren zu stellen. Dominierende neue Märkte werden sein:

- Deutlich kostengünstigere Energiespeicherelemente mit geringerem Gewicht, drastisch höherer Energie- und Leistungsdichte für die Elektromobilität und für die verbesserte Nutzbarkeit regenerativer Energien
- Ultraleichtbau in Mischbauweise für die Automobil- und Flugzeugindustrie
- Gewichts- und platzsparende kostengünstigere Brennstoffzellen
- Flächenhafte und rohrförmige Bauelemente für die solarthermische Energieumwandlung
- Werkstoffe und Bauteile für effizienzsteigernde Hochtemperaturprozesse für Kraftwerksbau, Kraft-Wärme-Kopplung und Gasturbinenbau

Werkstoffseitig werden Werkstoffe wie Kupfer, Aluminium, Lithium, Magnesium, Titan, Nickel sowie beschichtete Bleche und Werkstoffverbunde sowie preisgünstige

CFK-Strukturen (kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe) und Keramiken zunehmende Bedeutung erlangen. Ein Teil dieser Werkstoffe und Werkstoffverbunde ist derzeit nur unzureichend mit dem Laser bearbeitbar (Kupfer, höchstfeste Aluminium-Legierungen, beschichtete Bleche, CFK, Keramiken).

Bei der zukünftigen Erforschung und Entwicklung neuartiger bzw. verbesserter Laserstrahlquellen und neuer Bearbeitungstechnologien kommt es insbesondere darauf an,

- derzeit gesetzte werkstoff-, fertigungs- und produktionstechnische Grenzen zu überwinden,
- angepasste Prozesse für neue Werkstoffe, Werkstoffkombinationen und Werkstoffverbunde zu entwickeln,
- verbesserte Methoden zur gezielten Einstellung von Werkstoffeigenschaften zu finden,
- sowie korrespondierende Prozessregelungsstrategien zu entwickeln.

Werkstofftechnische Herausforderungen

Neue Hochleistungswerkstoffe und Werkstoffssysteme mit maßgeschneiderten, auf den konkreten Anwendungsfall hin entwickelten Eigenschaftsspektren gewinnen zunehmend an Bedeutung im industriellen Fertigungsprozess. Neben der ungebrochenen Weiterentwicklung metallischer Werkstoffsysteme und zunehmenden Anwendungen intermetallischer Werkstoffe erobern nichtmetallische Systeme wie Faserverbundstrukturen, neuartige Keramiken, maßgeschneiderte Plastwerkstoffe und Werkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zunehmend Marktanteile. Damit einhergehend nehmen der Bedarf und die Anwendung von Werkstoffverbunden zu.

Gemeinsam ist ihnen, dass sie ihre maßgeschneiderten Eigenschaften durch immer komplexere metallurgische, chemische, thermische oder thermo-mechanische Prozessschritte erhalten. Dabei sind Laserbearbeitungsver-

fahren aufgrund des geringen und sehr lokalen Energieeintrages sowie der sehr guten zeitlichen und räumlichen Steuerbarkeit der Energiedeposition das Mittel der Wahl. Jedoch sind eine Reihe dieser Werkstoffe thermisch so empfindlich, dass sie gegenwärtig mit dem Laser nicht ausreichend schadigungsarm behandelt werden können. Zukünftige system- und verfahrenstechnische Entwicklungen sollten deshalb darauf gerichtet sein, unter Nutzung der hervorragenden Strahlqualitäten neuester Festkörperlaser werkstoffspezifische Strategien zur Minimierung schädlicher thermischer Nebenwirkungen zu entwickeln.

Neben der steigenden Komplexität der Werkstoffe sind folgende weitere Anforderungen und Trends bei der Laserfertigungstechnik hervorzuheben:

- Stetig zunehmende Bedeutung des Leichtbaus in Pkw-, Nkw-, Flugzeug-, Eisenbahn- und Schiffbau, für den gleichermaßen ökologisch wie ökonomisch vertretbare Lösungen gefunden werden müssen.
- Zunehmende Anstrengungen zu Funktionsintegration, zur Erzeugung neuer Funktionalitäten sowie zur Entwicklung und zum Einsatz smarter Werkstoffe
- Effektives Fügen artungleicher Werkstoffe wie z.B. Metall/CFK, Hochtemperatur-Werkstoffe/Keramik, geschäumte Metalle/kompakte Metalle usw.
- Effektive Bearbeitungsroutinen für Werkstoffe, die für die Elektromobilität zur Energiespeicherung, -verteilung, -umwandlung sowie für Brennstoffzellen benötigt werden. Dazu müssen höchst effektive massiv parallele Technologien zum Laserstrahlschneiden, -bohren und -schweißen von Kupfer-, Aluminium-, Edelstahl-, keramischen und organischen Folien und dünnen Blechen entwickelt werden.
- Mit den immer komplexer werdenden Werkstoffen und der zunehmenden Verwendung artfremder Werkstoffkombinationen, insbesondere CFK, nimmt der Bedarf an Werkstoff erhaltenden, ökonomisch attraktiven und ökologisch vorteilhaften Recycling-

verfahren zu. Dazu muss geprüft werden, inwieweit neu zu entwickelnde Laser- und Plasmatechnologien Lösungen liefern können.

Handlungsbedarf

Fügen – Abgeleitet aus dem industriellen Bedarf, den werkstofftechnischen Randbedingungen und den erwartbaren Fortschritten in der Entwicklung der Laserstrahlquellen und des Laserstrahlhandlings sowie von Plasmastrahlquellen und Hybridprozessen ergibt sich folgender Forschungsbedarf:

- Vertieftes Grundlagenwissen über die Key-hole-Dynamik und das Aufschmelz- und das Erstarrungsverhalten mehrphasiger Werkstoffe in Schmelzen mit inhomogener Elementverteilung
- Steigerung der Prozesseffizienz, höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten, Vereinfachung des Teilehandlings sowie Verringerung von Eigenspannungen und Verzug durch Entwicklung neuartiger Remote- und Mehrstrahl-Laserschweißtechnologien
- Entwicklung von Technologien zur hochfrequenten orts- und zeitaufgelösten Manipulation der Leistungsdichteverteilung des Laserstrahles zur Verbesserung der Schweißbarkeit schwer schweißbarer Werkstoffe
- Neuartige thermische und mechanisch-thermische Hybridfügetechnologien zum hocheffizienten Fügen von Werkstoffkombinationen und Verbundwerkstoffen (z.B. Laserpressfügen von CFK-Metall-Verbünden)
- Hochgeschwindigkeitsfügeverfahren für metallische und nichtmetallische Folien und dünne Bleche für Brennstoffzellen, Li-Ionen-Batterien sowie organische Materialien aus der Verpackungs- und Textilindustrie
- Massiv parallelisierte Laserfügetechniken für thermisch empfindliche Werkstoffe (z.B. Leiterplatten, Halbleiterchips, organische Leuchtdioden – OLEDs, Polymerelektronik)

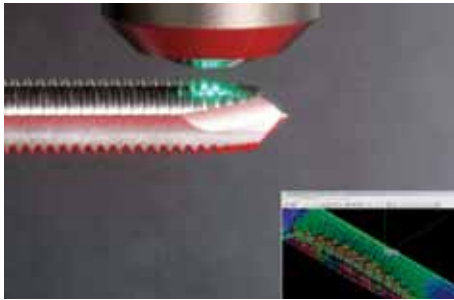


Foto links: Optischer Messsensor im Einsatz zur hochgenauen Oberflächenerfassung © Werth Messtechnik GmbH



Foto rechts: Automatisiertes Schweißen mit dem Laserstrahl © TRUMPF GmbH + Co. KG

- Mehrlagen-Engspaltschweißen zum verzugsarmen, effizienten Verschweißen von Strukturen im Stahlbau bis 50 mm Schweißtiefe

Trennen – Zur industriellen Nutzbarmachung des Entwicklungsschubes, den das Lasertrennen durch die Verfügbarkeit von mehr-kW-Festkörperlaser höchsten Strahlqualität erfahren hat, sind folgende Forschungsarbeiten vordringlich:

- Verbesserung der Schneidqualität beim Schneiden mit Festkörperlaser, insbesondere bei größeren Blechdicken
- Hochfrequente Strahlmanipulation zur Verbesserung des Schmelzaustriebs
- Steigerung der Prozesseffizienz durch Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit im Konturenschnitt durch Entwicklung und Weiterentwicklung hochdynamischer Zusatzachsen oder hochdynamischer Strahlbewegung
- Schädigungsarmes bzw. -freies Trennen von CFK-/GFK-Verbundwerkstoffen
- Entwicklung von Anlagenkonzepten zur Ablösung des Stanzens hochfester Werkstoffe durch Höchstgeschwindigkeits-Laserstrahlschneiden sowie für massiv parallelisierte Hochgeschwindigkeitstrennverfahren für Feinbleche und Folien
- Umweltschonendes Trennen von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden als Recycling-technologie

Randschichtveredlung und Oberflächentechnik – Mit der industriellen Verfügbarkeit von fasergekoppelten Hochleistungsdiodenlasern, der entsprechenden Strahlformungstechnik und Temperaturregelungssystemen

hat die industrielle Anwendung von Randschichttechnologien einen entscheidenden Schub erhalten. Bei der Lösung folgender zentraler Fragestellungen ist eine Verstetigung und maßgebliche Erweiterung des Anwendungsumfangs zu erwarten:

- Integration von Einstrahl und Mehrstrahl-Wärmebehandlungsprozessen in Werkzeugmaschinen zur spanenden und spanlosen Bearbeitung
- Randschichthärtungstechnologien für formkomplizierte Bauteile mittels simultaner Mehrstrahlenanwendungen
- Entwicklung neuer Klassen von Laserhybridtechnologien zur Erzeugung verbesserter Randschichteigenschaften (Verschleiß, Eigenspannungen, korrosive und Beständigkeit etc.) durch Kopplung mit bzw. Integration von mechanischen, chemischen, Ultraschall- oder Plasmaprozessen
- Herstellung funktioneller Oberflächen und Randschichten mit höherer Präzision und Flächenleistung (z.B. integrierte Oberflächenstrukturierung und Randschichtveredlung für verbesserte Tribologie, Verbesserung der Absorption und Reflexion für die Solartechnik, funktionelle Oberflächen für die Biotechnologie)
- Integration von Sensorfunktionen und neuen Funktionalitäten durch räumlich und zeitlich gesteuertes Schichtdesign

Laserauftragsschweißen – Aufbauend auf den existierenden Prozessen für das Laserauftragsschweißen für die Instandsetzung sowie den Verschleiß- und Korrosionsschutz in den Bereichen Werkzeug-, Formen-, Triebwerk- und Maschinenbau sollten folgende Aufgaben angegangen werden:

- Erweiterung des Laserauftragsschweißens auf neue Werkstoffe (z.B. intermetallische Verbindungen, Keramiken, Faserverbundwerkstoffe)
- Kombination Laserauftragsschweißen und Kurzzeitwärmebehandlung

- Laserauftragschweißanlagen mit integrierter Prozesskette und Prozessüberwachung und -regelung
- Erweiterung des Laserauftragschweißens auf den Korrosions- und Verschleißschutz größerer Flächen (derzeitiger Markt für klassische Auftragschweißverfahren)
- Skalierung des Auftragschweißens in den Mikrobe- reich (Strukturgröße $< 10 \mu\text{m}$) durch Verwendung von Festkörperlasern höchster Strahlqualität und neuer Pulverfördertechnologien

3.1.3

Werkzeug Licht – Photonische Verfahren in der Halbleiter- fertigung

Das Werkzeug Licht ist von zentraler Bedeutung für die moderne Mikroelektronik. Insbesondere die optische Mikrostrukturierung der Chips ist eine der Schlüssel- technologien des modernen Lebens überhaupt. Hier ermöglicht Licht die immer höhere Integrationsdichte und rasant steigende Leistungsfähigkeit der Chips bei sinkenden Kosten – mit großer gesellschaftlicher und industrieller Wirkung: Nahezu alle Neuentwicklungen in Kommunikation, Mobilität und Industrie basieren auf dieser durch optische Verfahren ermöglichten Lei- stungsfähigkeit der Chips. Zudem kommt das Werkzeug Licht an weiteren zentralen Stellen der Wertschöpfungs- ketten der Chipindustrie zum Einsatz, insbesondere bei Inspektion und Qualitätssicherung. Die Fortführung der optischen Entwicklungen in der Halbleiterindustrie bis über das Jahr 2020 hinaus ist somit von großer ge- sellschaftlicher und ökonomischer Relevanz und bedarf enormer Anstrengungen und übergreifender Kooperati- on in Forschung und Entwicklung.

3.1.3.1

Lithographie – Lösungen aus Licht

Die durch optische Verfahren ermöglichte fortlaufende Miniaturisierung der Chips hat eine Kostensenkung pro Funktionseinheit zur Folge, wodurch diese Spitzentech- nologie sowohl allgemein gesellschaftlich zugänglich wird als auch einen hohen industriellen Durchdringungs- grad erreicht. Zudem eröffnen sowohl die hohe Funkti- onsdichte pro Volumen als auch die stets zunehmende absolute Leistungsfähigkeit neuartige Anwendungen. In diesem Sinne werden in den kommenden Jahren Lö- sungen aus Licht in zahlreichen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Feldern entstehen:

■ Kommunikation

Die Welt der mobilen Kommunikation wurde durch die Licht-basierte fortschreitende Miniaturisierung der Chips überhaupt erst ermöglicht. So ist zum Bei- spiel die kostengünstige Realisierung der neuen 4G- Netze für Breitbandversorgung auch in ländlichen Gebieten nur auf Basis dieser Entwicklung denkbar geworden.

■ Energieeffizienz

Neuartige Chips ermöglichen ein effizienteres und nachhaltigeres Energiemanagement in fast jeder in- dustriellen Fertigung. Aber auch ganz direkt ermög- lichen neue Chips signifikante Energieeinsparungen, so zum Beispiel in den großen Server-Farmen der Zukunft.

■ industrielle Produktivität

Als Querschnittstechnologie ermöglichen Chips effizientere und produktivere Abläufe in fast allen Segmenten. Das Fortführen dieser Entwicklung verlangt auch nach neuen Optischen Technologien.

■ Mobilität

Eine effiziente Umsetzung der Elektromobilität benötigt leistungsfähige und dabei stromsparende Mikroelektronik zu akzeptablen Kosten.



*Foto links: Innovative Hochleistungsoptiken zur präzisen Lichtformung werden für die weitere Miniaturisierung in der Chipfertigung benötigt
© LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH/Markus-Steuer.de*

Foto Mitte: Lithographieoptik © Carl Zeiss SMT AG

*Foto rechts: Herstellung von EUV-Lithographieoptiken
© Carl Zeiss SMT AG*

■ Medizin und Life Science

Bildgebende Verfahren im Bereich medizinischer Geräte erfordern enorme Rechenleistungen. Fortschritte auf diesem Gebiet basieren nicht zuletzt auf einer fortschreitenden Miniaturisierung der Schaltkreise. Zudem werden mit medizinischen Sensoren kombinierte Chips in Zukunft auch direkt am Patienten eingesetzt werden können, um zum Beispiel eine weitgehende Betreuung von Patienten im eigenen Heim zu ermöglichen.

Deutschland ist im Bereich der Spezialoptiken für die Lithographie weltweit führend vertreten. Ein Treiben der künftigen Entwicklung von Deutschland aus erscheint möglich, und sichert hoch qualifizierte Arbeitsplätze in den beteiligten Unternehmen sowie in besonderem Maße in den lokal weitverzweigten Zuliefersystemen.

3.1.3.2

Ausgangslage

Starke technologische, gesellschaftliche, und wirtschaftliche Kräfte treiben die rasanten Innovationszyklen in der Chipindustrie. Optische Technologien sind dabei erfolgskritisch. Im Zentrum dieses »Innovationssturms« steht das Mooresche Gesetz, nach dem sich die Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit alle zwei Jahre verdoppelt. Dabei ermöglichen neuartige Technologien unter Einsatz des Werkzeugs Licht, die Leistungsfähigkeit der Chips massiv zu steigern und gleichzeitig die Kosten pro Funktion eines Chips zu senken; daraus ergeben sich wiederum neuartige Anwendungen. Diese Technologieentwicklungen sind in der Regel sehr aufwändig, weisen einen hohen Innovationsgrad auf und sind mit

hohen Risiken verbunden. Die Herausforderung eines abgestimmten Vorgehens von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik besteht darin, die Forschung und Entwicklung zu intensivieren, hoch riskante Unternehmungen zu ermöglichen, den Zugang zu diesen Spitzentechnologien zu erhalten und zu fördern, Kooperationen voranzutreiben und letztlich hochqualifizierte Arbeitsplätze bei den Geräteherstellern und deren Zulieferern auszubauen. Dies dient den Zielen von intelligentem Wachstum durch Ausbau einer wissensbasierten Wirtschaft und nachhaltigem Wachstum durch Steigerung technologischer Wettbewerbsfähigkeit und energieeffizientes Wirtschaften.

Der aktuelle Forschungsstand sieht die optische Lithographie weltweit als DAS Verfahren zur Mikrostrukturierung von Computerchips. 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 erfolgreiche Technologieübergang zur Immersionslithographie hat die niederländische Firma ASML zum Weltmarktführer bei Lithographiesystemen werden lassen. Carl Zeiss SMT ist als langjähriger strategischer Partner von ASML mit seinen optischen Systemen der wichtigste Zulieferer von ASML. Dabei ist um Carl Zeiss SMT ein dichtes Netz von Zulieferern mit hoch spezialisierten Beiträgen zu den optischen Systemlösungen entstanden. Der Wettbewerb bei diesen Optischen Technologien kommt ausschließlich aus Japan mit den beiden Firmen Nikon und Canon.

Die bisherigen Leistungen Optischer Technologien in der Chipindustrie sind enorm. Die Erfolgsgeschichte des Mooreschen Gesetzes ist auch eine Erfolgsgeschichte der Photonik. Optische Technologien haben diese Skalierung erst ermöglicht.

Zu den bisherigen Erfolgsfaktoren zählen vor allem, dass die von der Halbleiter-Roadmap geforderten hohen Innovationen zeitgerecht an den Markt gebracht werden konnten, und die dafür notwendigen hohen Investi-

tionen bereitgestellt und die entsprechenden Risiken eingegangen wurden. Die zu beobachtende Konsolidierung am Geräteherstellermarkt ist auch eine Konsequenz dieses scharfen »Ausscheidungswettbewerbs«. Abbildung 3 zeigt die ITRS 2009¹⁶ für die Verfahren zur Mikrostrukturierung der die Leistungsfähigkeit bestimmenden kritischen Lagen der Chips. Die kommenden Jahre werden einen Technologieübergang weg von der

heute etablierten Immersionstechnologie hin zu neuen Verfahren sehen. Es kommt vor allem erneut darauf an zeitgerecht eine funktionierende Lösung zu entwickeln. Die favorisierte Lösung »Extreme Ultra Violet« (EUV) Lithographie setzt dabei weiterhin auf Licht als Werkzeug, allerdings muss sich diese Technologie gegen andere nicht-optische Verfahren wie Nano-Imprint und Elektronenstrahl-Direktschreiben behaupten.

16 ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS),
http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/2009Chapters_2009Tables/2009_Litho.pdf

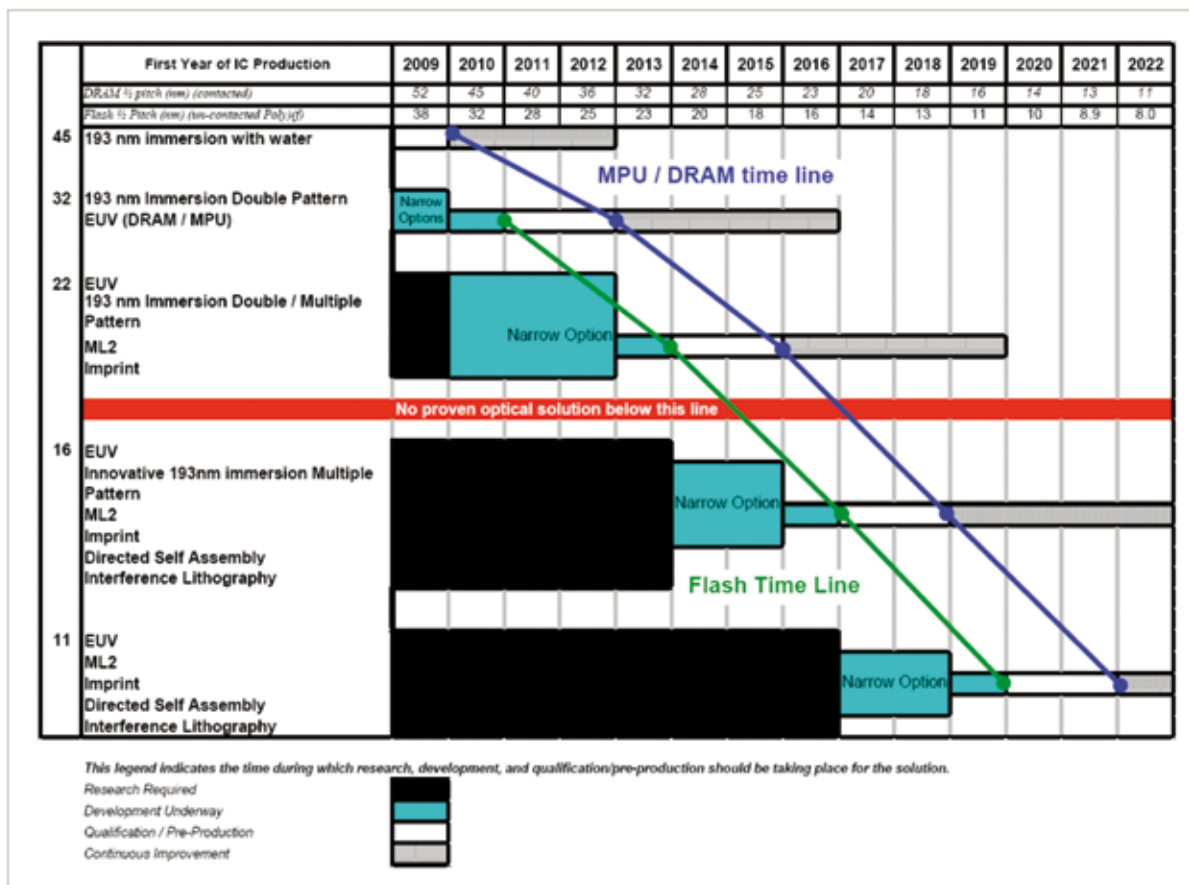


Abbildung 3: ITRS 2009 – Optische Verfahren stehen auch in Zukunft an oberster Stelle, müssen sich aber gegen alternative, nicht-optische Verfahren behaupten.

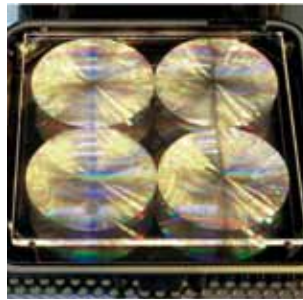


Foto links: ZERODUR Glaskeramik für hochpräzise, großvolumige optische Komponenten als Voraussetzung für noch leistungsfähigere LCD-Lithographiegeräte © SCHOTT AG

Foto rechts: Diffraktive optische Elemente höchster Präzision ermöglichen die Fortsetzung der Halbleiter-Roadmap © IMS Chips

3.1.3.3

Die deutsche Position

Im Bereich der in der Halbleiterindustrie für Produktion, Metrologie und Qualitätskontrolle benötigten Spezialoptiken nimmt Deutschland weltweit eine führende Stellung ein, die allerdings stetigem Druck aus Japan und den USA ausgesetzt ist.

Der Bereich der Lithographieoptiken ist hierfür exemplarisch. Bei der aktuell zur Chipproduktion eingesetzten Immersionslithographie sind die aus Deutschland stammenden Optiken technologisch führend.

Gerade in diesem Technologiefeld hat die Firma Carl Zeiss in Verbindung mit dem holländischen Kooperationspartner ASML gegenüber den vor einiger Zeit dominierenden Japanern Nikon und Canon eine überragende Marktposition erobert. Derzeit kommen mehr als zwei Drittel aller Lithographiesysteme aus Europa. Im Bereich Immersionslithographie beträgt der Marktanteil sogar nahezu 100 %. Die Hebelwirkung der Optischen Technologien im Bereich der Halbleiter-Lithographie ist enorm. Die Lithographie-Optik in den Fertigungsmaschinen (Wafer-Stepper und -Scanner) stellt einen Markt von etwa einer Milliarde Euro dar. Diese Optiken treiben kettenartig den Stepper- und Scannermarkt von etwa vier Milliarden Euro und diese wiederum den Markt der Chip-Herstellung (Wafer-Fabs) von etwa 18 Milliarden Euro. Der Markt der integrierten Schaltkreise liegt bereits bei 160 Milliarden Euro und der der gesamten Elektronikindustrie bei etwa 1.000 Milliarden Euro, so dass die Optischen Technologien insgesamt eine 1000fache Hebelwirkung ermöglichen.

Der Übergang zur EUV-Lithographie stellt völlig neue Herausforderungen, welche es den Wettbewerbern aus

Japan ermöglichen könnten, die führende Position anzugreifen. Aus diesem Grund sind große Investitionen in Deutschland in diese Zukunftstechnologie notwendig. Ähnliche Herausforderungen beim Übergang zur EUV-Technologie stellen sich in den kommenden Jahren für die Hersteller von Lichtquellen, Photomasken und optischen Messtechniken. Entsprechende Forschungs- und Entwicklungsleistungen sowie Investitionen sind hier zu erbringen.

Die Partner für die Umsetzung dieser Aufgaben finden sich in Deutschland, aber auch im europäischen Ausland. In Deutschland sind sowohl Institute, Industrie als auch kleine und mittlere Unternehmungen in diese Arbeiten involviert. Im europäischen Ausland ist neben zahlreichen Instituten der niederländische Gerätehersteller ASML aufgrund seiner weltweit technologisch wie auch ökonomisch führenden Position zu nennen. Eine wichtige Stellung nehmen zudem die europäischen Chiphersteller ein. Entsprechend der engen Vernetzung der unterschiedlichen Bereiche, in denen das Werkzeug Licht in der Chipherstellung eingesetzt wird, sind Verbundprojekte mehrerer Partner von Vorteil.

Sowohl in den USA als auch in Japan sind aktuell substantielle Programme in Anlauf, die optische Verfahren in der Chipherstellung adressieren, wobei der Schwerpunkt der geplanten Aktivitäten auf dem erfolgreichen Übergang von der 193 nm-Technologie zur EUV-Technologie liegen wird. Zumindest vergleichbare Anstrengungen sind auch in Deutschland notwendig, um die führende deutsche Position verteidigen und ausbauen zu können.

3.1.3.4

Herausforderungen – Die Beiträge der Photonik

Für Deutschland bestehen große Chancen durch Investitionen in Technologien und Verfahren, die den Einsatz des Werkzeugs Licht an den zentralen Stellen der Wertschöpfungskette in der Chipfertigung bis über das

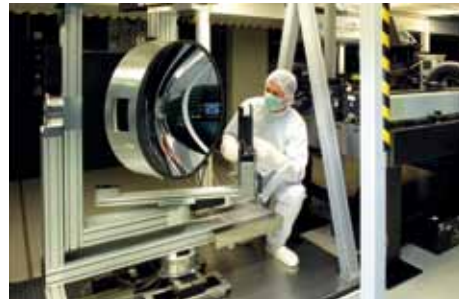


Foto: Inspektion eines EUV-Kollektors © Fraunhofer IOF



Jahr 2020 hinaus sicher stellen. Dazu ist erheblicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand von Industrie und Wissenschaft in zielgerichteter Kooperation und Abstimmung auf den folgenden Forschungsfeldern notwendig:

■ Lithographieoptiken – klassisch und EUV

- Neuartige Designansätze: Verwendung von Freiformflächen, rein reflexive Designs
- Adaptive optische Elemente
- Herstellungsverfahren, insbesondere von Freiformflächen
- Messtechnik für optische Elemente, Interferometrie für Freiformflächen
- Beschichtungsverfahren und Materialien (Breitbandschichten)

■ Strahlformungsoptiken und zugehörige Manipulatorik

- Optische Schalter, z.B. schaltbare Mikrospiegel, Mikroprismen, doppelbrechende Kristalle und Strahlformungselemente
- Metamaterialien in makroskopischer Ausdehnung
- Adaptive Optiken und Manipulatorik für die Halbleiterfertigung
- Niedrig-dimensionale Materialien wie Quantenpunkte, Nanodrähte, Graphene, sub-Wellenlängen-strukturierte Mono-Schichten zur gezielten Beeinflussung von Materialparametern sowie deren Einsatz als neue Beschichtungsmaterialien
- Hochbrechende Materialien für 193 nm
- Strahlformung in Transmission für 193 nm und EUV durch diffraktive Strukturen

■ Lichtquellen für die Halbleiterfertigung

- Lichtquellen zum Einsatz im Frontend für Lithographie
 - EUV-Lichtquelle mit winziger Etendue und hoher Leistung
 - EUV mit Wellenlänge < 13.5 nm
 - Neuartige 193 nm-Laser hoher Repetitionsrate größer 20 kHz

- Lichtquellen für Geräteentwicklungen im Bereich
 - Backend Geräte
 - Photomasken-Geräte
 - Metrologie-Geräte

■ Photomasken und Maskeninfrastruktur

- Inspektions- und Review-Geräte am 22nm-Knoten und darunter
 - EUV-AIMS (Aerial Image Measurement Systems)
 - Inspektion der strukturierten Photomaske
 - Masken Blank Inspektion
- Neuartige Photomasken, z.B. Phasenmasken im EUV-Bereich oder 193 nm-Photomasken für Double Patterning

■ Neuartige photonenbasierte Strukturierungsv Verfahren

- Nahfeldlithographie
- Lithographie mit sub-13.5 nm Wellenlänge
- Industriell einsetzbare Direct-Write Verfahren mit sub- μm Auflösung
- Strukturierung flexibler Substrate (z.B. für gedruckte Elektronik) durch Laserablation, Lasertransfer-Methoden oder maskenfreie Verfahren

■ Licht-basierte Verfahren zur Qualitätskontrolle in Chipfertigung und Lithographie

- Photonen-basierte Messtechniken
- Optische Inspektion von Displays und Sensoren (Displayindustrie)
- Optische »in-line« Messverfahren für Dünnschichtabscheidungen auf flexiblen Substraten (z.B. für gedruckte Elektronik) zur Bestimmung von Schichtdicken, Uniformität oder Detektion von Defekten

Auf kurzfristiger Zeitskala (fünf Jahre) sollte sich dabei die Forschung und Entwicklung auf optische Systeme zur Bewerkstelligung des Technologieübergangs zur EUV-Lithographie wie auch auf entsprechende Licht- und

Plasmaquellen sowie Photonen-basierte Messtechniken, Strahlformungsoptiken im UV-Bereich und Photomaskentechnologie konzentrieren.

Auf langfristiger Zeitskala (zehn Jahre) sind Forschungsaktivitäten zu neuartigen photonenbasierten Strukturierungsverfahren, neuartigen Strahlformungsoptiken sowie zur Entwicklung neuartiger Lichtquellen zu sehen.

3.1.4

Innovationen in Licht – Neue Strahlquellen durch Integration und Automatisierung

Der Laser ist in voller Breite in der Industrie angekommen. Deutlich wird das daran, dass viele Themengebiete direkt oder indirekt den Kostenaspekt der Laser bzw. die Prozesskosten der Lasertechnik als wichtigen Fokus haben. Skalierbare Produktionstechnologien gewinnen hier mehr und mehr an Bedeutung. Laserstrahlquellen für die Produktion 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 auf der Grundlage automatisierbarer Fertigungsverfahren für optische Komponenten und Systeme.

Innovative Strahlquellen sind Enabler für Anwendungen in den Bereichen Produktion, Life Science und Gesundheit etc. Insbesondere durch eine Reduktion der Kosten von Laserquellen können auch neue Anwendungsgebiete für den Laser erschlossen werden. Da die Lösungsbeiträge der Photonik an anderer Stelle im Detail beschrieben sind, werden hier die technologischen Herausforderungen bzgl. der Strahlquellen in den Fokus gestellt.

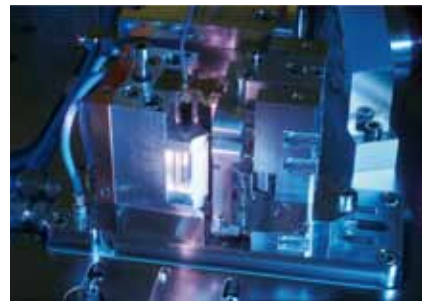
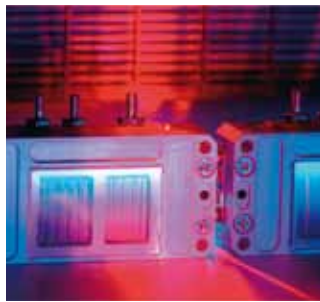
Trotz der enormen technischen, laserphysikalischen und fertigungstechnologischen Fortschritte der neuen brillanten Festkörperlaser (Scheiben-, Faser- und Hochleistungsdiodenlaser) im Leistungsbereich 1 – 10 kW werden noch erhebliche Potenziale in Kostensenkungen, in einfacheren Resonatoraufbauten, in automatisierten Montagetechnologien, in verbesserten, preisgünstigeren Halbleitermaterialien und einer durchgehenden Standardisierung zur Generierung von Skaleneffekten gesehen.

Die bereits erreichte Leistungsfähigkeit der Laserstrahlquellen macht eine ganzheitliche Betrachtung inklusive der nachfolgenden Systemkomponenten für Strahlführung und -formung nötig, um das volle Potenzial der Quellen nutzen zu können. Es geht darum, »die PS auf die Strasse zu bekommen«. Ein besonderes Augenmerk muss dabei auf den Erhalt der gesamten Wertschöpfungskette in Deutschland gerichtet werden. Gegenwärtig besteht die Gefahr, dass Technologieführerschaft und Fertigung bezüglich einiger spezifischer Komponenten und Systeme in das Ausland abwandern. Dem muss durch verstärkte Investitionen in Forschung und Entwicklung entgegengewirkt werden. Die identifizierten Arbeitsfelder erfordern zudem höchstes Ausbildungsniveau. Zu jedem technischen Fachgebiet muss dieser Aspekt mit gleicher Priorität beachtet werden.

3.1.4.1

Ausgangslage und Herausforderungen

Die deutschen Hersteller von Laserstrahlquellen und -systemen gehen aus einer Führungsposition in den Wettbewerb um künftige Märkte. Ausgewiesene Stärken sind dabei abgestimmte Strategien in Forschung und Entwicklung, eine hervorragende Infrastruktur bei Industrie und Forschungseinrichtungen sowie ein sehr hohes Ausbildungsniveau, eine starke und diversifizierte Industrielandschaft und die Abbildung der gesamten Wertschöpfung in Deutschland.



Herausforderungen ergeben sich durch den zunehmenden Wettbewerb in und aus Asien, der Gefahr einer Verlagerung von Teilen der Wertschöpfungskette ins Ausland und den sich abzeichnenden zunehmenden Fachkräftemangel.

Gegenwärtig unterliegt die Fertigung von Laserstrahlquellen und -systemen einer hohen Dynamik. Trotz des bereits erreichten hohen Entwicklungsstandes werden – national und international – große Fortschritte bei nahezu allen Laserparametern wie z.B. Brillanz, Pulsspitzenleistung, Pulsdauer, Wellenlängenspektrum, zeitlich-räumliche Formung der Feldverteilung etc. erzielt. Die Bandbreite verfügbarer Laserquellen wächst ständig; entsprechend werden neue Anwendungen erschlossen. Gleichzeitig bedingen ein massiver Kostendruck – in Euro pro Watt (€/W) – und die Forderung der Anwender nach Mobilität und einfacher Integration in Produktionsanlagen (Volumen W/m³, Gewicht W/kg) den Übergang von der »Serienmanufaktur« zur Automatisierung und zur Volumenproduktion.

Trends, aus denen sich Anforderungen für verbesserte oder neue Strahlquellen und Fertigungsprozesse für diese ergeben, sind zudem:

- »Systemische« Entwicklung neuer Strahlquellen durch die komplette Betrachtung der Kette vom Werkstoff über das damit hergestellte Produkt und dessen Integration in ein System bis zur Produktionsanlage
- Steigerung der Produktivität durch Bearbeitung mit einem Strahl und einem Ablenssystem sehr hoher Dynamik oder durch die parallele Bearbeitung mit mehreren Einzelstrahlen. Hierfür müssen optische Komponenten und Systemeinheiten zur Strahlableitung bzw. Strahlteilung erforscht und entwickelt werden.

Foto links: Automatisierte Vermessung von Diodenlasern
© JENOPTIK Laser GmbH

Foto Mitte: Hochleistungsdiodenlaser © Dilas Diodenlaser GmbH

Foto rechts: Ultrakurzpuls-Verstärker © Fraunhofer ILT

- Die bisher gewonnenen Erfahrungen mit UltrakurzpulsLasern (Piko- bis Femtosekunden) zeigen das große Potenzial dieser Strahlquellen für industrielle Anwendungen. Die heute verfügbaren Laser genügen jedoch oftmals noch nicht den Anforderungen der industriellen Praxis. Hier sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig auf den Gebieten:

- Robustes und industrietaugliches Laserdesign insbesondere für sub-Pikosekundenpulse
- Kostengünstige Laserkonzepte
- Kostengünstige und hoch belastbare optische Komponenten mit längeren Standzeiten
- Konzepte für den laserexternen Strahltransport
- Strahlableitungs-systeme mit extrem hoher Dynamik

- Kostengünstige Laser mit prozessangepassten Wellenlängen (Ultraviolett bis Infrarot von 1-10 µm) z.B. zur hoch selektiven Bearbeitung einzelner Schichten in Schichtsystemen oder zur Bearbeitung von Kunststoffen

- Kostengünstige DiodenLasersysteme im Bereich einige 100 W bis einige Kilowatt mit adaptiven Strahlprofilen, die variabel auf die jeweiligen Fertigungsaufgaben einstellbar sind.

3.1.4.2

Handlungsfelder und Ziele im Überblick

Technologische Entwicklungslinien und übergeordnete Ziele im Bereich der Laserstrahlquellen betreffen einerseits die Eigenschaften der Strahlquellen selbst und andererseits Innovationen für die Fertigungsverfahren, die direkt einen Beitrag zur Kostensenkung liefern. Im Einzelnen werden folgende Ziele angestrebt:

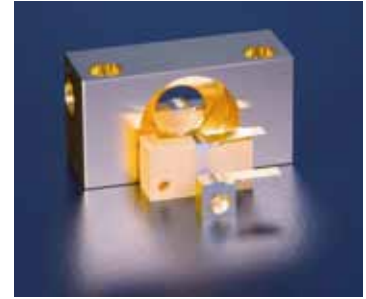
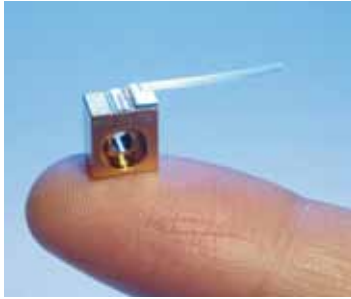


Foto links: Montierte Breitreifenlaserdiode auf Wärmesenke
© Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik

Foto Mitte: Kompakter Mikrochip-Laser © Innolight GmbH

Foto rechts: Hochleistungs-Laserdiode © m2k-laser GmbH

■ Verbesserungen der Laserparameter

- Räumlich/zeitliche Modulation, Schaltbarkeit
- Steuerbare zeitliche Pulsformung
- Erweiterung der Wellenlängenbereiche (UV bis fernes IR)
- Räumliche Strahlformung verbessern (industrietaugliche Konzepte)
- Kosten senken, Effizienz steigern und insbesondere für Diodenlaser eine weitere Verbesserung der Strahlqualität

■ Integration verschiedener Technologien

- Höhere Integration im Bauelement
- Variable Strahlquellen, z.B. flexibles Umschalten zwischen Strahleigenschaften

■ Effiziente Fertigungsverfahren

- Automatisierte Montage von Komponenten und Übergang von der High-End-Manufaktur hin zu geringeren Fertigungskosten
- Bauteilpool statt klassischer Massenfertigung, dabei Erhalt von Spezialprodukten
- Miniaturisierung der Lasersysteme und Low-Cost Quellen
- Steigerung der Robustheit von Komponenten und Systemen

Im Einzelnen ergeben sich daraus auf Seite der Strahlquellen die folgenden Forschungsfelder für die Lasertechnik in Deutschland:

- Festkörper und Faserlaser höchster Leistungen oder kürzester Pulse
 - Diodenlaser mit neuen Wellenlängen für effiziente Pumpkonfigurationen

- (monolithisch aufgebaute) Mikrochip-Laser
- Festkörperlaser: optische Freiformen, Verbesserung von Laserkristallen bzgl. Qualität und Verlusten, Laserkeramiken, Erforschung neuer Laserkristalle zur direkten Erzeugung von ultraviolettem und sichtbarem Licht ohne nichtlineare optische Elemente
- Faserlaser: neue Materialien (für neue Wellenlängen), verbesserte Herstellprozesse

■ Diodenlaser

- Effizienzsteigerung
- Höhere Leistungsdichten (schmale Emitter, hohe Leistung)
- Stabilität bei höheren Betriebstemperaturen (für hohe Leistungen oder passive Kühlung)
- An Koppelkonzepte angepasste Strahlcharakteristiken
- Integration zusätzlicher Funktionen in den Halbleiter (z.B. Wellenlängenstabilisierung, Modenkopplung)

■ Zusammenführung verschiedener Technologien und Verfahren: Optik, Laser, Elektronik, Mikromechanik und Fluidik

- Hybride Systeme (Laser – Optik – Treiber – analoge Elektronik)
- Standardisierte Strahlquellenperipherie (z.B. Schnittstellen zwischen Optik und elektronischer Steuerung)

■ Innovationen bei Aufbau- und Verbindungstechniken

- Hochleistungstaugliche Faserverbindungen (z.B. Faserstecker, Koppler)
- Nutzung von Verbindungstechniken aus anderen Industrien (z.B. Bonding)

■ Kostengünstige Fertigung der Strahlquellen und -systeme



- Design und Fertigungsverfahren von aktiven und passiven Komponenten für die automatisierte Laserfertigung
- Höhere Integrationsdichte von Strahlquellen
- Neue batchbasierte Fertigungsprozesse
- Automatisierbare Montage- und Justageprozesse

■ Strahlformung und ultraschnelle Strahlablenkungssysteme

- Integrierte Komponenten (aktive und passive Fasern, Isolatoren, Volumengitter)
- Flexible und hochdynamische Strahlführungssysteme
- Neue, leistungsbeständige Materialien (z.B. Spiegel, Schichten, aktive Materialien)

3.1.4.3

Die wichtigsten Forschungsfelder

Für vier ausgewählte Handlungsfelder, denen im Hinblick auf ihr FuE-Potenzial sowie ihr künftiges Marktpotenzial die größte Bedeutung zugemessen wird, werden im Folgenden die technologischen Fragestellungen im Detail dargestellt. Im Einzelnen sind dies Diodenlaser, Festkörper- und Faserlaser, Strahlführung und -formung sowie die kostengünstige Fertigung im Hinblick auf die Systemtechnik, die Komponenten und die Integration von Funktionalitäten in Bauelemente.

Diodenlaser

Diodenlaser sind die Grundbausteine aller modernen Lasersysteme. Aufgrund ihrer hohen Effizienz im Vergleich zu anderen Strahlquellen sind sie ein Schlüssel zu weiteren Energieeinsparungen in der Produktion. Zielsetzung bis 2020 muss hier eine Effizienz 80 % im Arbeitspunkt sein. Gleichzeitig stellen sie die Basis für Miniaturisierung und Integration der Laserstrahlquellen dar. Ein weiterer Vorteil des Diodenlasers ist ein günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis (€/W), verbunden mit weiteren hohen Kostensenkungspotenzialen. Die Möglichkeit der monolithischen Integration von Funktionalitäten führt zu einer hohen Robustheit der Strahlquellen. Neben Anwendun-

Foto: Entwicklung von Diodenlasern © LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH/Markus-Steuer.de

gen in der industriellen Fertigung können auf der Basis der Diodenlaser-Technologie weitere (Massen-) Märkte erobert werden: Im sichtbaren Spektralbereich sind dies insbesondere TV- und Projektionsanwendungen (z.B. Laser-Head-Up Displays). Demgegenüber stehen hohe Investitionskosten für die Etablierung einer Halbleiterfertigung, die entsprechende Stückzahlen und Ausbeuten erfordern.

Wichtige Arbeitsfelder sind:

- Optimierung der Epitaxie für hohe Effizienz, gute Strahlqualität, stabile Prozesse
- Epitaxie und Schichtdesign für > 80 % Konversionseffizienz von elektrischer Energie in Licht; Ziel für die nächste Generation der Diodenlaser sind 100W Lichtleistung bei 65 % Effizienz und einer Strahlqualität von 4 mm mrad
- Optimierung der Aufbautechnik für stabile Prozesse und Produkte (Wärmeabfuhr) sowie Hochtemperaturdioden für wasserfreie Kühltechnologien
- Standardisierung von Chip-Geometrien
- Automatisierte Fertigung von Chip, Optik und Sensorik
- Hybride (hoch integrierte) Aufbauten: Diodenlaser – Optik – Sensorik – Stromversorgung – Kühlung; »Platinenkonzept« entsprechend den Konzepten der Elektronikindustrie
- Chip-integrierte Wellenlängenstabilisierung
- Integration von Halbleiter und Lichtleiter (»Faserdiode«)

Festkörper- und Faserlaser

Der zunehmende Einsatz der Lasertechnologien in Fertigungsprozessen, in Deutschland insbesondere durch die Automobilindustrie vorangetrieben, hat in jüngster

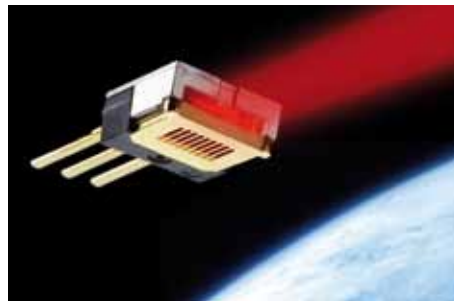
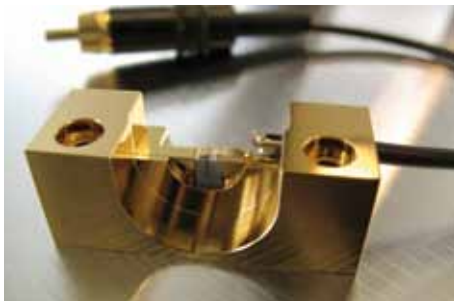


Foto links: Halbleiterverstärker © m2k-laser GmbH

Foto rechts: Laserdiode in miniaturisiertem Aufbau
© OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Vergangenheit ein starkes industrielles Interesse an Lasern mit noch höherer Leistung und deutlich verbesserter Strahlqualität, d.h. Fokussierbarkeit hervorgerufen. Gründe für dieses Bedürfnis sind Gewinne an Flexibilität und Geschwindigkeit und eine Steigerung der Fertigungs- und Prozesseffizienz bei industriellen Anwendungen wie dem Schneiden und Schweißen. Festkörperlaser (insbesondere der Scheibenlaser) und Faserlaser haben hier in den letzten Jahren eine dynamische Entwicklung vollzogen. Dennoch besteht weiterhin ein großer FuE-Bedarf sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene. Kostengünstige und robuste Komponenten (hier insbesondere aktive Fasern) müssen in Deutschland verfügbar gemacht werden, um die hohe Wertschöpfung an unserem Standort auch künftig zu erhalten. Gleichzeitig müssen die Systeme noch stärker an die Anforderungen industrieller (Massen-) Produktionsprozesse angepasst werden. Dazu sind Verbesserungen und Neuentwicklungen an allen Gliedern der Technologieketten erforderlich; neue Wellenlängenbereiche müssen erschlossen werden, adaptive Strahlquellen für flexible Anwendungen sind zu realisieren.

Wichtige Arbeitsfelder sind:

- Deutliche Verbesserung der Basis für die Herstellung der Verstärkungsmedien und von nichtlinearen optischen Medien in Deutschland (Fasern und Kristalle)
- Entwicklung neuer oder verbesserter Komponenten:
 - Neue photonische Strukturen (z.B. Faser-Bragg-Gitter, photonische Kristall-Fasern)
- Hochleistungstaugliche Materialien deutlich über den heutigen Belastungsgrenzen (Identifizierung der Ursachen für Degradation, Behebung durch neue Materialansätze)

- Neue und verbesserte Verstärkermaterialien: Kristalle, Keramiken, Gläser
- Aktive und passive Medien für hohe Leistungen im sichtbaren bis zum UV-Spektralbereich
- Verbesserte Präparationstechnologien für aktive Laserkomponenten
- Komponenten für zeitliche und räumliche Pulsformung

- Festkörperlaser mit höchster Pulsenergie bei hohen mittleren Leistungen
- Effiziente Grundmode-Leistungsskalierung für Faserlaser durch Verschieben der Leistungsgrenzen der Materialbelastbarkeit (z.B. Photodarkening)
- Einfache Schnittstellen zum Strahltransport
- Neue Wellenlängen durch neue Materialien (bis zum mittleren IR-Bereich)
- Multi-kW-Ultrakurzpulslaser
- Wellenlängenflexibilität: Wellenlängen UV – IR mit diodengepumpten Festkörperlasern
- Breitbandige Laser: durchstimmbar mit Pulsdauern bis in den Femtosekunden-Bereich
- Hybride Strahlquellen; z.B. schaltbare Pulsdauern, Mehrwellenlängenlaser
- Resonator-interne aktive Kontrolle von Eigenschaften wie Polarisation, Strahlqualität etc.
- Applikationsspezifische, kosteneffiziente Anpassung durch »multifunktionales Baukastenprinzip«

Bei allen Arbeiten wird die Steigerung der Effizienz der Festkörper- und Faserlaser ein übergeordnetes Ziel sein. Die Vision für 2020: Diodenlaser mit einer Effizienz von mehr als 80 %, eine Konversionseffizienz (optisch zu optisch) von 90 % und damit eine Steckdoseneffizienz von mehr als 50 % für Festkörper- und Faserlaser – eine Verdoppelung im Vergleich zum aktuellen Stand.



Strahlführung und -formung

Nur wenige Laser-Direktanwendungen kommen ohne Optik zwischen Strahlquelle und Ziel aus. Im Allgemeinen dienen Strahlführung und -formung dazu, das Laserlicht von der Quelle zum Werkstück zu bringen: sicher, effizient und flexibel. Um das volle Potenzial neuer Strahlquellen und Prozesse zu nutzen, sind daher neue Komponenten und Systeme für die Strahlführung und Strahlformung erforderlich.

Wichtige Arbeitsfelder dabei sind:

- eine vollständige räumliche und zeitliche Kontrolle der Intensität,
- die hochpräzise, reproduzierbare und schnelle Strahlablenkung, z.B. mittels Elektrooptik, Akustooptik sowie Halbleiter-Modulatoren,
- Elemente zur Strahlformung
 - Hochleistungs-Wellenfront-Former
 - Hoch-Durchsatz Strahlformung (hohe Transmission für hohe Leistung)
 - Neue Strahlformungssysteme für applikations-spezifische Strahlprofile (Tophat, Ring etc.)
 - Kostengünstige Strahlformung für den UV-Bereich
- Verzerrungsfreie optische Systeme für Hochleistungsanwendungen
- Faserbasierte Strahlführung
 - Lichtleiter für kürzeste Pulse und höchste Leistungsdichten
 - Neue faserintegrierte Komponenten (z.B. faserintegrierte Strahlweichen)
- Online-Diagnose durch die Integration von Prozessüberwachung und -regelung in die Strahlführung
- Entwicklung von Flächenlösungen, z.B. VCSEL-Arrays¹⁷ für flächige Anwendungen

*Foto links: Scheibenlaser für multi-kW Ausgangsleistung
© TRUMPF GmbH + Co. KG*

Foto Mitte: Faserlaser auf Kühlkörper © IFSW, Universität Stuttgart

Foto rechts: Halbleiterbarren für Diodenlaser © JENOPTIK Laser GmbH

Im Bereich der Strahlführung und -formung sind aufgrund der hohen bereits heute erreichten Intensitäten die optischen Grenzen verfügbarer Materialien oftmals erreicht. Es werden daher neue Materialien und Prozesse für die Fertigung und Montage optischer Komponenten im Batch-Prozess benötigt. Konzepte wie z.B. Freiformflächen müssen in FuE-Projekten mit allen Partnern der Wertschöpfungskette von den Materialien über die optischen Komponenten bis zum Lasersystem erforscht und umgesetzt werden.

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 Elektronikindustrien im Hinblick auf Prozesse und höhere Integration erzielt 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. Ein exemplarisches Kostenziel für 2020 liegt bei 1 €/W für Diodenlaser-Direktanwendungen.

Der Übergang in der Fertigung von Laserstrahlquellen von der »Serienmanufaktur« zur Volumenproduktion geht einher mit einer zunehmenden Marktdynamik.

¹⁷ VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

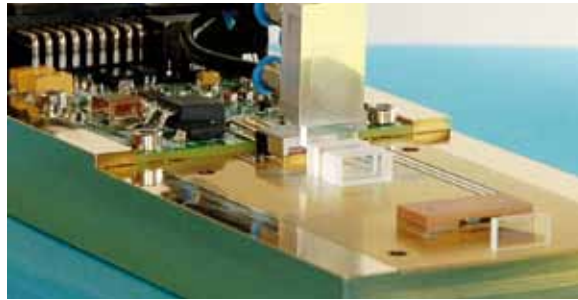
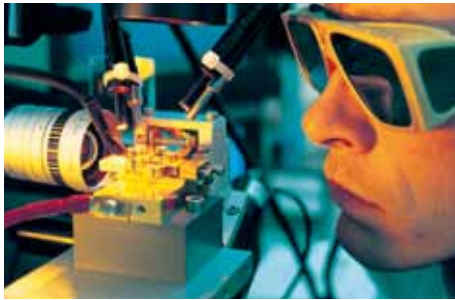


Foto links: Justage der Kollimationsoptik bei der Fertigung von Diodenlasern © JENOPTIK Laser GmbH

Foto rechts: Automatisierte Justage von Mikrooptiken © Fraunhofer ILT

Hieraus ergeben sich Chancen, aber auch Risiken für die deutsche Laserindustrie. Kostengünstige Laserstrahlquellen können aufgrund ihrer Vorteile im Hinblick auf Energieeffizienz und Prozessstabilität klassische, nicht laser-basierte Infrarotstrahlquellen z.B. in der Medizin und der Biotechnologie substituieren oder gänzlich neue Applikationen ermöglichen. Davon können Hersteller und Anwender in Deutschland durch ein schnelles, gemeinschaftliches Vorgehen profitieren.

Wichtige Arbeitsfelder dabei sind:

- Automatisierung, auch Teilautomatisierung der heute noch weitgehenden »Serienmanufaktur« durch
 - Neue Verfahren und Algorithmen zur aktiven, automatischen Justage und Montage
 - Simulation der gesamten Prozesskette
 - Ein angepasstes Design der Komponenten für die automatisierte Fertigung
 - Standardisierung der Schnittstellen
 - Adaption von Verfahren der Volumenproduktion (z.B. Aufbau- und Verbindungstechnik der LED-Technologie)
- Integration, ergänzend oder auch alternativ zur Automatisierung,
 - Realisierung hoch funktionaler, miniaturisierter Systeme mit integrierten Komponenten, z.B. Halbleiter und Optik
 - Plattformkonzept: Optik – Mechanik – Elektronik
 - Optikelemente mit kombinierter Strahlformung und -führung
 - Wafer-basierte Fertigung (z.B. Diodenlaser: Ablösung des Barren-Handlings)
 - Oberflächenmontage optischer Komponenten

3.1.4.4 Rahmenbedingungen

Um die erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Deutschland zielgerichtet durchführen zu können, müssen günstige Rahmenbedingungen geschaffen werden. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist eine noch stärkere Vernetzung mit anderen Technologien. So können mit wachsenden Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik und zunehmender Miniaturisierung Erfahrungen aus den Halbleiter- und Elektronikindustrien genutzt und für die Lasertechnik adaptiert werden. Gleichzeitig ist eine kontinuierliche Vernetzung erforderlich, um Schlüsseltechnologien frühzeitig zu erschließen, Entwicklungslinien abzustimmen und die »Roadmap« für die Lasertechnik in Deutschland regelmäßig zu aktualisieren und ggf. an neue Entwicklungen anzupassen.

Die Partner aus Industrie und Wissenschaft in Deutschland streben ein konzertiertes Vorgehen an, um aktuelle und künftige Trends und Märkte zu identifizieren. Dazu müssen die vorhandenen Entwicklungsnetzwerke weiter gestärkt werden. Dies kann durch eine effiziente, projektbasierte Förderlandschaft nachhaltig unterstützt werden.

Die Arbeiten erfordern zum einen eine enge Vernetzung mit den industriellen Anwendern, um die Marktanforderungen frühzeitig in der Auslegung der Laserstrahlquellen zu berücksichtigen: Die Applikation und die erforderlichen Parameter bestimmen den Laser (»market pull«). Zum anderen werden neue Strahlquellen völlig neue Anwendungen erschließen (»technology push«). Hier gilt es, potenziellen Anwendern die neuen Technologien frühzeitig bereitzustellen, um den Vorsprung im internationalen Wettbewerb durch Entwicklungskooperationen zu erhalten und auszubauen.

Gleichzeitig erfordert die hohe Dynamik der vorgestellten Entwicklungslinien einen schnellen Wissenstransfer von den Forschungseinrichtungen in das industrielle Umfeld. Daher wird die Verbundforschung weiter

an Bedeutung gewinnen. Zudem ist eine hochwertige Nachwuchsausbildung, sowohl im Hochschulbereich als auch in der nicht-akademischen Ausbildung, eine unverzichtbare Voraussetzung für den Erfolg der deutschen Laserindustrie. Hier müssen die Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik gemeinsam vorangehen, z.B. auch durch gezielte Nachwuchswerbung für die junge Photonik-Branche.

3.1.5

Innovationen in Licht – 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. Ungeachtet der mittlerweile erreichten höchsten Komplexität von Optiken kann deren Basis mit nur wenigen Elementen beschrieben werden: Materialien, Oberflächen und Schichten. Materialien bilden dabei das Grundgerüst und prägen die fundamentalen Übertragungseigenschaften einer Optik, während mit den Oberflächen und Schichten im Wesentlichen die Funktion flexibel eingestellt werden kann.

3.1.5.1

Smart Photonic Components – Optiken für die Photonik von morgen

Schon 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 den kommenden Jahren 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. Hierbei gilt 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.

Für weitere Fortschritte auf dem Wege hin zu der geforderten neuen Klasse von Optiken, die sich unter dem Begriff »Smart Photonic Components« zusammenfassen lässt, müssen somit neue Materialien und beschichtete funktionelle Oberflächen im Mittelpunkt der Forschung und Entwicklung stehen. Die Schaffung neuer Grundlagen allein ist hier nicht zielführend, vielmehr muss das Blickfeld gleichermaßen auf die letztendlich geforderten High-End Optiken und Komponenten zur raumzeitlichen Modulation von Licht in weiten Parameterbereichen ausgeweitet werden. Längst ist die Photonik über die diskrete Aufbautechnik hinausgewachsen. Heute stehen ganzheitliche Systemansätze im Vordergrund, die wie in der Entwicklungsgeschichte der Elektronik komplette optische Systeme auf wenig Raum oder in Einzelfällen sogar schon auf einen einzigen Chip integrieren. Ein strategischer Entwicklungsprozess der Photonik kommt daher mit Sicherheit ohne die Entfaltung moderner Aufbautechniken mit einem ganzheitlichen Systemdesign nicht mehr aus. Nicht zuletzt müssen diese Entwicklungen immer vor dem Hintergrund des internationalen Marktes betrachtet werden, der eine optimierte, kosten- und energieeffiziente Fertigung diktiert.

Im Folgenden sollen die strategischen Entwicklungsaspekte der genannten Schlüsselemente detailliert erläutert werden.

Neue Materialien

Die Entwicklung neuer Konzepte in der Photonik wird zunehmend durch Defizite in den Eigenschaften der

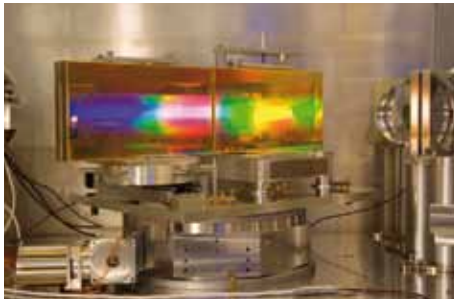


Foto links: Optisches Gitter zur Kompression von Laserpulsen
© Fraunhofer IOF

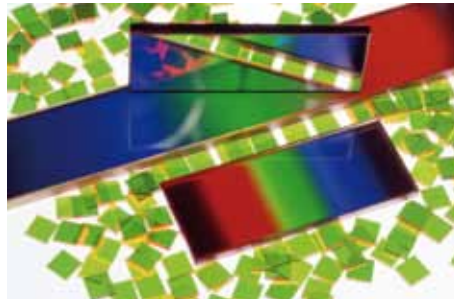


Foto rechts: Optische Interferenzfilter sind vielseitig einsetzbar,
z.B. in der Zahnmedizin oder Augenheilkunde © SCHOTT AG

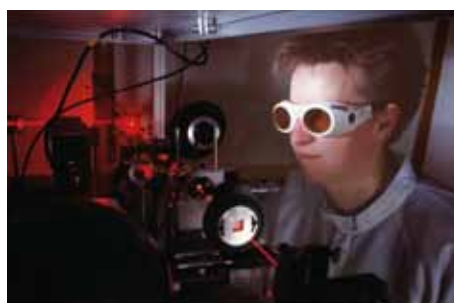
eingesetzten Materialien begrenzt. Dies tritt beispielsweise besonders deutlich bei der Leistungsfestigkeit und Langlebigkeit von Optikelementen zu Tage, die in vielen Fällen die Wirtschaftlichkeit von Strahlquellen und der damit verbundenen Anwendung begrenzen. In gleicher Weise führen auch häufig Qualitätsschwankungen oder unzureichende Eigenschaftsparameter zu Entwicklungshemmnissen für neue Produkte und Verfahren. Bedingt durch den ausgedehnten Diversifizierungsgrad der Optischen Technologien sind im Bereich der Materialien eine Vielzahl von Einzellösungen zu erarbeiten, die auf die Realisierung verschiedenster Funktionsprofile ausgerichtet sind.

Über die bisherigen Ansätze hinaus, die im Wesentlichen die vorhandenen Eigenschaften eines Materials weiter ausreizen, müssen hier Fertigungskonzepte zu neuartigen Kristallen, Gläsern, Polymeren und Keramiken bis hin zu nanostrukturierten Kompositen verfolgt werden. Für die klassische Eigenschaftsoptimierung wird unter anderem dem Hochleistungswerkstoff Diamant ein enormes Potenzial zugesprochen. Diamant besitzt eine extreme Härte, eine hohe optische Güte bei einem breiten Transparenzbereich und ist chemisch nahezu inert. Besonders hervorzuheben ist auch sein einzigartiges Wärmeleitvermögen, das bei Hochleistungsanwendungen eine deutliche Steigerung der Standzeiten erwarten lässt. Ähnliche Vorteile bieten Saphir und Silizium, die in hoher Reinheit herstellbar und so von großem Interesse für die weitere Materialoptimierung sind. Für diese Materialien fehlen angepasste Politurprozesse und Bearbeitungsverfahren, die eine weitere Miniaturisierung der Komponenten ermöglichen und den zukünftigen Aufbautechnologien der Photonik gerecht werden. Ein wichtiger Aspekt ist dabei auch eine verbesserte Reproduzierbarkeit der Herstellungsverfahren, für die gegen-

wärtig weder ganzheitliche und ressourcenschonende Strategien noch entsprechende moderne Qualitäts- und Prüfnormen zur Verfügung stehen.

In der Strahlquellenentwicklung definiert sich ebenfalls ein essentieller Handlungsbedarf bei den Materialien basierend auf dem Trend hin zu immer extremeren Strahlparametern. Die neuen Laserkonzepte mit höchsten Ausgangsleistungen fordern aktive Materialien in industrietauglicher Qualität mit hohen laserinduzierten Zerstörungsschwellen. Hier sind passende Materialien, auch für den Ultrakurzpulsbereich, bereits identifiziert und müssen in ihren Herstellungsverfahren weiter optimiert werden. Von großer Bedeutung sind dabei neben den gezogenen Kristallen auch Keramiken mit hohen Schmelzpunkten, die durch Sintern oder andere Hochdruckverfahren erzeugt werden können. Diese Materialklasse könnte auch weitere Funktionen, beispielsweise die optische Isolation und die Güteschaltung auf höchstem Energiedichte-Niveau erschließen. Zukunftsorientierte Forschungsarbeiten sind auch den Frequenzkonversionskristallen als Schlüsselkomponenten für die modernen Festkörperlaser-Systeme zu widmen. Hier gilt es einerseits, den Frequenzbereich für die Konversion mit neuen Materialien und Herstellungsverfahren in den ultravioletten Spektralbereich (UV) zu erweitern. Andererseits ist die Stabilität der Kristalle eine kritische Begrenzung, der mit neuen Bearbeitungstechniken entgegengewirkt werden muss.

Für die zukünftige Generation optischer Schaltkreise, die mit der Integration elektronischer Funktionen Hand in Hand geht, sind die derzeitigen Materialwissenschaften in der Optik noch nicht zweckmäßig positioniert. Notwendig ist nicht nur eine deutliche Erweiterung des Funktionsspektrums der Materialien, in einfachster Form über breite Frequenzbänder, sondern überhaupt die Erlangung neuer Fertigkeiten zum Assemblieren und Verbinden der Komponenten. Hier sind ganz neue Technologien zum Richten, Löt- oder Bonden von einzelnen Optiken kleinster Dimensionen und zur Darstellung miniaturisierter Baugruppen in Verbindung mit



elektronischen Schnittstellen zu entwickeln. Zu den vielen Funktionalitäten, die auf kleinstem Raum dargestellt werden müssen, gehören die optische Verstärkung und Frequenzkonversion, das Verteilen, Filtern und Modulieren von Licht oder das Umsetzen von Lichtmustern in elektrische Signale oder Bilder. Viele Ansätze auf der Basis von Nanostrukturierungstechniken, Dotierungsverfahren sowie der Synthese neuartiger Kompositmaterialien befinden sich hier noch in einem frühen Stadium und müssen mit Blick auf die angestrebten Optikmodule weiter ausgebaut werden.

Funktionelle Oberflächen

Die Funktionalisierung von Oberflächen ist zweifellos eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien der Photonik des 21. Jahrhunderts. Mit ihren Methoden lassen sich die Eigenschaften von Oberflächen über einen äußerst großen Wirkungsbereich beherrschen. Von der einfachen optischen Übertragungsfunktion in modernen Strahlquellenkonzepten und Kommunikationssystemen, über vielfältige Anwendungen in der Medizin, industriellen Fertigung oder Umwelttechnik, bis hin zur photovoltaischen oder thermischen Energieerzeugung überdecken funktionelle Oberflächen ein enormes Spektrum mit einem einzigartigen Innovationspotenzial. Dabei sind zusätzlich noch die beträchtlichen Wertschöpfungsfaktoren zu berücksichtigen, die leicht im Bereich von einigen Hundert liegen können und so die besondere Bedeutung der Oberflächentechnologien für den Wirtschaftsstandort Deutschland mit seinen speziellen ökonomischen Randbedingungen unterstreichen. Nationale Hochtechnologie-Unternehmen und Forschungseinrichtungen haben daher nicht zuletzt auch durch vorausschauende und intensive Fördermaßnahmen auf der Grundlage funktioneller Oberflächen einen deutlichen globalen Wettbewerbsvorsprung errungen, der gegenüber dem dynamischen Markt insbesondere im fernöstlichen Wirtschaftsraum weiter ausgebaut werden muss.

Vor diesem Hintergrund definieren sich mit Blick auf die aktuellen Zielstellungen der Photonik klare Handlungsempfehlungen für die strategische Fortentwicklung

Foto links: Optikbeschichtung © Laser Zentrum Hannover

Foto rechts: Qualitätskontrolle von Optiken mittels Laser © Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG

funktioneller Oberflächen. Aufsetzend auf der herausragenden Erfahrungsgrundlage gilt es hier insbesondere, den Weg der Photonik **von einer diskreten Aufbautechnologie zur kompakten Integration** ähnlich der elektronischer Schaltkreise mit zu bereiten und die Eroberung neuer Einsatzgebiete in den Zukunftsfeldern moderner Industriegesellschaften zu begleiten.

In erster Linie sind es dann naturgemäß die Herstellungsverfahren für funktionelle Oberflächen, die in den Fokus zukünftiger Forschungsansätze anzusiedeln sind. Unter Berücksichtigung der Ressourcenschonung und Umweltneutralität sind hier einerseits neue Prozesse zur Beschichtung der Oberflächen zu betrachten. Andererseits sind zusätzlich neue Konzepte zu verfolgen, die direkt an der Oberfläche ansetzen und über nanotechnologische Strukturierungsverfahren oder durch Selbstorganisation neue Funktionen aufprägen. Konkret sind bei den plasmabasierten Beschichtungsverfahren Hybridprozesse zu erarbeiten, die in einer Kombination von PVD- und CVD- bzw. PECVD-Verfahren¹⁸ verbesserte und neuartige Funktionen erschließen. Weiterhin große Beachtung verdienen aber auch die schon etablierten Verfahren, schwerpunktmäßig das Zerstäuben, die ionengestützte Bedampfung und die ALD¹⁹, deren Möglichkeiten längst noch nicht ausgeschöpft sind. Unverzichtbar ist dabei der Einsatz von Plasmen, mit denen bei guter Kontrollierbarkeit Beschichtungsmaterial in definierter Form frei gesetzt und gezielt Energie in die Wachstumsprozesse der Schichten eingebracht werden kann. Hiermit bringen Plasmen zusätzliche Freiheitsgrade in die Beschichtungsprozesse ein, deren Wirkungsbreite bei Weitem noch nicht erkundet ist und ein enormes

¹⁸ PVD: Physical Vapor Deposition, CVD: Chemical Vapor Deposition, PECVD: Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

¹⁹ ALD: Atomic Layer Deposition

Entwicklungspotenzial birgt. Die Zusammenarbeit zwischen Plasmaphysikern mit ihrem Spezialwissen im Bereich der Generation, Beherrschung und Diagnostik von Plasmen auf der einen Seite und Beschichtungstechnologen mit ihrem weit reichenden Erfahrungshintergrund zu den optischen Beschichtungsprozessen auf der anderen Seite steht hier noch ganz am Anfang und muss erheblich intensiviert werden. Zu den primären fachlichen Zielen sind über eine Steigerung der Produktivität hinaus insbesondere auch eine weitere Verbesserung der Qualität der Beschichtungen und die Ausweitung der Beschichtungsflächen durch Optimierung und Skalierung effizienter Plasmaprozesse für die Präzisionsoptik zu zählen. Erreichte Ergebnisse bei der industriellen Großflächenbeschichtung müssen gesichert, aber auch hinsichtlich erreichbarer Kosteneinsparungen ausgebaut und deshalb forschungsseitig untersetzt werden. Wichtige Komponenten für die zukünftigen Prozessgenerationen sind auch Konditionierungsverfahren, die vor und nach der Beschichtung zur Verbesserung der Qualitätsparameter eingesetzt werden. In diesem Zuge stellen innovative Beschichtungsanlagen, die mehrere Behandlungszyklen innerhalb einer Prozessumgebung ohne externes Produkthandling ermöglichen, eine essentielle Entwicklungsstufe dar.

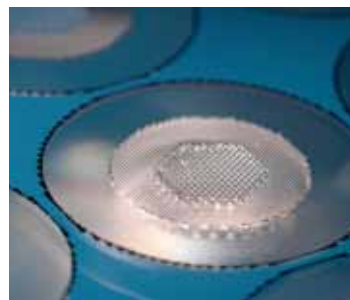
Von größter Bedeutung ist ferner die Kontrolle der Prozesse auf atomarer Ebene, z.B. für die Herstellung von Sub-Wellenlängen-Strukturen mit maßgeschneiderten optischen Eigenschaften. Die Anforderungen an die spektralen Übertragungseigenschaften von Funktionsschichten bezüglich Komplexität und Präzision werden stetig weiter ansteigen. Um diesen Ansprüchen zu begegnen, werden die bisher eingesetzten einfachen optischen Kontrollverfahren für die Beschichtungsprozesse nicht mehr ausreichen. Vielmehr wird kurzfristig eine ganzheitliche Nanokontrolle der Prozesse unerlässlich, die auf einer Vielzahl von Prozesssensoren basiert und über die einfache Parameterkontrolle der Schichten hinaus deren Struktur bis hin zur atomaren Auflösung mit berücksichtigt. Mit diesen Voraussetzungen können die

vorherrschenden Prinzipien der einfachen Stapelung von diskreten Einzelschichten zur Funktionalisierung der Oberflächen endgültig verlassen und die bahnbrechenden Vorteile einer kontinuierlichen Variation der Schichteigenschaften in der Tiefe der Schichtstruktur auch industriell umgesetzt werden.

Die Erzeugung und Verwendung neuartiger Beschichtungsmaterialien sind weitere ausschlaggebende Ausgangspunkte für die Funktionalisierung optischer Oberflächen bis in den Bereich aktiver Eigenschaften. Übergeordnete Zielstellungen konzentrieren sich hier beispielsweise auf die Realisierung von Schichten und Strukturen, die eine raumzeitliche Manipulation oder sogar die Erzeugung von Strahlung ermöglichen. Angepasste Lösungsansätze, die bereits Gegenstand der Grundlagenforschung sind, binden neben organischen Schichten und komplexen Mischgefügen auch die Integration von eigenschaftsbestimmenden Nanokomponenten in die Schichtmatrix ein. Im Entwurf zeichnet sich dabei die Aufbereitung völlig neuer Funktionen ab, die etwa eine Photosynthese beinhalten oder auch pluripotente Oberflächen, deren jeweilige Funktion aus einer Vielzahl angelegter Möglichkeiten gewählt und definiert über einen Vorbehandlungsschlüssel eingeschaltet werden kann.

Ein weiterer Innovationsschub wird von nanotechnologischen Ansätzen zur Aufbereitung der Eigenschaftsprofile von Oberflächen erwartet. Neben der bereits bekannten optischen Vergütung nach dem Mottenaugen-Prinzip stehen insbesondere diffraktive Optiken im Vordergrund, die bei verbesserter optischer Funktion mit kostengünstigen Replikationsverfahren in großer Fläche und Stückzahl gefertigt werden können. In diesem Kontext gehen von Plasmaverfahren zahlreiche Entwicklungspotenziale für ressourcenschonende Oberflächenbehandlungsverfahren aus, deren Reichweite bisher nur in Ansätzen erkundet wurde.

Bis in die jüngste Vergangenheit hinein wurde die Funktionalisierung von Oberflächen nur mit empirischen Me-



thoden betrieben, wobei ein direkter Dialog zwischen den relevanten Fachdisziplinen auf Grundlagenebene in weiten Bereichen nicht stattgefunden hat. Als Folge hat sich über Jahrzehnte ein empfindliches Defizit bei den Modellbildungen zu den Prozessgrundlagen und Schichtbildungsprozessen aufgestaut, das die Entfaltung der Verfahren zur Oberflächen-Funktionalisierung existenziell behindert. Angestoßen durch diese Problematik wurde kürzlich erstmals eine Zusammenarbeit der Plasmaphysik mit der optischen Beschichtungstechnologie erfolgreich angebahnt. Solche Kooperationskonzepte müssen weiter ausgebaut und gestärkt werden, um den Mangel an Grundlagenwissen rasch zu beheben. Wichtige Aspekte definieren sich dabei aus dem Bestreben heraus, Schichteigenschaften auf Grundlage der Herstellungsparameter zu verstehen und zu beschreiben. Dementsprechend besteht kritischer Handlungsbedarf für eine Simulation von Herstellungsprozessen, die eine Korrelation zwischen den Herstellungsparametern und den Nanostrukturen der Schichten ermöglicht. Zu berücksichtigen sind dabei Modellbildungen zu den Kondensationsprozessen der Schichten unter der Wirkung typischer plasmabasierter Prozessumgebungen. Gleichmaßen von Bedeutung ist eine Aufbereitung und Vorhersage der anwendungsrelevanten Eigenschaften und Degradationsmechanismen der Schichten auf Basis der verfügbaren Strukturparameter. Ein solcher ganzheitlicher Ansatz könnte durch die Vorhersage von Prozessergebnissen eine zusätzliche Dimension in der Rationalisierung der Oberflächentechnologie eröffnen und einen wichtigen Meilenstein zur vollständigen Realisierung deterministischer Beschichtungsprozesse darstellen. In Kombination mit einer verbesserten Prozesskontrolle und einer ganzheitlichen durchgängigen Fertigungskette entsteht so eine neue Generation von Prozessen für die Funktionalisierung von Oberflächen, die eine flexible Fertigung optischer Komponenten auf höchstem Qualitätsniveau ermöglichen.

*Foto links: Strahlteiler © Berliner Glas KGaA
Herbert Kubatz GmbH & Co.*

Foto Mitte: Im Präzisionsblankpressverfahren können asphärische Linsen mit einem sehr hohen Brechungsindex in Form von Arrays hergestellt werden © SCHOTT AG

Foto rechts: Tandem-Mikrolinsen-Homogenisator mit Zonen verschiedener Divergenz © Fraunhofer IOF

High-End Optiken (hochintegrierte hybride Optiken)

Die Durchsetzungskraft der Photonik wird entscheidend von der Verfügbarkeit angepasster High-End-Optiken abhängen. Solche hochintegrierten, hybriden Optiken (HHO) sichern mit ihrer Leistungsfähigkeit und Multifunktionalität bei geringem Montage- und Erhaltungsaufwand den Ertrag der Optischen Technologien in den Zukunftsfeldern und leisten einen wichtigen Beitrag zum notwendigen Übergang zu kostengünstigeren Strahlquellen, die in Großserie gefertigt werden können. Die Entwicklung und Herstellung künftiger HHO – wie zum Beispiel optische Komponenten, die optische Nano- und Mikrostrukturen mit Freiformflächentechnologie kombinieren – wird durch bereits heute klar erkennbare Faktoren bestimmt werden.

Sowohl im Ultrakurzpuls- als auch im cw-Betrieb²⁰ werden von HHO zunehmend höhere Leistungs- und Energieeffizienz erwartet. Dies erfordert neben Substratmaterialien auch Schichtmaterialien und Schichtdesigns, die hohe Leistungsdichten zulassen. Damit verbunden ist die Forderung nach Materialien mit sowohl geringen intrinsischen (durch den Herstellungsprozess) als auch extrinsischen (durch von außen eingeprägte Kräfte) Spannungen. Ein weiteres Qualitätsmerkmal von HHO gegenüber konventionellen Materialien wäre ein deutlich verminderter Streulichtanteil, was neben dem Materialaspekt gerade bei diffraktiven Strukturen auch deutlich verbesserte Herstellungsverfahren erfordert. Dies könnte durch plasmabasierte funktionale Oberflächen bzw. Schichten, die ggf. sogar selbstheilend sind,

²⁰ cw: continuous wave



Foto links: Diffraktiv optisches Element © ITO, Universität Stuttgart

Foto Mitte: Diamantgefrästes Mikrolinsenarray für »wafer scale manufacturing« © Fraunhofer IOF

Foto rechts: Computergesteuertes Polieren einer außersaxialen Asphäre aus Zerodur © Carl Zeiss Jena GmbH

umgesetzt werden. Handlungsfelder umfassen hier neue Substrat- und Schichtmaterialien mit geringster Volumenstreuung und Absorption sowie sehr hohen Leistungs- und Energiedichten. Im Hinblick auf die Herstellung photonischer Kristalle werden dabei Materialien, die einerseits dreidimensionale z.B. Laser-basierte Strukturierungsverfahren und andererseits optische Eigenschaften hinsichtlich Brechungsindex, Homogenität sowie Nichtlinearität aufweisen, gefordert. Ein wesentliches neues Element der HHO sind dabei optische Freiformelemente. Damit eng verbunden ist die Frage der theoretischen Beschreibung und Simulation dieser Geometrien, die Herstellungs- und höchstpräzise Messtechnik. Der entscheidende Punkt hierbei ist die Präzision, insbesondere dann, wenn im Bereich extrem ultravioletter Strahlung (XUV) gearbeitet werden soll. Ein Herstellungs- und Beschreibungsansatz könnte im Bereich der Minimalflächen liegen. Eng verknüpft hiermit ist auch die Weiterentwicklung entsprechender Aufbau- und Verbindungstechnik, wie z.B. Löt- und Bondtechniken, die zum einen der Genauigkeit, die mit der Wellenlänge skaliert, und zum anderen den extremen Einsatzbedingungen derartiger Systeme hinsichtlich Leistungsstabilität und Kontaminationsanforderungen gerecht wird. Mit dem Vorstoß in energiereichere Leistungs- und Wellenlängenbereiche skalieren auch hier Effekte der Streuung an Materialien, Oberflächen und funktionalen Schichten. Die Leistungsfähigkeit wird somit entscheidend in Auflösung, Lebensdauer und Zerstörfestigkeit durch diese Effekte mitbestimmt. Die Weiterentwicklung entsprechender Modelle und Datenbanken zur Beschreibung von Streueffekten ist somit unerlässlich.

Bedingt durch die Tendenz zu immer kürzeren Laserpulsen (Femtosekundenlaser) in extremen Wellenlängenbe-

reichen (Vakuum-Ultraviolett bis fernes Infrarot – VUV bis FIR) ist das Dispersionsmanagement ein weiterer bestimmender Faktor in optischen Systemen, dessen Bewältigung bzw. gezielte Beeinflussung durch geeignete diffraktive oder refraktive Strukturen realisiert werden kann.

Neue Funktionalitäten von HHO mittels geeigneter Materialien, Oberflächen-Geometrien und -Strukturen zu erzeugen, ist zwingend mit der Forderung nach einer Weiterentwicklung entsprechender Design- und Simulationstools verbunden, die insbesondere an den Schnittstellen Wellenoptik/Strahl-optik aber auch Optik/Mechanik sowie bei der Darstellung und Beschreibung von Freiformflächen erweitert sind. Ein weiteres Element zur Integration neuer Funktionen stellen adaptive optische Elemente dar, die mittels gezielter Ansteuerung neue variable, adaptive und ggf. sogar selbstadaptive optische Funktionen, z.B. im Bereich der Strahlformung (Beamshaping) erfüllen könnten. Mittels photonischer Kristalle ließen sich darüber hinaus neue Funktionen, wie z.B. 3D-Wellenleiter in HHO erreichen. Ein grundlegender Aspekt zur Verwirklichung von HHO ist eine ganzheitliche Beschreibung der optischen (wellen- bzw. strahl-optischen und ggf. sogar nichtlinearen) Eigenschaften und der mechanischen (Spannungsverteilung, Spannungsdoppelbrechung) Einwirkungen. Darüber hinaus sind auch Defizite bei der Modellierung thermischer Effekte sowie bei den elektrischen bzw. elektronischen Eigenschaften optischer Systeme zu beheben.

Im Hinblick auf zunehmend höhere Ansprüche hinsichtlich Kosteneffizienz ergibt sich für HHO unter anderem die Forderung nach einfachen, zuverlässigen und robusten Herstellungsverfahren für optische Freiformflächen aber auch nano- und mikrostrukturierte Oberflächen, die ggf. sogar selbstoptimierend sind. Entscheidend hinsichtlich der Kosteneffizienz ist dabei auch der Integrationsgrad bzw. der Grad der Kombination nano-, mikro- sowie makro-optischer Funktionen. Durch die integrale Verknüpfung von Freiformflächen mit diffraktiven Strukturen lassen sich sehr energieeffiziente Elemente



Foto: Optikfertigung unter Reinraumbedingungen
© Berliner Glas KGaA Herbert Kubatz GmbH & Co.

und Systeme realisieren. Da bei entsprechender Qualität jedoch die Kosten der Herstellungsverfahren stark ansteigen, müssen Verfahren entwickelt werden, die auf Basis neuer Ansätze beides – hohe Qualität und geringe Kosten – realisieren.

3.1.5.2

Raum-zeitliche Modulation von Licht in weiten Parameterbereichen

Wie bereits dargestellt, ist die hochdynamische raum-zeitliche Modulation von Licht eine unabdingbare Voraussetzung für effiziente und flexible Anwendungen, bei denen Licht in einer Weise intelligent geformt und gelenkt wird, dass seine Energie nur am erwünschten Ort zur richtigen Zeit einwirkt. Typische Anwendungsbereiche sind Fertigungsprozesse mit Lasern, bei denen der freie Laserstrahl über das Werkstück auf einem vorprogrammierten Weg beliebig geführt werden kann. Hierzu muss der Laserstrahl nicht nur mit entsprechenden hochpräzisen Scannersystemen bewegt und seine Fokusslage mit adaptiver Optik angepasst werden. Vielmehr ist über diese räumliche Modulation auch eine zeitliche Kontrolle der Laserleistung notwendig, die auch bei hohen Spitzenintensitäten zuverlässig arbeitet. Durch eine Optimierung der entsprechenden Modulationssysteme ließe sich eine deutliche Erweiterung des Anwendungsbereichs von Laserstrahlquellen in der modernen industriellen Produktion erreichen.

Tatsächlich stoßen die bisher eingesetzten konventionellen mechanischen ebenso wie akkusto- oder elektrooptische Scannersysteme bereits an ihre technischen Grenzen und müssen zukünftig durch neue Konzepte ersetzt werden. Denkbar wären hier Ansätze auf der Grundlage von MOEMS²¹, die über eine einfache Strahlablenkung hinaus auch eine definierte Maskierung des Laserstrahls und bei geschickter elektronischer Ansteuerung eine Zerlegung des Hauptstrahls in viele einzeln geführte Bearbeitungsstrahlen ermöglichen könnten. Völlig ohne

bewegte Teile kommen Systeme aus, deren Funktion auf der elektrooptischen Modulation beruht. Notwendig sind hier Entwicklungen elektrooptischer Materialien mit ausreichender Leistungsverträglichkeit und großen elektrooptischen Koeffizienten, die Konfektionierung der optischen Bauteile sowie eine optimale Integration der elektronischen Ansteuersysteme. Wünschenswert wäre ein Baukastensystem, mit dem einzelne Ablenkeinheiten und Schalter als Module zu einem Gesamtsystem auf engstem Raum beliebig kombiniert werden können. Als eine erste Zielstellung auf dem Wege hin zu Hochleistungsmodulatoren könnte hier eine miniaturisierte festkörperbasierte 3D-Scannereinrichtung für medizinische Anwendungen betrachtet werden, die bis zu zwei Größenordnungen schneller als gegenwärtige mechanische Systeme arbeitet sowie für niedrige Leistungsbereiche und relativ kleine Ablenkwinkel ($< 10^\circ$ bis 20° optisch) ausgelegt ist. In diesem Zusammenhang sollte auch untersucht werden, inwieweit eine Kombination einer diffraktiven mit einer refraktiven Kontrolle des Laserstrahls zu einer Verbesserung und Flexibilisierung der Modulatorsysteme beitragen kann.

Den wirtschaftlichen Erfolg der raum-zeitlichen Modulation von Licht bestimmt auch die Entwicklung maßgeschneiderter Prozessüberwachungssysteme, die mit spezifischen Ansteuer- und Regelkonzepten an die Modulatoren gekoppelt sind. Hier muss die Messtechnik mit den steigenden Anforderungen der Bearbeitungsprozesse Schritt halten, um schnell auf aktuelle Marktentwicklungen reagieren zu können.

3.1.5.3

Ganzheitliches Systemdesign und effiziente Fertigung

Wie beispielsweise aus der Elektronik bekannt, garantiert auch in der Optik die Verfügbarkeit hochwertiger Einzelkomponenten bei Weitem noch keine Spitzenprodukte.

21 MOEMS: Micro-Opto-Electromechanical Systems



Foto links: Mehr Grün für die Zukunft – Moderne optische Gläser kommen ohne Blei und Arsen aus © SCHOTT AG

Foto Mitte: Optische Komponenten © Karl Storz GmbH & Co. KG

Foto rechts: Freiformoptik © Carl Zeiss Jena GmbH

Vielmehr ist erst die intelligente Kombination der Bauteile, also das ganzheitliche Systemdesign (GSD), der Schlüssel zu Innovationen und letzten Endes zum Erfolg auf den internationalen Märkten. Die Möglichkeiten neuer Materialien und Komponenten lassen sich nur vollständig durch GSD-Konzepte ausschöpfen. Eine realistische Vorstellung wäre etwa die Herstellung von Lichtmodulen in der Größe einer Streichholzschatel, die mit speziell auf die Anwendung zugeschnittenen Parametern aus elektro-optischen, hochintegrierten Strahlführungs- und Modulationseinheiten ohne bewegliche Teile kombiniert werden. Bei günstigen Herstellungskosten, hoher Zuverlässigkeit und einem geringen Preisniveau könnten solche Module Einzug nicht nur in die industrielle Anwendung und Lebenswissenschaften, sondern auch in Massenprodukte für den Haushalt oder den persönlichen Bedarf halten. Die entsprechende Systemintegration und Miniaturisierung optischer Baugruppen wäre ohne GSD unerreichbar. Das GSD ist mithin ein unverzichtbares Element für Innovationen und den Ausbau des wirtschaftlich-technischen Nutzungspotenzials der Photonik.

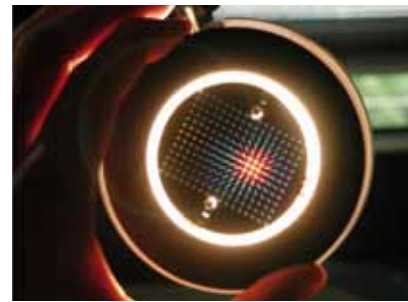
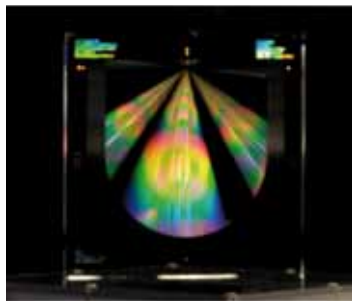
Um neue Impulse zu setzen und das GSD in Deutschland voranzubringen, müssen zweckmäßige Werkzeuge entwickelt werden. Hier fehlen insbesondere moderne Software-Tools, die einen effizienten Entwurf optischer Funktionseinheiten und Gesamtsysteme mit hohem Visualisierungsgrad und angepassten Optimierungsalgorithmen ermöglichen. Wichtig für die anschließende Umsetzung sind dabei auch vorteilhaft definierte Schnittstellen zu den einzelnen Maschinen in der Fertigungsstrecke. Naturgemäß wird es nicht möglich sein, ein allumfassendes GSD-Werkzeug zu erstellen, das für alle Fertigungsketten und deren photonische Produkte gleichermaßen optimiert ist. Indessen sind rationelle

Einzellösungen gefragt, die auf individuelle Produktionssysteme und Erzeugnisse zugeschnitten sind, deren Module jedoch auch universell in anderen Fertigungsumgebungen verwendet werden können.

Gleiches gilt auch für die Implementierung einer kosten- und energieeffizienten Fertigung in der Photonik. Innovationstreiber auf dem Wege hin zu Montage- und Packaging-Verfahren für optische Schaltkreise, wie sie in der Mikroelektronik bereits wirksam eingesetzt werden, sind neben dem GSD ganzheitliche geschlossene Fertigungsstrecken, die jeweils flexibel auf neue Produkte eingestellt werden können. In Anlehnung an die Philosophie der Elektronikfertigung gilt es hier, **automatisierte Montagekonzepte** auf der Grundlage fortgeschrittener Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) zu entwerfen. Im Vordergrund steht dabei die schnelle Marktpresenz der Produkte, die mit übergreifenden Rapid Prototyping Strategien für Optiksysteeme erreicht werden kann. Über die Rationalisierung der AVT hinaus, die gegenwärtig noch einen hohen Kostenanteil am Produkt ausmacht, zählt insbesondere eine flexible und ganzheitlich planbare Fertigungskontrolle mit vollständiger Datendurchgängigkeit zu den wichtigen Elementen. Zu berücksichtigen sind auch 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 sollte die **Vision einer optischen Fabrik**, ähnlich den Wafer-Fabs in der Halbleitertechnologie, auch für die Photonik in greifbare Nähe rücken.

3.1.5.4 Rahmenbedingungen

Ein unverzichtbares Fundament für die Entfaltung von GSD-Verfahren bilden angepasste Standards für Schnittstellen und Komponenten, die eine klare Einordnung der Leistungsfähigkeit von Bauteilen ermöglichen und den Austausch von Systemmodulen erleichtern. Hierzu gehören auch Datenbanken, um Hindernisse bei der Kom-



munikation von Designkonzepten zwischen den Fachleuten zu beseitigen.

Nicht zuletzt muss eine gemeinsame taktische Ausrichtung der Unternehmen in den Bereichen der GSD und effizienten Fertigung einen essentiellen Bestandteil der nationalen Erfolgsstrategie darstellen. Notwendig sind hier Firmenverbünde, die in langfristiger Kooperation insbesondere auch mit Erfahrungsträgern aus der Forschung gemeinsame technische Ziele verfolgen. Denkbar wäre die **Einrichtung einer übergreifenden Plattform** für die Photonik, beispielsweise in Anlehnung an die SEMATECH (SEmiconductor MANufacturing TECHnology), die in der Halbleiterindustrie erfolgreich unterhalten wird und die Unternehmen der Branche kontinuierlich in ihrer Entwicklung anspornt.

Die Werkzeuge allein sind ohne den parallelen Aufbau einer umfangreichen Wissensbasis zunächst nutzlos. Hier ist einerseits das bereits sehr hohe Niveau der vorhandenen Fachkräfte im Zuge der raschen technologischen Fortschritte kontinuierlich anzuheben. Andererseits wird die **Ausbildung guten Nachwuchses**, der sich in den physikalischen Grundlagen leicht orientieren kann und aktuell neue Entwicklungen im Detail kennt, zunehmend wichtig.

Nicht zu vernachlässigen ist auch der Schutz des erlangten Wissens gegenüber Auskundschaftung und Ausbeutung durch andere Unternehmen oder sogar Nationen. Eine entsprechende Kultur zum **Schutz des geistigen Eigentums** steht in Deutschland noch am Anfang ihrer Entwicklung und muss intensiv vorangetrieben werden.

3.1.5.5

Die Handlungsfelder im Überblick

Die Entfaltung der Zukunftstechnologien wird entscheidend von Innovationen der Photonik geprägt. Materialien, Oberflächen und Schichten sind die Grundelemente für die Beherrschung von Licht und müssen in ihrer Gesteuerung bis zum optischen System weiter ausgebaut werden. Handlungsfelder sind hier insbesondere:

Foto links: Großflächiges CGH zur Spiegelprüfung auf einem 9-Zoll-Substrat © Fraunhofer IOF

Foto Mitte: Optikmontage und Sauberkeitsprüfung © Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG

Foto rechts: Mikrolinsenarray © ITO, Universität Stuttgart

Neue Materialien

- Kultivierung von Hochleistungswerkstoffen wie Diamant, Saphir, Silizium sowie neuartige (künstliche) Materialien, z.B. Kristalle, Gläser, Polymere, Keramiken
- Neue Funktionalitäten durch Dotierungen, Nanokomposite, Nanostrukturierungen
- Große Betriebsbereiche für Erzeugung, Schaltung und Konversion von Licht sowie hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauern
- Angepasste Materialien für photonische Module und Schaltkreise sowie reproduzierbare Fertigungsverfahren

Funktionelle Oberflächen

- Modelle für Schichten: Kondensation, Plasmaeinwirkung, Schädigungsmechanismen
- Herstellung: Prä-, Post-Konditionierung, Hochskalierung effizienter Prozesse
- Integrative Produktion: Kombination Beschichtungstechnik mit Bearbeitungsverfahren
- Nano-Kontrolle: neue in-situ Messtechnik, Algorithmen mit Atomlagen-Genauigkeit
- Neue Materialien: organische Schichten, Mischungen, Nanokomposite, Rugate
- Innovative Ansätze: Sub- λ -Strukturen, aktive Schichten, echte Nanostrukturen

High-End Optiken (hochintegrierte hybride Optiken)

- Verfahren zur Kombination optischer Nano- und Mikrostrukturen mit Freiformtechnologie

- Extrem breitbandige Funktionalitäten: Reflexion, Transmission, Dispersion
- Weiterentwicklung von Modellen zur Beschreibung des optischen Verhaltens
- Steigerung der Leistungsverträglichkeit durch Materialoptimierung, Spannungsarmut und geringste Verluste
- Kontaminationsvermeidung durch adäquate Montagetechnologien
- Neue Funktionen: bspw. adaptive Optik, Lichtquellen mit integrierter Strahlformung
- Kosteneffizienz: Freiform-/Freiflächenoptik, Hybridoptik, 3D-Wellenleiterstrukturen

Raum-zeitliche Modulation von Licht in weiten Parameterbereichen

- Schnelles Schalten ohne Mechanik mit elektrooptischen Effekten, neue elektrooptische Materialien
- Neue Konzepte: MOEM-Ansätze, monolithische Systeme
- Flexibilität: Kombination diffraktiv mit refraktiv, Modulbauweise
- Baukastensysteme: Module für Laser, Formung und Pulsung
- Integration: Ansteuerung, Prozessmesstechnik, Überwachungsalgorithmen

Ganzheitliches Systemdesign und effiziente Fertigung

- Werkzeuge: verbesserte Software-Tools, klar definierte Schnittstellen
- Wissensbasis: Ausbildung Systemingenieure, Nachwuchsförderung, Urheberschutz
- Datenbasis: Standards Schnittstellen/Komponenten, Datenbanken zu Modellen
- Fertigung: parallelisiert, Rapid Prototyping, flexible, geschlossene Fertigungsketten

- Intelligente Fertigungskontrolle: durchgängige Datennutzung, CAD/CAM-Simulation
- Automatisierung: Ultrapräzisionsmaschinen, hocheffiziente 3D-Montage
- Neue Aufbau- und Verbindungstechnik: Transfer aus der Mikroelektronik in die Optik
- Universelle Ansätze: Optik, Elektronik, Mechanik kombinieren, Replikationsverfahren
- Struktur: Firmenverbünde, langfristige Kooperation, »SEMATECH« für Photonics

3.1.6

Zusammenfassung

Dem Licht fällt in modernen Fertigungs- und Produktionsprozessen eine Schlüsselrolle zu. Es ist Werkzeug und Auge zugleich. Licht arbeitet verschleißfrei, ist flexibel, wirkt auf die Distanz und verfügt dank seines großen Wellenlängenbereichs über sehr vielfältige physikalische und chemische Wirkungen. Mit diesen Eigenschaften eröffnet Licht in der industriellen Fertigung Möglichkeiten, die mit anderen Mitteln nicht erreichbar sind. Hier gilt mehr denn je: Wer das bessere Werkzeug hat, baut das bessere Produkt.

Die Lasermaterialbearbeitung ist ein herausragendes Beispiel für die Spitzenposition deutscher Unternehmen im Bereich der Photonik für die Fertigung. Deutschland hat sich in diesem Marktsegment vom Importeur zum Exporteur entwickelt. Die Exportquote beträgt etwa 70 %. Jedes vierte weltweit eingesetzte Lasersystem ist »Made in Germany«. Und die Unternehmen machen ihre Hausaufgaben: Nach der Talfahrt in der Folge der Wirtschafts- und Finanzkrise wird der Markt für Lasersysteme zur Materialbearbeitung 2010 um mindestens 25 % wachsen. Mit dem Photon bleibt Deutschland, das Land des Maschinenbaus, der Ausrüster der Welt.

Es gilt nun, die Spitzenposition Deutschlands zu nutzen, um das gesamte Anwendungsspektrum zu erschließen und die Grundlagen für die nächste Generation der Produktion auf der Basis photonischer Fertigungskonzepte zu schaffen. Durch Innovationen bei Strahlquellen und Optiken können wir zugleich den steigenden Anforderungen des Marktes an Lebensdauer und Leistungsfähigkeit und dem Kostendruck im zunehmenden internationalen Wettbewerb begegnen.

Künftige Anforderungen an den effizienten Einsatz von Energie erfordern neue Ansätze in den Fertigungsprozessen. Das Werkzeug Licht ermöglicht eine hochpräzise, selektive und wohldosierte Energiedeposition. So können beispielsweise Ofenprozesse, die ein ganzes Bauteil erwärmen, durch selektive Laserprozesse abgelöst werden. Der Laser selbst arbeitet dabei hoch effizient. Ebenso bietet er bei den Produkten Lösungen für »Cleantech made in Germany«. Mit neuen photonischen Prozessen können wir künftig den Wirkungsgrad bei der Erzeugung und Umwandlung von Energie erhöhen, Solarzellen verbessern und die Leistungsfähigkeit von Energiespeichern steigern – bei gleichzeitig sinkenden Kosten. Von der Windkraftanlage bis zum Elektromobil wird der Laser den Einsatz von Materialhybriden wie CFK-Metall-Verbindungen ermöglichen. Das Ziel: das Gewicht von Leichtbaukonstruktionen senken, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit steigern.

Zur Sicherung unserer Wettbewerbsfähigkeit als Produktionsstandort und Ausrüster der Welt müssen wir in der Fertigungstechnik den Trend hin zu flexiblen, adaptiven Fertigungs- und Anlagenkonzepten und einer Massenherstellung individualisierter Produkte (»Mass Customization«) adressieren. Gleichzeitig müssen wir Nacharbeit und Ausschuss auf ein Minimum reduzieren. Dies gelingt durch die Prozessüberwachung mit berührungsloser optischer Sensorik und flexible, automatisierbare Laserprozesse – die Photonik liefert Schlüsselkomponenten für die

Produktionsverfahren der nächsten Generation. Forschungsbedarf besteht bei photonischen Sensor- und Regelkomponenten, Prozessplanungswerkzeugen sowie geschlossenen, mehrstufigen Regelkreisen. Laserseitig müssen wir intelligente, flexible Lasernetzwerke entwickeln, die jeweils das bestgeeignete Lasersystem für die Bearbeitungsaufgabe bereitstellen – den »Laser on demand«. Zudem benötigen wir kombinierte Prozesse, um mittels geeigneter Systemtechnik mit nur einer Laserquelle Aufgaben wie Schneiden, Schweißen und Härten durchführen zu können.

Im Nanobereich gibt es längst keine Alternative mehr zum Laser. Photonische Fertigungstechnologien sind die Schlüsseltechnologie für die Mikroelektronik auf ihrem Weg zur Nanoelektronik. Dafür benötigen wir immer bessere optische Verfahren und Laser mit immer kürzeren Wellenlängen.

Bei den Optischen Technologien für die Halbleiterindustrie besitzt Deutschland weltweit eine führende Stellung, die allerdings stetigem Druck aus Japan und den USA ausgesetzt ist. Der Übergang zur EUV-Lithographie stellt in den kommenden Jahren völlig neue Herausforderungen an die Hersteller von Optiken, Lichtquellen, Photomasken und optischen Messtechniken. Hier müssen wir Forschung und Entwicklung vorantreiben und Investitionen erbringen. Langfristig sind zudem Forschungsaktivitäten zu neuartigen photonischen Strukturierungsverfahren, Strahlformungsoptiken und Lichtquellen jenseits der EUV-Technologie erforderlich. Nur wenn die optischen Werkzeuge es schaffen, weiterhin die Schlüsseltechnologie für die künftige Miniaturisierung in der Elektronik zu bleiben, können wir unsere zentrale Position in der Wertschöpfungskette behaupten.

Flexible und prozessangepasste Photonenquellen sind die Voraussetzung zur Schaffung der nächsten Generation optischer Fertigungsverfahren. Skalierbare Produktionstechnologien gewinnen hier mehr

und mehr an Bedeutung, Laserstrahlquellen basieren zunehmend auf Halbleitertechnologien. Die damit verbundene Miniaturisierung der Bauelemente hin zu hybrider und monolithischer Integration erfordert verbesserte oder gänzlich neue Laserkonzepte auf der Grundlage automatisierbarer Fertigungsverfahren. Gleichzeitig bedingt ein massiver Kostendruck – in Euro pro Watt – den Übergang von der »Serienmanufaktur« zur Volumenproduktion. Dazu sind Verbesserungen und Neuentwicklungen an allen Gliedern der Technologiekette erforderlich. Wir müssen kostengünstige, adaptive Strahlquellen entwickeln, neue Wellenlängenbereiche erschließen und die Systeme noch stärker an die Anforderungen industrieller Produktionsprozesse anpassen.

Um das volle Potenzial von Diodenlasern, Festkörper- und Faserlasern zu nutzen, müssen wir auch die nachfolgenden Systemkomponenten für die Strahlführung und Strahlformung verbessern. Es geht darum, die PS auf die Straße zu bringen. Ein besonderes Augenmerk bei den Strahlquellen müssen wir auf den Erhalt der gesamten Wertschöpfungskette in Deutschland richten. Gegenwärtig besteht die Gefahr, dass Technologieführerschaft und Fertigung bezüglich einiger spezifischer Komponenten und Systeme – allem voran aktive Fasern – in das Ausland abwandern. Dem müssen wir durch verstärkte Investitionen in Forschung und Entwicklung entgegenwirken.

Bei allen Arbeiten ist die Steigerung der Energieeffizienz ein übergeordnetes Ziel. Die Vision für 2020: Diodenlaser mit einer Effizienz von mehr als 80 %, eine Konversionseffizienz (optisch zu optisch) von 90 % und damit eine Steckdoseneffizienz für Festkörper- und Faserlaser von mehr als 50 % – eine Verdoppelung im Vergleich zum aktuellen Stand.

Schon heute ist abzusehen, dass die gegenwärtig verfügbaren Technologien für die Fertigung von Optiken als Grundbausteine der modernen Photonik

bei weitem nicht ausreichen, um künftige Anforderungen zu erfüllen. In der nächsten Dekade müssen wir photonische Komponenten und Bauelemente in einem ganzheitlichen Design zusammenführen und damit erstmals eine vollständige Kontrolle von Licht auch unter extremsten Bedingungen in Bezug auf Wellenlänge, Energie und Zeit ermöglichen. Hierfür benötigen wir neue Materialien und beschichtete funktionelle Oberflächen für »smarte photonische Komponenten«. Forschungsbedarf 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 entscheidend von der Verfügbarkeit angepasster High-End-Optiken abhängen; Beispiele sind Komponenten, die optische Nano- und Mikrostrukturen mit Freiformflächen kombinieren.

Künftig gilt es, 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. Zudem werden replikative Verfahren für feinste optisch-funktionale Strukturen bei der Optikfertigung von morgen eine Schlüsselrolle einnehmen. Die Vision einer optischen Fabrik, ähnlich den Wafer-Fabs in der Halbleitertechnologie, rückt so in greifbare Nähe.

Die enge Verzahnung der Photonik-Branche mit der Produktion ist eine besondere Stärke unseres Standorts. Das muss auch künftig so bleiben. Dafür müssen wir in der nächsten Dekade den Weg der Photonik von einer diskreten Aufbautechnologie zur kompakten Integration meistern und neue Einsatzgebiete in den Zukunftsfeldern moderner Industriegesellschaften erobern.

3.2

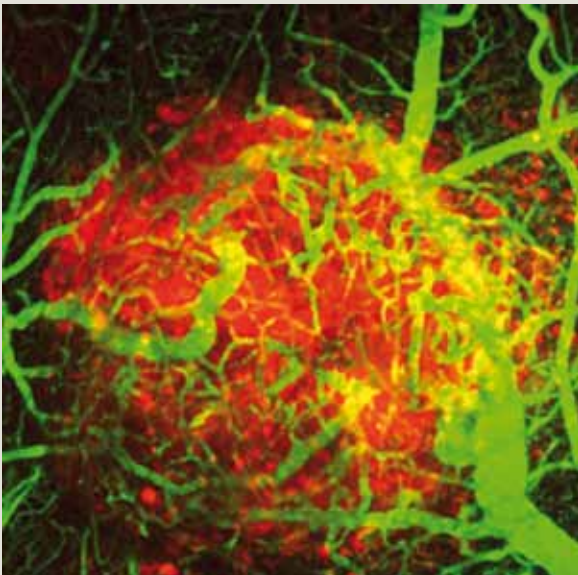
LIFE SCIENCE UND GESUNDHEIT

Die deutsche Position

Leben retten, Gesundheit erhalten, Lebensqualität verbessern: Wir alle werden vom Paradigmenwechsel im Life-Science-Bereich profitieren, von der Behandlung der Symptome von Krankheiten hin zur Prävention. Die Grundlagen dafür werden vor allem beim besseren Verständnis zellulärer Prozesse bis hin zur molekularen Ebene von Lebensvorgängen gelegt – auf der methodisch-instrumentellen Seite dieser Grundlagenforschung spielt Deutschland eine weltweit führende Rolle.

Die Biophotonik ermöglicht neue Aspekte einer künftigen »personalisierten« Medizin. Die wirtschaftliche Bedeutung der Photonik im Bereich Healthcare liegt in der potenziellen Reduktion der Gesundheitskosten (etwa 250 Milliarden Euro pro Jahr allein in Deutschland) um etwa 20 %.

Deutschland, die USA und Großbritannien sind führend bei entsprechenden industriellen Aktivitäten. Bei den Optischen Technologien für die Medizintechnik ist Deutschland hinter den USA weltweit die Nummer zwei, mit einem Marktanteil von 15 % und einer Exportquote von knapp 75 %. Aber Wettbewerber in Asien, insbesondere Japan, China, Singapur und Taiwan, holen schnell auf. Es gilt daher, unsere gute Ausgangsposition zu erhalten und auszubauen.



Molekulare Bildgebung macht Krebstumore im Frühstadium sichtbar
© Zentrum für Neuropathologie und Prionforschung, LMU München

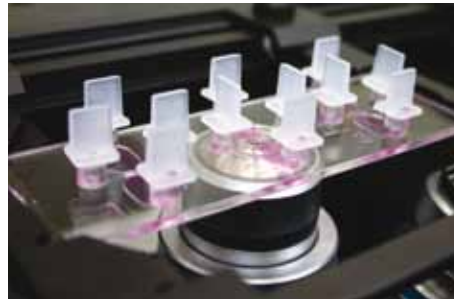
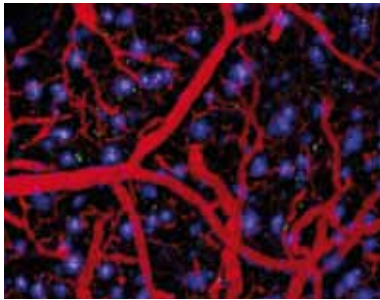


Foto links: In vivo-Nachweis charakteristischer Ablagerungen der Alzheimerschen Erkrankung im Gehirn © LMU München

Foto rechts: Probenkammern für die Beobachtung lebender Zellen © ibidi GmbH

3.2.1

Bildgebende diagnostische Verfahren

Der Anspruch der Menschen an Gesundheit und Lebensqualität, auch im fortgeschrittenen Alter, wächst ständig. Der Wunsch nach Vorsorge und Frühdiagnose nimmt auf breiter Basis zu. Eine steigende Lebenserwartung und eine niedrige Geburtenrate führen zu einer zunehmend alternden Gesellschaft in Deutschland. Daneben bringt ein gesundheitsschädlicher Lebensstil in den Industrienationen, z.B. falsche Ernährung, Bewegungsmangel und schädliche Umwelteinflüsse, eine höhere Zahl an Erkrankungen mit sich, die zu einer Steigerung der volkswirtschaftlichen Kosten führt. Beispiele hierfür sind jährliche Kosten in Deutschland für Diagnose und Therapie von Krebs von etwa 30 Mrd. € und direkte Kosten von Sepsis von ca. 2 Mrd. €.

Lebensprozesse genauer untersuchen und so Krankheiten besser verstehen – dies erlauben innovative optische Verfahren und Mikroskop- und Endoskopsysteme. 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 3D.

Photonische Verfahren haben das Potenzial zur minimal-invasiven, echtzeitfähigen und patientenschonenden bildgebenden Diagnostik in einer hohen Bandbreite an Bereichen (z.B. in Onkologie, Ophthalmologie und Dermatologie sowie bei Herz-Kreislauf- und neurodegenerativen Erkrankungen). Leistungsfähige Bildverarbeitung, intelligente Visualisierung sowie automatisierte

Merkmalsextraktion und Diagnose (Expertensysteme) werden hierbei spürbare Fortschritte bringen.

Unter bildgebender Diagnostik werden hier verschiedene rein optische bzw. photonische oder kombinierte photonische und nicht-photonische Verfahren verstanden, die zwei- oder mehr-dimensionale (z.B. dreidimensionale, hyperspektrale oder multimodale) Aufnahmen von Gewebeoberflächen oder aus dem Körperinneren liefern. Im Sinne einer patientenschonenden Diagnostik sollte die Bildgewinnung dabei im Idealfall nicht-invasiv, oder minimal-invasiv erfolgen. Wünschenswert sind darüber hinaus solche Verfahren, die »in vivo« zum Einsatz kommen können, aber auch bildgebende In-vitro-Diagnostiken sind zu berücksichtigen.

Neben der rein strukturell-morphologischen (anatomischen) Bildgebung steht heute auch die körperfunktionsbezogene Bildgebung sowie die molekulare Bildgebung (Abbildung biologischer Prozesse auf zellulärer Ebene) im Fokus des medizinisch-wissenschaftlichen Interesses.

Bildgebende Diagnostik wird hier als ganzheitlicher Begriff verstanden und umfasst daher die gesamte Prozesskette: Bilderzeugung, Bildrekonstruktion, Bildkorrektur und -verbesserung, Bildanalyse, Klassifikation (ggf. automatisiert und objektiviert), Visualisierung sowie Bilddatenübertragung und -speicherung.

Um neue Ansatzpunkte für die medizinische Diagnostik und Therapie zu entwickeln, sind höchstauflösende optische und dabei physiologisch verträgliche Systeme äußerst wichtig, die es erlauben, die im Größenbereich von 20 bis 200 Nanometer vorhandenen Ansammlungen von Molekülen, die für die Struktur und Funktion der Zellen relevant sind, zu verstehen. Die Kenntnis von Struktur und Funktion bakterieller Proteine z.B. liefert neue therapeutische Ansätze für die Entwicklung von Antibiotika.

Bildgebende photonische Verfahren kommen heute schon in einer Vielzahl medizinischer Gebiete zum Einsatz. Ein etabliertes diagnostisches Verfahren ist z.B. die

optische Kohärenztomographie (OCT) in der Ophthalmologie zur Erkennung von diabetischer Retinopathie, altersbedingter Makuladegeneration und Glaukomen oder die In-vivo-Multiphotonenmikroskopie zur Erkennung von Hauterkrankungen wie z.B. Neurodermitis. Dieses Verfahren lässt sich zukünftig in spezialisierter Form auch in der Endoskopie, Chirurgie, Kardiologie und Dentalmedizin einsetzen und bietet Forschern und Mediziner neue Funktionalitäten wie ultra-hochauflösende Bildgebung, höhere Geschwindigkeit und Flow-Messungen mittels phasensensitiver optischer Kohärenztomographie und Spektralauswertung.

In der Zukunft werden bildgebende photonische Verfahren für die computergestützte Diagnose, die Echtzeitbeobachtung von Medikamentenwirkungen, die Augen diagnostik, die dermatologische Diagnostik und für die Therapiekontrolle eingesetzt werden. Dahinter steckt die Vision, das Auge und die Haut als Fenster zum Körper zu nutzen. So können über den spezifischen Nachweis von Plaques und Proteinen in der Retina Morbus Alzheimer und weitere neurodegenerative Erkrankungen erkannt und es kann über lokal gemessene Autofluoreszenzkinetiken die Neurodermitis diagnostiziert und deren Therapie kontrolliert werden. Der endoskopische Zugang über natürliche Körperöffnungen zur Diagnose der intrakorporalen Schleimhaut verschiedener Organe (Lunge, Harnblase, Darm) ermöglicht in diesem Zusammenhang ebenso die Erfassung unterschiedlichster spezifischer Parameter, die zur Diagnostik und auch zur Therapiekontrolle herangezogen werden können.

3.2.1.1

Die deutsche Position

Deutschland spielt auf der methodisch-instrumentellen Seite der Grundlagenforschung im Bereich der Life Sciences eine weltweit führende Rolle. Gemeinsam mit den USA und Großbritannien ist Deutschland führend bei industriellen Aktivitäten im Bereich der Gesundheit. Bei den Optischen Technologien für die Medizintechnik ist Deutschland hinter den USA weltweit die Nummer zwei.

Die Ausgangsposition ist also gut, dennoch holen vor allem asiatische Wettbewerber schnell auf.

Der Umsatz mit Medizinprodukten und Geräten im Bereich der Lebenswissenschaften auf Basis Optischer Technologien beträgt derzeit 4 Mrd. € p.a. und es arbeiten schon heute mehr als 20.000 Beschäftigte in Deutschland in diesem Bereich.

Bei den bildgebenden diagnostischen Verfahren hat Deutschland auf dem Feld der schnellen Bildverarbeitung sowie der Verdichtung und Rückgabe der Information an den Nutzer – gefördert durch interdisziplinäres Arbeiten – eine sehr gute Position. Auch im Bereich der Höchstauflösung wurde durch eine effiziente Zusammenarbeit in Deutschland viel erreicht. Der Druck zur technologischen Führerschaft ist allerdings groß.

Die Ausbildung in Deutschland ist prinzipiell auf hohem Niveau, jedoch ist fraglich, ob Deutschland es langfristig schaffen wird, gut ausgebildete Spitzenleute im Land zu halten.

Hinderlich wirken sich aufwändige und langwierige Zulassungsverfahren aus. Auch die Bandbreite der Werkzeuge sowie die Breite der Anwendung von Lösungen sind hierzulande derzeit noch zu wenig im Blick. Weitere Defizite sind dort festzustellen, wo es darum geht, Ergebnisse morphologischer und funktionaler Untersuchungen zusammenzubringen, um spezifischere Diagnosen stellen zu können. Auch müssen Applikationsbedarfe aus dem medizinischen Bereich zukünftig bei Forschungsvorhaben im Rahmen der Photonik noch direkter adressiert werden.

3.2.1.2

Herausforderungen

Für die nächste Dekade stehen einige Felder im Fokus, in denen bildgebende diagnostische Verfahren nutzbringend eingesetzt und weiterentwickelt werden sollten. Dazu gehört die Grundlagenforschung zur Alterung sowie zu Therapieansätzen für altersbedingte Erkrankungen.

Auch im Bereich Frühdiagnostik und Verlaufskontrolle besteht immenser Handlungsbedarf. Dabei ist die Einbettung in andere diagnostische und theragnostische Verfahren anzustreben und das Therapiemonitoring zu beachten. Krankheitsfelder, in denen hierbei bildgebend-diagnostische Verfahren bevorzugt zur Anwendung kommen sollten, sind Augenerkrankungen, neurodegenerative Erkrankungen, Hautkrankheiten, Krebs, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Sepsis.

Auge, Haut und intrakorporale Schleimhaut werden dabei in den Mittelpunkt des Einsatzes von Optischen Technologien rücken. Die Haut z.B. eignet sich in besonderer Weise zur Anwendung Optischer Technologien. Sowohl markerfreie In-vivo-Verfahren wie Raman, CARS²², SERS²³ oder Fluoreszenzdiagnostik, als auch multimodale oder spektrale Verfahren können, angewendet auf die Haut, eine neue Herausforderung für Gerätehersteller und Technologieentwicklungen sein. Hautkrankheiten (Hauttumore und ihre Vorstufen, allergische und entzündliche Hauterkrankungen, Pigment- und Wundheilungsstörungen etc.) nehmen stetig zu und müssen besser diagnostiziert und mit einer geeigneten Therapiekontrolle versehen werden. Daneben gibt es weitere kommerziell interessante Gebiete wie beispielsweise Hautalterung, Entfernung von Tätowierungen oder Enthaarung, die mit neuartigen optischen Methoden besser erschlossen werden können.

Deutlich verbessert werden muss generell der Umgang mit Licht bzw. die effiziente Nutzung des Lichts im Patienten. Zum einen ist ein »mehr« an diagnostisch relevantem, spezifischem Licht im Patienten sinnvoll, doch schadet zu viel Licht den Zellen. Durch eine ganzheitliche Verbesserung der eingesetzten Instrumente, d. h. sowohl Lichtquellen, Optiken als auch Detektoren lässt sich eine zu hohe Lichtdosis in vielen Fällen jedoch vermeiden.

Bessere Gewebeuntersuchungen in der Pathologie und mehrdimensionale Aufnahmen von Gewebeoberflächen aus dem Körperinneren sind nötig für eine bessere Diagnostik und Therapiekontrolle. Navigation und Monitoring bei Operationen erfordern eine hohe Sensitivität und vor allem eine höhere Spezifität als bisher. Verfahren sollten generell »in vivo« einsetzbar sein. Eine Verknüpfung zellulärer und klinischer Information ist hierbei anzustreben. Zu diesem Zweck werden sowohl morphologisch-strukturelle (anatomische), als auch funktionelle, d.h. auf die Körperfunktion bezogene bildgebende Verfahren benötigt.

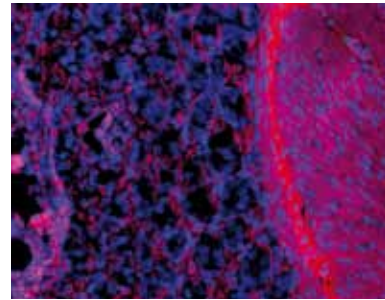
Neben einer verbesserten Eindringtiefe und multiparametrischen optischen Analysen ist insbesondere die Integration verschiedener Ebenen (Multi Layer Modeling) äußerst wichtig, da diese sowohl Extraktion als auch Aggregation wichtiger Informationen erlaubt. Darüber hinaus wird es von großer Bedeutung 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).

3.2.1.3 Handlungsfelder

Zahlreiche technologische Forschungsfelder versprechen applikative Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der bildgebenden diagnostischen Verfahren. Neben hyperspektraler Bildgebung, photoakustischen Verfahren, OCT und Mehrwellenlängenverfahren sind kohärente Verfahren, neue Parameter und Themen wie 2-Photonen-Spektroskopie, -Mikroskopie oder die Verbesserung von Labels wichtig. Darüber hinaus werden adaptive Optiken und Verfahren zur strukturierten Beleuchtung Fortschritte bei vielen diagnostischen Anwendungen bringen.

22 CARS: Kohärente Anti-Stokes-Raman-Streuung

23 SERS: Stimulierte Anti-Stokes-Raman-Streuung



Multimodale Verfahren und multimodale Endoskopie sind neben dem Thema Fluoreszenz, etwa für Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FLIM), Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET) oder Fluorescence Correlation Spectroscopy (FCS) sehr bedeutsame Forschungsfelder der Zukunft. Neben markerfreien Verfahren wie Raman, CARS und SERS wird die gezielte Verzahnung von Markern und Nachweisverfahren als besonders wichtig erachtet. Erheblicher Forschungsbedarf sowie große Chancen werden in den Bereichen 3D-Mikroskopie, effiziente neue Lichtquellen, Bildsensoren und (miniaturisierte) optische Systeme sowie in den Feldern Reduktion und Auswertung von Bilddaten durch Verwendung anwendungsspezifisch programmierbarer Schaltkreise in Kombination mit dem Einsatz von Expertensystemen und der Modellbildung auf Basis optischer Verfahren gesehen. Diese Kernthemen sind im Folgenden detaillierter dargestellt.

3D-Mikroskopie

Eine bedeutende Entwicklung der letzten Jahre ist die zunehmende Fokussierung auf die Beobachtung lebender biologischer Proben in einem physiologisch relevanten Kontext. Zellen müssen unter den physiologischen Bedingungen kultiviert und untersucht werden, die entweder in Gewebeproben, kleinen Modellembryonen oder organotypischen Zellkulturen zu finden sind. Das heißt, es sollen die besonderen biochemischen und biomechanischen Bedingungen verwendet werden, die sich in dreidimensionalen Zellsystemen finden. Dreidimensionale Zellsysteme erlauben bzw. erfordern neue Verfahren zu ihrer Charakterisierung.

Die Auswertung der Daten wird sich an neuen Größenordnungen der Datenmenge orientieren müssen. Diese wächst mit der Auflösung, der Anzahl der gleichzeitig beobachteten Farbstoffe, dem Zeitraum und der Frequenz der Beobachtung sowie mit der Anzahl der Raumrichtungen, entlang derer ein Objekt erfasst wird. Die Probenpräparation in drei Dimensionen erfordert neue Verfahren, die von der jeweiligen Fragestellung abhängen werden. Prinzipiell muss die Probenpräparation

Foto links: Der Augenscan hilft bereits heute bei der Erkennung vieler Augenerkrankungen. Künftig soll er auch helfen, Vorboten von Alzheimer aufzuspüren © Carl Zeiss AG

Foto rechts: Neuartige fluoreszierende Sonden bringen entartete Zellen zum Aufleuchten © Uniklinikum Jena, Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie

industriell, das heißt, standardisiert, in großer Zahl und preisgünstig etabliert werden.

Die aus der zweidimensionalen Mikroskopie bekannten Verfahren wie FLIM, FRET, FCS und Mikromanipulation, welche neben strukturellen Eigenschaften vor allem auch funktionelle Eigenschaften der Zellen zugänglich machen, müssen an dreidimensionale Kulturen angepasst werden. Besondere Anwendungen finden sich z. B. in der Qualitätskontrolle synthetischer Gewebe und in der Stammzellforschung. In beiden Bereichen ist es bisher üblich, die Zellverbände auf zweidimensionale Systeme zu reduzieren, obwohl sie natürlicherweise dreidimensional sind. Das heißt, derzeit werden wesentliche Parameter nicht erfasst und daher auch ignoriert.

Eine dreidimensionale Morphologie erfordert auch geeignete mikroskopische Verfahren, die in der Lage sind, solche Proben als Funktion der Zeit mit einer hohen Auflösung über lange Zeiträume zu beobachten, ohne sie zu zerstören. Damit wächst auch die Bedeutung des Einsatzes von einzelmolekül- und einzelphotonempfindlichen Messverfahren.

Lichtscheibenbasierte Fluoreszenzmikroskopie (LSFM) und ihre verschiedenen Implementierungen wie Selective Plane Illumination Microscopy (SPIM), Digital Scanned Light Sheet Microscopy (DSLM) oder Ultramikroskopie beleuchten einzelne Ebenen einer Probe von der Seite. Im Vergleich zu einem konventionellen Fluoreszenzmikroskop wird dadurch bei der Aufnahme eines dreidimensionalen Bildstapels eine um mehrere Größenordnungen geringere Energie in die Probe eingetragen.

Für physiologisch relevante Untersuchungen an lebenden Zellen sollten insbesondere Methoden entwickelt



Foto: Bildgebende Verfahren in der Entwicklung neuer Medikamente © Bayer HealthCare AG

werden, bei denen die Lichtbelastung die Solarkonstante (1 kW/m^2 entsprechend $1 \text{ nW}/\mu\text{m}^2$) möglichst nicht übersteigt.

Im Zusammenhang mit der 3D-Mikroskopie sollten auch 3D-Zellmodelle etabliert werden, die ein biologisches Gewebe wesentlich besser beschreiben als die herkömmlichen 2D-Objekträgerkulturen.

Kohärente (laser-)optische Verfahren haben sich zu einem eigenen Technologie- und Anwendungsfeld in der klinischen Diagnostik und Zellanalyse mit bedeutendem kommerziellem Erfolg entwickelt. Herausragende Vertreter sind z.B. optische Kohärenztomographie, digitalholographische Verfahren wie die digitalholographische Mikroskopie (DHM) und Mehrphotonen-mikroskopische Systeme. Ihr breitbandiger Einsatz beruht auf den vielseitigen Eigenschaften, die diese Verfahren bieten. So ist z.B. die DHM die derzeit einzige Technologie, die für eine Lebendzellanalyse gleichzeitig Folgendes ermöglicht:

- Hohe axiale Auflösung im nm-Bereich, lateral beugungsbegrenzt (einige 100 nm)
- Labelfrei
- Kontaktlos
- Zerstörungsfrei
- »Full-Field« (kein Scannen erforderlich)
- On-line
- Echtfarbendarstellung
- Modular (Kombination mit kommerziellen Mikroskopiesystemen)

Hiermit sind neue Indikatoren in den Lebenswissenschaften und der Biophotonik für das »Functional Imaging« nachweisbar. DHM ermöglicht damit schon jetzt neuar-

tige Untersuchungen in der Stammzellforschung, dem Tissue Engineering, bei der Entwicklung neuer Medikamente mit minimalem Wirkstoffeinsatz, der Vermeidung von Tierexperimenten, der Tumorfürhdiagnose etc.

Die inhärenten Eigenschaften kohärenter (laser)optischer Verfahren zur 3D-Bildgebung sind derzeit jedoch noch nicht voll ausgeschöpft. Hier bedarf es weiterer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Angesichts der wichtigen Diagnostikanwendungen und der aussichtsreichen kommerziellen Verwertungsmöglichkeiten ist eine solche Entwicklung besonders erfolgversprechend.

Die Entwicklungen der 3D-Zellbiologie, ihre breite Anwendbarkeit für medizinische Fragestellungen und die angewandte Forschung mit dem Ziel der Zusammenführung von Morphologie und Physiologie bzw. von molekularen Strukturen und Funktionen sind essentielle Themen für eine Spitzenposition Deutschlands im Bereich der photonischen Technologien.

Im Fokus der technologischen Entwicklungen stehen dabei onkologische Erkrankungen und Erkrankungen der Haut und Schleimhäute, sowie das Therapie-Monitoring. Zur Erreichung dieser Ziele ist die 3D-Mikroskopie mit automatisierter Auswertung, inklusive 3D-Muster-, Struktur und Zellerkennung auszubauen, sind 3D-Zellmodelle auf der Basis photonischer Daten zu entwickeln, insbesondere auf der Grundlage multi-parametrischer 3D-Daten der Protein-Topologie (Toponom-Daten) biologischer Systeme. Dafür gilt es, die Marker für molekulare Targets besser mit den Nachweisverfahren zu verzahnen. Erst das ermöglicht das Screenen des 3D-Toponom und die Definition und Validierung molekularer Targets, die für die Verzahnung von Diagnostik und Therapie (Theragnostik) zu einer effizienten individualisierten Medizin führen kann.

Labels: Identifizierung, Entwicklung, Validierung

Mit keiner anderen Modalität lassen sich Biomoleküle so sensitiv nachweisen wie mit optischen Verfahren. Die Visualisierung gelingt jedoch selten direkt. Um diese Subs-

tanzen optisch detektieren zu können, bedient man sich des Tricks einer in-situ-Modifikation des Analyten mit einer optisch eindeutig nachweisbaren Substanz.

Marker und Labels Analyten, die man als Indikator, d.h. als charakteristisches Merkmal stellvertretend für einen gesundheitlichen Zustand oder biologischen Prozess untersucht, bezeichnet man als »Marker«; die zur Visualisierung des Markers eingesetzte Substanz als »Label«. Ein Label besteht in der Regel aus einer optisch auslesbaren Reportereinheit und einem Liganden, der die spezifische Bindung des Labels an den Marker vermittelt. Für die Umwelt- und Lebensmittelanalytik sowie für die klinische und die bildgebende Diagnostik verwendet man exogene Label. Für bestimmte Fragestellungen in der zellbiologischen Forschung können auch endogene Label bzw. Reporter geeignet sein.

Liganden – Spezifitätsvermittler für Labels Als Liganden für exogene Labels benutzt man zur Zeit noch vorwiegend Antikörper. Während Antikörper für die Ex-vivo-Analytik bzw. -Diagnostik optimal geeignet sind, sind sie für bildgebende In-vivo-Untersuchungen jedoch nur bedingt tauglich. Aufgrund ihrer Eigenschaft als Proteine können Antikörper Immunabwehrreaktionen beim Patienten verursachen. Zudem besitzen Antikörper eine molare Masse von über 100.000 Dalton, sind sehr hydrophil und degradationsanfällig.

Aufgrund dieser Nachteile wurden in den letzten Jahren Anstrengungen unternommen, Antikörper durch kleinere Liganden zu ersetzen. Die erste Generation solcher »Designerlabels« basiert auf dem »Paratop-Display«-Prinzip durch sog. »Scaffolds«. Obwohl auch auf diesem Sektor noch erheblicher FuE-Bedarf besteht und noch kein System für die humane Anwendung zugelassen ist, liegt der Wert solcher Systeme bereits jetzt im Bereich von mehreren hundert Millionen US-Dollar. Trotz der Euphorie der vergangenen Jahre sind auch Scaffolds nicht frei von Nachteilen. Auch Scaffolds sind proteinöse Substanzen mit dem Risiko adverser Immunreaktionen, und die einklonierbaren Zufallsmotive sind aus kombina-

torischen Gründen auf ca. zehn bis zwölf Aminosäuren bzw. $10^{13} - 10^{15}$ Varianten limitiert. Die nächste Generation von Liganden sollte daher mehr Vielfalt erlauben, bei gleichzeitig geringerer Molekülgröße, geringerer Immunogenität, besserer Zell- und Gewebedurchdringung und höherer Degradationsresistenz. Um ein solch anspruchsvolles Anforderungsprofil zu erfüllen sind neue Konzepte in der Label-Entwicklung, wie z.B. Molecular Molding, High-Content-Screening oder evolutive Verfahren für peptidische, saccharidische oder Small-Molecule-Labels, dringend erforderlich. Solche kleine Liganden könnten auch für die hoch- und höchstauflösende Mikroskopie von Vorteil sein, denn die Markierungsdichte einer biologischen Struktur steigt mit sinkender Label- und damit auch Ligandengröße.

Reporter – Optisch auslesbare Einheiten für Labels

Im Bereich der optisch auslesbaren Einheiten zur Ausstattung von Labels ist die Forschung und Entwicklung am weitesten fortgeschritten. Die Bandbreite reicht von exogenen indirekten Reportersystemen mit Verstärkereffekt über exogene direkte Reportereinheiten bis hin zu endogenen genetischen Reportern.

Die wichtigsten Vertreter der indirekten Reporter sind Enzyme, die man an einen Liganden koppelt und die ein chromogenes oder fluorogenes Substrat in einen Farbstoff oder einen Fluorophor umsetzen, der dann optisch erfasst werden kann. Diese älteste Generation an Reportern wird fast nur in der In-vitro-Analytik eingesetzt. Die FuE in diesem Sektor ist zurzeit eher gering – fast die gesamte klinische Diagnostik nutzt indirekte Reporter. Innovationen sind allerdings noch möglich im Bereich der »Point-of-Care«-Tests, »Lateral-Flow«-Systeme und ähnliche Schnelltests. Das weltweite Marktvolumen für solche Systeme liegt im mehrstelligen Milliardenbereich.

Die Bandbreite der direkten Reporter erstreckt sich von Quantum Dots über Metallnanopartikel und Seltene-Erden-Phosphore bis zu organischen Farbstoffen. Das Haupteinsatzgebiet der direkten Reporter liegt nach wie vor in der Forschung, was auch daran deutlich wird, dass

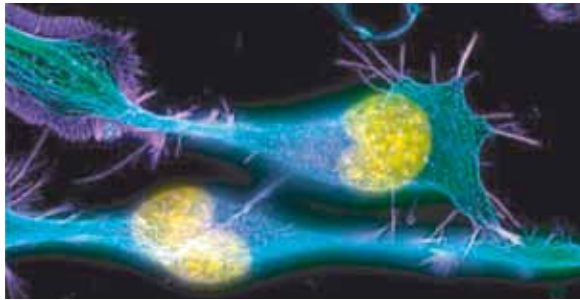
kein direkter optischer Reporter bislang für den Einsatz am Patienten geprüft oder zugelassen wurde. Die anvisierte hochaufgelöste Visualisierung von Krankheitsprozessen auf molekularer Ebene erfordert aber genau das. Es ist daher von grundlegendem Interesse für die biomedizinische Bildgebung, dass toxikologisch unbedenkliche direkte Reporter entwickelt und getestet werden. Für direkte Reporter, die sich als »in vivo« nutzbar erweisen, ist wichtig, dass ihr optischer Fingerabdruck möglichst wenig durch das Untersuchungsgut beeinträchtigt wird und dass er so definiert ausfällt, dass parallel mehrere Labels eingesetzt werden können. Aus diesem komplexen Anforderungsprofil wird ersichtlich, dass bei direkten Reportern für den In-vivo-Einsatz erheblicher FuE-Bedarf besteht. Aber auch für den Forschungssektor, insbesondere in der hoch- und höchstauflösenden Mikroskopie sind Verbesserungen und Neuentwicklungen im Bereich direkte Reporter notwendig, insbesondere eine Verbesserung und Integration der optischen Schaltbarkeit.

Für Proteine, die funktionell vielfältigste Biomolekülklasse, können endogene genetische Reporter, die ein fluoreszierendes Protein codieren, genutzt werden. Obwohl in diesem Bereich schon umfangreiche Arbeiten durchgeführt worden sind und die Proteinfluorophore im Jahr 2008 mit dem Nobelpreis gewürdigt wurden, gibt es nach wie vor großen Bedarf an einer weiterführenden Erforschung und Entwicklung dieser Reporterklasse. Insbesondere die Identifizierung neuer Proteinfluorophore, die Verbesserung der Photo- und Degradationsstabilität bekannter Varianten, die Verkleinerung der fluoreszenten Motive, die möglichst engmaschige Abdeckung des nutzbaren Anregungs- und Emissionspektrums sowie die Entwicklung optisch schaltbarer Proteinfluorophore sind hier zu nennen. Aufgrund der damit verbundenen Genmanipulation bleibt die Wertschöpfung für solche Systeme jedoch auf den Forschungssektor beschränkt.

Reporterliganden – Exogene Labels mit eigenem optischem Fingerabdruck Neben Labels, die zwar hoch-affin und -spezifisch sind, aber einen optischen

Reporter benötigen, gibt es auch die Variante des spezifischen, direkt auslesbaren Reporterliganden. Hierzu zählen fluoreszierende Mikro- und Nanopartikel, die aufgrund ihrer Größe und Oberflächeneigenschaften bestimmte Kompartimente, wie z.B. das Blutgefäßsystem, nicht verlassen können oder fluorogene Substanzen, wie z.B. 5-Aminolävulinsäure (5-ALA), die durch Stoffwechselprozesse in einen optisch nachweisbaren Metaboliten überführt werden. Da anders als beim Antikörper/Scaffold-System die optisch nachweisbare Entität nicht vom Label trennbar ist, liefern Entwicklungen in diesem Sektor in der Regel Speziallösungen. Nichtsdestotrotz ist der FuE-Bedarf im Bereich der Reporterliganden nach wie vor hoch.

Smart Labels – Zielbindungsaktivierbare und zellpenetrierende Labels Um ein gutes Signal-Hintergrund-Verhältnis zu erhalten, dürfen Labels nur dann optisch erfassbar sein, wenn sie an ihr Ziel gebunden sind. Daher muss man entweder überschüssiges Label komplett entfernen oder das Label so gestalten, dass es nur bei Zielbindung sichtbar wird. Bislang erreicht man ein gutes Signal-Hintergrund-Verhältnis meist durch ersteres, d.h. extensives Waschen. Bei In-vivo-Studien sowohl bei der hoch- und höchstauflösenden Mikroskopie als auch bei der bildgebenden Diagnostik ist ein Auswaschen von Labelüberschuss aber meist nicht praktikabel. Für diese künftigen Anwendungen der Optik in der Biomedizin ist es daher sinnvoll, neue Konzepte für Labels zu entwickeln, deren Reporter erst und nur bei Zielkontakt sichtbar werden. In diesem Gebiet gibt es bislang nur wenige Arbeiten, so dass bei raschem Handeln die Technologieführerschaft für unser Land erreichbar sein könnte. Ähnliches gilt für das Gewebe- und Zellpenetrationsverhalten von Labels. Die meisten Biomoleküle einer Zelle befinden sich in ihrem Inneren. Bislang ist uns ein effizienter Zugang zu solchen Markern bei der lebenden Zelle verwehrt. Um diese Moleküle für die biomedizinische Optik auch »in vivo« zugänglich zu machen, sind neue Konzepte zur Translokation von Labels in lebende Zellen dringend erforderlich.



Effiziente neue Lichtquellen, Detektoren und optische Systeme

LEDs und kompakte Halbleiterlaser bieten neuartige Möglichkeiten der Lichtintensitätssteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung von Wärme und Energieverbrauch. Diese langlebigen und kostengünstigen Beleuchtungselemente eröffnen neue Wege in der Medizintechnik.

Allerdings gibt es sowohl bei den Materialien als auch bei der Systemtechnologie und beim Management des Wärmehaushalts für diese neuen Lichtquellen noch einen erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen, ist neben der ständigen Verbesserung der Lichtausbeute auch eine möglichst effiziente, platzsparende und kostengünstige Ansteuerschaltung gefordert, die zwingend auf die Endapplikation angepasst sein muss. Gerade die ausgewählte Kombination aus verschiedenen, effizienten Lichtquellen könnte neue Möglichkeiten für innovative Anwendungen eröffnen.

Je effizienter und kompakter diese neuartigen Beleuchtungssysteme sind, desto leichter lassen sie sich in die medizinische Gerätetechnik integrieren. Hier hat sich in den letzten Jahren eine atemberaubende Entwicklung vollzogen, so dass diese neuartigen Beleuchtungssysteme, gerade auch für verschiedene medizinische Anwendungsfelder wie z.B. die Endoskopie oder die Mikroskopie, die Basistechnologie zu einer weiteren Miniaturisierung darstellen dürften und dadurch die Entwicklung von Systemen für neue medizinische Einsatzbereiche ermöglichen.

Durch die kontinuierliche Verbesserung optischer CMOS-Sensoren²⁴ wurde eine starke Alternative zur CCD-Technologie²⁵ etabliert. Getrieben durch den wachsenden Bedarf in der mobilen Kommunikation haben diese Sensoren eine starke Miniaturisierung erfahren. Dies eröffnet für die Funktionalität der Sensorik neue Horizonte

*Foto: Lebende Zellen in ihrer natürlichen Umgebung
© LMU München, BioImaging Zentrum (BIZ)*

(z.B. Hyperspektral- oder Nah-Infrarot-Sensoren). Die Kombination verschiedenster Sensoren mit peripherer Intelligenz ermöglicht den miniaturisierten Aufbau von Systemen mit hoher Spezifität.

Eine noch elegantere Art sparsam mit Licht umzugehen ist die Entwicklung hocheffizienter Detektoren. Neben der Erhöhung der Quantenausbeute, welche zur Zeit in vielen Spektralbereichen noch deutlich unter 50 % liegt, kann auch durch die Parallelschaltung von Einzeldetektoren in Form von Arrays sowie die Optimierung der photo-empfindlichen Detektionsfläche eine wesentliche Verbesserung erzielt werden.

Darüber hinaus wird die ganzheitliche, »holistische« Betrachtung und Simulation optischer Systeme erheblich dazu beitragen, in der Zukunft deutlich kompaktere, effizientere und preislich kompetitive Diagnostik »Made in Germany« zu realisieren. Ebenso ist zu erwarten, dass durch eine miniaturisierte Bauform etablierte optische Diagnoseverfahren (Mikroskopie, OCT, Raman, CARS) beispielsweise auch im Bereich der minimalinvasiven Endoskopie Einzug erhalten. Hierbei werden zukünftige Entwicklungen im Bereich der adaptiven Optik, der Freiformoptik so wie neuartige mikrooptische Komponenten und Baugruppen einen wesentlichen Beitrag leisten und somit ein zentrales Forschungsthema im Bereich der Optischen Technologien für Life Science und Gesundheit darstellen.

Bildverarbeitung, Informationsverarbeitung und -speicherung

Mittels Optischer Technologien gewonnene Daten werden aufgrund der weiteren Entwicklung der technologischen Möglichkeiten einerseits und aufgrund der durch sie adressierten applikativen Herausforderungen andererseits zunehmend komplexer. Hier versagen meist menschliche kognitive Prozesse, um aus diesen Daten Informationen zu erzeugen. Darüber hinaus verbietet manchmal der applikative Kontext eine menschliche Be-

²⁴ CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

²⁵ CCD: Charge-coupled Device

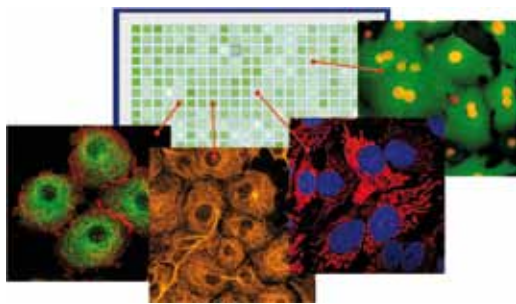


Foto: Automatisiertes Screening mit dem Auflösungsvermögen der konfokalen Mikroskopie bei einem Durchsatz von bis zu 100.000 Bildern pro 24 Stunden © Fraunhofer IME

wertung komplexer Daten, z.B. weil die dafür notwendige Zeit nicht vorhanden ist. Für die Nutzung der Optischen Technologien, insbesondere für den Bereich der Mikroskopie in den Life Sciences bedeutet dies, dass Wahrnehmungs- und Interpretationsmöglichkeiten der humanen Experten ergänzt und erweitert werden müssen.

Diese unterstützenden Systeme müssen in der Lage sein, eine extrem große Datenmenge in kürzester Zeit zu verarbeiten. Mehrere Sensoren können parallel unterschiedlichste Methoden zur Erkennung relevanter Informationen anwenden. Gerade im Bereich der Endoskopie ist es von zentraler Bedeutung, diese Sensoren vor Ort mit möglichst großer Funktionalität auszustatten, um die zu übertragende Datenmenge zum Visualisierungs- bzw. Expertensystem zu minimieren. Die Reduktion der Datenmenge ist umso wichtiger, wenn die Übertragung der Daten applikationsbedingt nur über eine drahtlose Verbindung geringer Bandbreite möglich ist.

Photonische Informationstechnologie und insbesondere deren Anwendungen im Life-Science Bereich entwickeln genau dann ein Fortschrittpotenzial, wenn sie an menschlichen Verarbeitungsprozessen anknüpfen können und diese im Sinne einer Enabling Technology erweitern. Dies bedeutet: Sichtbar machen, was der Mensch nicht mehr sehen oder überschauen kann und die Ergebnisse zu relevanten Informationen verdichten, um diese dann so zu präsentieren, dass der Betrachter möglichst intuitiv neue Einsichten gewinnen kann.

Für die technische Umsetzung spielt hier das Potenzial der neuen maschinellen Lern- und Bilderkennungsverfahren eine herausragende Rolle. Vereinfachend handelt es sich dabei um zwei Typen von Vorgehensweisen:

- Supervisiert, indem der humane Experte bestimmte Objekte markiert und die Maschine deren Merkmale erkennt und auf andere Anwendungsfälle generalisiert.
- Unsupervisiert, wobei die Maschine selbst potenziell relevante Klassifikationen erzeugt, die dem Menschen oft nicht wahrnehmbar aber bei intuitiver Präsentation leicht beurteilbar sind.

Die in diesem Zusammenhang zu erforschende Technologie muss im Sinn der Zielführung die beiden Subprozesse verbinden, also z.B. im Rahmen der Bilderkennung die relevanten maschinellen und humanen Einsichten aufeinander beziehen. Informationen und neue Einsichten finden in den Life Sciences dabei in unterschiedlichen Auflösungsebenen statt. Konkret bedeutet dies z.B. im Kontext onkologischer Forschung und Theragnostik, dass Bildmaterial, das hierarchisch Informationen auf den Ebenen Organ, Gewebe, Zelle, molekulare Prozesse enthält, ortskodiert ausgewertet werden muss. Allein die Vielzahl und Vielschichtigkeit der potenziell relevanten neuen Anhaltspunkte einer individualisierten Diagnostik ist vor diesem Hintergrund ohne maschinelle Unterstützung eine kognitive Überforderung.

Technisch leitet sich aus diesem Anforderungsprofil die Notwendigkeit eines Spektrums informationstechnischer Module rund um die avancierten Techniken der Bildgebung ab:

- hierarchische Datenhaltung
- realzeitfähige Interaktionsmöglichkeiten
- interaktive Explorationsmöglichkeiten in den ortskodiert repräsentierten Bilddaten unterschiedlicher Auflösungsmaßstäbe (Erfolgsmodell sind hierarchische graphische Interaktionssysteme, wie Google Maps)
- maschinelle Lern- und Klassifikationsverfahren auf den ortskodiert miteinander verbundenen Darstellungsebenen unterschiedlichen Auflösungsgrades (multilayered modelling)

Die System-Suite muss Steuerungs- und Bewertungsinstrument für die experimentellen Analysestufen sein. Die dafür notwendige Datenbank muss ortskoordiniert nicht nur die basalen Bilddaten, sondern dem zugeordnet auch das sich stetig erweiternde Wissen mitführen. Die dem Nutzer bereitgestellte Information auf der anderen Seite wird auf einer signifikanten, applikations-spezifischen Datenverdichtung und -reduktion basieren.

Neben der Entwicklung neuer IT-Tools (software-basierte und hardware-nahe Lösungen) wird dabei die applikationsgenaue Anpassung bekannter Technologien (wie Methoden der multivariaten Datenanalyse) eine zentrale Rolle spielen.

3.2.1.4

Rahmenbedingungen

Notwendig sind angepasste Forschungs- und Förderstrukturen, die der Komplexität und Interdisziplinarität der Aufgabenstellungen Rechnung tragen. Im Folgenden sind hierzu einige Ansatzpunkte genannt:

Durchgängige anwendungsorientierte Forschung

Nutzen und Anwendbarkeit neuer optisch-diagnostischer Verfahren für den Patienten lassen sich nur in klinischen Studien nachweisen. Die frühe Mitwirkung von Kliniken in Forschungsprojekten und die Förderung von »Proof of Concepts« bis zu klinischen Studien sind hier zu intensivieren. Oft findet eine Einbeziehung klinischer Partner nicht statt, weil die Vernetzung zwischen Hochschule, Industrie und Klinik nicht gegeben ist. Die Etablierung von Plattformen, auf denen sich die unterschiedlichen Gruppen zusammenfinden können (real durch Workshops und Veranstaltungen, oder virtuell durch Internet-gestützte Open-Innovation-Foren), kann dazu beitragen, dass sich Forschungsverbünde zusammenfinden, die entlang der gesamten Wertschöpfungskette eine parallele Entwicklung von Geräten und diagnostischen Verfahren erlauben. Natürlich verlängert sich die Dauer von Forschungsvorhaben, wenn diese am Ende mit klinisch validierten Ergebnissen abschließen,

aber nicht alle Partner haben von Anfang bis Ende einen gleichwichtigen Beitrag. Hier kann ein phasenbezogenes Modell in der Verbundforschung ansetzen, welches dieser Dynamik Rechnung trägt. Ein Verbundprojekt von fünf Jahren Dauer ließe sich in übergreifende Teilprojekte zu je zwei bis drei Jahren aufteilen, mit der Möglichkeit für die Partner, nach Abschluss der frühen Teilprojekte bereits erste kommerzielle Aktivitäten zu starten.

Flexibler Mitteleinsatz

Eine erfolgreiche Forschungsförderung muss flexibel in der Lage sein, auf wissenschaftliche Entwicklungen zu reagieren. Das heißt zeitnah, sobald diese entstehen, selbst wenn gerade keine entsprechende Förderinitiative dazu besteht.

Bei Ideen, die in der Grundlagenforschung entstehen, existiert meist noch keine Verwertungsstrategie, z.B. weil für potenzielle Industriepartner das Risiko der Vermarktung oder der Zeitraum bis zum Produkt noch nicht überschaubar ist. Für solche Forschungsvorhaben werden Förderinstrumente benötigt, welche zunächst das Risikokapital für einen »Proof of concept«, im Erfolgsfall aber zügig einen Informationstransfer für die weitere Kommerzialisierung ermöglichen. Hier könnte eine Zusammenarbeit von BMBF und BMWi/KfW zielführend gestaltet werden.

Regulatorische Rahmenbedingungen und Patentschutz

Die Erforschung und Entwicklung neuer diagnostischer und therapeutischer Lösungen wird wesentlich durch regulatorische Bedingungen bestimmt, die vor allem Forschungsgruppen und kleine Firmen behindern. Hervorzuheben sind hier zum einen die Zulassungsbedingungen für Studien und klinische Erprobungen, die zumindest in Phase 1 und 2 eher Forschungscharakter haben. Hier ist auch der Gesetzgeber gefragt, die Rahmenbedingungen attraktiver zu gestalten.

Ein solides Patentportfolio zum Schutz des geistigen Eigentums ist unabdingbar für die erfolgreiche Kommerzialisierung von Innovationen. Jedoch fehlt es im Falle der

Verletzung durch Dritte oft an den finanziellen Mitteln (insbesondere im Mittelstand) diesen Schutz dann auch durchzusetzen. Einrichtungen, die an dieser Stelle unterstützend tätig werden können (sowohl finanziell, als auch im rechtlichen Sinne), sind hier gefragt.

Unterstützung von Kompetenznetzen der Photonik

Industrie und Forschung setzen weiterhin auf die innovationsfördernden Strukturen, wie sie im Rahmen der Kompetenznetze Optische Technologien in den vergangenen Jahren entstanden sind und erfolgreich genutzt wurden. Rund 500 Unternehmen, Forschungs- und Bildungseinrichtungen der Photonik-Branche haben sich in diesen Netzwerken zusammengeschlossen. So werden unter dem Dach der regionalen Cluster gerade im stark interdisziplinären Gebiet der bildgebenden diagnostischen Verfahren gemeinsame Ziele formuliert und Initiativen kraftvoll verfolgt, wie sie vor allem von kleinen und mittelständischen Einzelunternehmen oder Forschungseinrichtungen allein nicht vorangetrieben werden könnten.

Tutorenmodell zwischen Industrie und KMU

Unter einem Tutorenmodell ist zu verstehen, dass sich Industrieunternehmen bereits während der Entwicklung der (komplexen und sehr teuren) Haupttechnologie Partnern aus KMU öffnen, um einen »gesamtheitlichen« Produktentwicklungsprozess zu realisieren.

Im Bereich der bildgebenden Diagnostik sind Produktentwicklungen basierend auf neuartigen Verfahren durch kleine und mittlere Unternehmen z.T. nur sehr schwer zu realisieren. Verfahren wie Magnetresonanztomographie (MRT), Röntgen-Computertomographie (CT) oder OCT erfordern in der Regel sehr hohe Investitionen um die Forschungsergebnisse in industrielle Produkte zu überführen. Da größere Industrieunternehmen, die in der Lage sind, technologische Innovationen dieser Größenordnung aufzunehmen und zur Produktreife zu bringen, zudem in der Regel zahlenmäßig sehr gering auftreten (im Vergleich zur Anzahl der KMU), ergibt sich

fast zwangsläufig eine starke Konzentration von Innovation innerhalb eines bestimmten technologischen Ansatzes auf wenige Industriebetriebe.

Erst in einem späteren Prozess können Entwicklungen von Komponenten und Zubehör, kundenspezifische Anpassungen, Optimierungen von Teilaspekten des Systems oder kostenreduzierende Varianten von KMU umgesetzt werden und somit auch im Mittelstand Wachstum generieren. Die großen Industriebetriebe wiederum können nicht die gesamte »Beitechnologie« bzw. eine technologische Infrastruktur zeitgleich mit entwickeln. Erst das Zusammenspiel von »groß und klein« erlaubt die Durchdringung eines Marktes mit neuen Technologien, indem bereits in der Vorentwicklung die Weichen gestellt werden, um eine umfassende Markteinführung all derjenigen Komponenten vorzubereiten, die erst nach der technologischen Hauptkomponente entwickelt werden können.

3.2.2

Therapie und Medizinprodukte

Optische Technologien sind heute überall in unserem Alltag anzutreffen und auch in der Medizin unverzichtbar. Die Medizintechnik bietet für die Diagnostik und Therapie zahlreiche photonische Konzepte.

Deutsche Medizintechnik ist weltweit gut aufgestellt. Bei den Optischen Technologien für die Medizintechnik liegt Deutschland hinter den USA auf dem zweiten Platz – mit einem Marktanteil von 15 % und einer Exportquote von knapp 75 %. Die Optischen Technologien für Medizin und Lebenswissenschaften gehören zu den umsatzstärksten Segmenten des deutschen Photonik-Marktes. Es gilt, diese Position zu behaupten und auszubauen. Innovationen sind dafür zwingend erforderlich. In einer immer älter werdenden Gesellschaft mit immer mehr chronisch Kranken werden sich zukünftig neue Bedürfnisse ergeben (z.B. personalisierte Medizin), neue Märkte öffnen (z.B. HomeCare) und neue Medikamente und Therapien werden entstehen.



Foto: OP-Mikroskop beim Einsatz in der Neurochirurgie © Carl Zeiss AG



Neben Krebs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen verursachen chronische Erkrankungen und symptomatische und palliative Therapien den Hauptteil der Aufwendungen im Gesundheitswesen. Ziel muss es deshalb sein, möglichst zügig effektive (d.h. wirksame und kostengünstige) Therapien für diese Erkrankungen zu schaffen. Eine längerfristige Perspektive ist eine präventive Medizin, die bereits durch Früherkennung und selektive und schonende Therapien eher modulierend als destruierend eingreift und die Gesundheit erhält, statt die Erkrankung zu heilen oder zu lindern.

Das Ziel, photonische Technologien in Therapie und Medizinprodukten einzusetzen, ist kein Selbstzweck sondern folgt übergeordneten Kriterien, die sich in den letzten Jahren gewandelt haben. Das primäre Ziel dabei ist es zu heilen, die Gesundheit und Körperfunktionen des Menschen zu erhalten oder wiederherzustellen und seine Lebensqualität zu steigern. Dies erfolgt u. a. durch klinische oder chirurgisch therapeutische Maßnahmen. Dabei sollen Wunden schnell und komplikationslos heilen und Schmerzen minimiert werden. Sofern ein Zugang in das Körperinnere erfolgen muss, soll dieser Zugang so sanft wie möglich erfolgen (sanfte Chirurgie). Optische Verfahren bieten hierfür hervorragende Möglichkeiten z.B. durch die Verknüpfung von in situ-Diagnostik und Therapieverfahren (Theragnostik). Es gilt die Chancen dieser photonischen Verfahren zu nutzen und deren Möglichkeiten auszubauen.

Wichtige Trends und Forschungsfelder im Bereich biophotonischer Therapieverfahren sind:

- Verschmelzung von Diagnose und Therapie; neue OP-Techniken, optische Biopsie, optische Gewebedifferenzierung, die mit der Histologie korreliert
- Endoskopie und minimalinvasive Chirurgie
- Funktionsmodulation von Zellen, Zellverbänden, Geweben; entzündliche Erkrankungen, regenerative Therapie, Wundheilung

- Plasmamedizin; Oberflächenfunktionalisierung, Drug-Release-Systeme, Dekontamination und Sterilisation

- Sanfte Chirurgie

Forschungsanstrengungen in diesen Bereichen können große Fortschritte für biophotonische Verfahren insgesamt bewirken und besitzen daher eine besondere Hebelwirkung, verbunden mit der Perspektive einer präventiven, individualisierten Medizin. Gleichzeitig sind die Herausforderungen in diesen Bereichen exemplarisch für weite Bereiche des Forschungsfeldes Biophotonik insgesamt. Dabei sind die genannten Schwerpunkte eng miteinander verknüpft. So besitzt z.B. die Endoskopie große Bedeutung für die Kombination von Diagnose- und Therapieverfahren und die künftige Entwicklung der minimalinvasiven Chirurgie.

3.2.2.1

Verschmelzung von Diagnose und Therapie

Die optisch-medizinischen Entwicklungen der letzten Jahre waren mehrheitlich diagnostisch orientiert. Parallel entstanden Verfahren zur Prozesskontrolle. Auf der therapeutischen Seite stehen Verfahren zur photothermischen und photochemischen Destruktion oder zur Exzision von Gewebe zur Verfügung oder befinden sich gegenwärtig in der Entwicklung. Die Zusammenführung von Diagnose und Therapie ist nun der nächste konsequente Schritt. Nebenwirkungen und Risiken könnten so verringert werden (weniger Eingriffe, Gewebeschonung, kürzere OP-Zeiten). Bei rekonstruktiven Verfahren (z.B. in Orthopädie, Zahnheilkunde, plastische Chirurgie und Kardiologie) ermöglicht die Online-Gewebedetektion und -identifikation eine zielgerichtete OP-Führung und reduziert die Häufigkeit von Zwischenfällen (z.B. versehentliche Gewebep perforation). Als technologischer Vorteil photonischer Verfahren ist hierbei auch die



Foto links: Augen-Laserbehandlung
© TECHNOLAS PERFECT VISION GmbH

Foto rechts: Endoskopischer Eingriff am Herz
© Prof. Lichtenberg, Uniklinikum Jena

Möglichkeit eines breiten Einsatzes endoskopischer Methoden zu sehen.

Zurzeit verlaufen Diagnose und Therapie in der Patientenbehandlung noch relativ parallel nebeneinander und sind nicht ausreichend verzahnt. Auch die Förderung der Forschung erscheint in zwei Strängen vollzogen zu werden. Hier können Strukturen künftig effizienter gestaltet werden. Die photonischen Technologien bieten dafür ein großes Potenzial: bildgestützte Navigation, rückgekoppelte Verfahren zur Therapiesteuerung (Ausführung und Kontrolle), Erzeugung der Diagnosestrahlung mit Hilfe der Therapieeinrichtung oder auch intraoperative optische Biopsieverfahren zur Optimierung und Minimierung invasiver Eingriffe sind Lösungsansätze, die in den nächsten Jahren vorangetrieben werden müssen. Die Gesamtkonzepte sollen dabei Therapiekontrolle, Qualitätssicherung und eine Kostenoptimierung vereinen. Die Evaluation bedarf geeigneter Strukturen.

Die Herausforderungen für die nächste Dekade im Hinblick auf die Zusammenführung photonischer Verfahren für Diagnose und Therapie umfassen u. a. die folgenden Themenkomplexe:

- Identifizierung und Optimierung geeigneter diagnostisch verwertbarer Verfahren für rückgekoppelte bzw. automatisierte Lasersysteme zur Therapie (fasergestützt und bildgebend; optische Kohärenztomographie, Spektroskopie, Photoakustik, Fusionsbilder)
- Dreidimensionale Darstellung der OP-Region mit Strukturen und Dynamik als Basis für eine gesicherte möglichst automatisierte Therapie (bildgestützte Navigation, online Tracking, automatisierte Positionierverfahren, Bildregistrierung, Vernetzung von Geräten im OP, Augmented Reality)

- Multiplex-Diagnostik (Kombination von Mustersignaturen statt einzelner Marker); Kombination mit endoskopischen Verfahren; Visualisierung mittels miniaturisierter Kameras in Bearbeitungswerkzeugen

- Optimierung ultrakurz gepulster Laser in der Wechselwirkung mit Gewebe

- Kontrolle der Resektions- bzw. Destruktionsgrenzen während der Operation durch Feedback-Systeme hinsichtlich einer »optischen Biopsie« und zum Schutz benachbarter Strukturen vor Kollateralschäden

Chairside-Systeme oder intraoperativ einsetzbare integrierte Verfahren stellen bislang noch eine Ausnahme dar. Um hier Marktpotenziale zu erschließen, müssen die Partner aus Industrie und Forschung in enger Kooperation neue Verfahren erarbeiten. Ein Beispiel ist die Entfernung von Karies im zahnmedizinischen Bereich. Bis heute ist eine Kombination aus Therapie und Diagnose nicht gelöst, so dass Über- oder Untertherapien eher die Regel als die Ausnahme sind. Auch für neuartige Ideen, wie den Schutz des Nervenkanals während der Setzung der Implantatbohrung, bieten photonische Technologien vielversprechende Lösungsansätze.

Unterstützende Technologien z.B. für die Bildverarbeitung müssen dabei berücksichtigt werden. Für eine durch Diagnose rückgekoppelte Therapie werden in vielen Einsatzfeldern neue Wege und Algorithmen auf diesem Themengebiet notwendig sein. Dabei schließen die Optischen Technologien eine kompetente pathologische Beratung durch Nutzung der Telemedizin mit ein (telemedizinische Verknüpfung von Operateur und Pathologen).

Die Verschmelzung von Diagnostik und Therapie bei photonischen Applikationen in Medizin und Zahnheilkunde bietet eine Möglichkeit zur signifikanten Ressourcenschonung im Rahmen der Patientenbetreuung bzw. -therapie. Die exzellente Grundlagenforschung in diesem Gebiet und die vorhandene technologische Basis bieten eine hervorragende Ausgangssituation für die Etablierung eines neuen Technologiefeldes in Deutschland.

3.2.2.2

Endoskopie und minimalinvasive Chirurgie

Endoskopie und minimalinvasive Chirurgie haben sich heute zu einer festen Größe im diagnostischen und therapeutischen Spektrum entwickelt und sind ein erfolgreiches Beispiel, wie die beiden Ziele – sichere Diagnostik und effiziente Therapie – miteinander verknüpft werden können. Das Zugangstrauma ist reduziert, im Körperinneren bestehen Interventionsmöglichkeiten, die durch photonische Ansätze noch vielfältig ausgebaut werden können.

Neben der ständigen Miniaturisierung ist die hervorragende Bildqualität endoskopischer Systeme einer der Erfolgsfaktoren. Die Einführung hochauflösender Sensorsysteme hat eine Verzehnfachung der Bildinformation mit sich gebracht. Dabei leitet das endoskopische Bild meist auch den therapeutischen Vorgang. Ein zunehmender Trend in Forschung und Entwicklung ist die optische Früherkennung, um z.B. Tumorbefunde zu lokalisieren und therapieren zu können. Hier sind leistungsfähige optische Diagnosemethoden verfügbar, die über Glasfasersysteme in Endoskope integriert werden können.

Für den therapeutischen Aspekt ist die Vision des schmerzfreien Operierens ein weit gestecktes, ambitioniertes Ziel. So beschreibt die Initiative zu NOTES (natural orifice transluminal endoscopic surgery) den endoskopischen Zugang über natürliche Körperöffnungen, um dann über einen Schnitt in die Organwand in die Bauchhöhle zu gelangen. Diese Zugänge verheilen weitgehend schmerzfrei. Die Zugangswege werden allerdings länger, was an das optische System und die Operationstechnik künftig neue Herausforderungen stellt. Hier bietet die Laser- und Plasmatechnologie Alleinstellungsmerkmale, die für die endoskopisch geführte OP neue Möglichkeiten eröffnen. Laser zum Schneiden und zum Koagulieren von Gewebe, zur Lithotripsie oder zum Einsatz mit der photodynamischen Therapie besitzen hier

auch ein großes wirtschaftliches Potenzial, weil durch die anspruchsvollere Anwendung auch anspruchsvollere Instrumente akzeptiert werden. Die Erforschung und Entwicklung anwendungsnaher Systeme wird als sehr erfolgversprechend für deutsche Medizintechnik-Unternehmen erachtet.

3.2.2.3

Funktionsmodulation von Zellen und Zellverbänden

Die Prävalenz der entzündlichen Erkrankungen (Rheuma, chronisch entzündliche Darmerkrankungen etc.) ist hoch und die chronisch degenerativen Erkrankungen nehmen mit zunehmendem Alter der Bevölkerung noch weiter zu. Die Wundheilung bietet sowohl nach akutem Trauma als auch bei chronischen Wunden großes Innovationspotenzial für photonische Produkte und Verfahren, verbunden mit großen weltweiten Marktchancen. Für eine beschleunigte Rehabilitation und Prävention wird zukünftig ebenfalls ein größerer Markt entstehen. Für beide Erkrankungskomplexe werden neben Anwendungen in Kliniken und Praxen auch HomeCare-Konzepte zum Tragen kommen.

Eine nicht-chemische antimikrobielle Therapie mit Lasern oder Plasmen könnte im Zeitalter multiresistenter Keime eine hohe Bedeutung in der Wundbehandlung erlangen. Sowohl technische als auch biologische Materialien (Implantate, Haut, Wunden, Zähne) könnten bearbeitet und sterilisiert oder desinfiziert werden. In der Laser- und Plasmatechnologie ist aktuell eine hohe Dynamik in den technischen Entwicklungen zu verzeichnen, mit denen – entsprechende Anstrengungen in Forschung und Entwicklung vorausgesetzt – neue therapeutische Anwendungen im Bereich der Zellmanipulation erschlossen werden können.

Ein wichtiger Trend in der medizinischen Therapie ist die instrumentelle Nutzung der Flexibilität des Lichtes hinsichtlich Dosis, Fokussierung und Zeit, z.B. in Form optisch aktiver Pflaster (photodynamische Therapie,

Langzeittherapie, HomeCare) oder ultrakurz gepulster Minilaser zur Zellmanipulation. Dabei müssen künftig verstärkt autonome Systeme (z.B. Kapseln) zur optisch gestützten Diagnostik und Therapie für unzugängliche Organe (z.B. bei Darmerkrankungen) adressiert werden. Therapiesysteme bauen dabei auf entsprechenden Entwicklungen in der Photon-gestützten Diagnostik auf (z.B. Lab-on-a-Chip-Systeme).

Die folgenden Ansätze für Verfahren und Therapie-konzepte sind bzgl. zu erwartender Fortschritte in der nächsten Dekade besonders vielversprechend. Hier müssen die Partner in Deutschland aus Forschung und Industrie neue Entwicklungen vorantreiben, um ihre führende Position bei den biophotonischen Verfahren international zu behaupten.

- Multimodale Therapien (Kombination verschiedener Therapien); photochemisch, photothermisch, abtragend, perforierend
- Multiskalen-Techniken (Kombination verschiedener Technologien); Laser, Radiofrequenz, Terahertz, Plasma
- Photodynamische Verfahren; optimierte Photosensibilisatoren, Nutzung von Nanostrukturen, Optimierung von Dosimetrie- und Applikationskonzepten
- Tissue Engineering; Verknüpfung von Biotechnologie und Laser- oder Plasmamanipulation für Zellmodifikation, -regeneration, -steuerung; Gewebefusion (Kleben statt Nähen) für die endoskopische Chirurgie

Um die genannten Handlungsfelder erfolgreich zu erschließen, müssen in den nächsten Jahren verstärkt Anstrengungen im Bereich der Grundlagenforschung zu den Wechselwirkungen von Licht und Gewebe sowie Zusatzstoffen unternommen werden. Ein besonderer Fokus muss dabei in der Erforschung vitaler Gewebe liegen.

Im Bereich der Laser- und Plasmatherapie ist eine Standardisierung für die Qualitätssicherung und Aussagekraft der Effekte, die Laser- und Plasmageräte auf Gewebe erzeugen, zu erarbeiten. Hierzu müssen auf der Basis fundierter Gewebemodelle Standardprozeduren zum Vergleich der Wechselwirkung von Licht mit Gewebe und zum Vergleich unterschiedlicher laser- und plasmabasierter Therapieansätze entwickelt werden (u. a. im Hinblick auf die medizinischen Zulassungsverfahren).

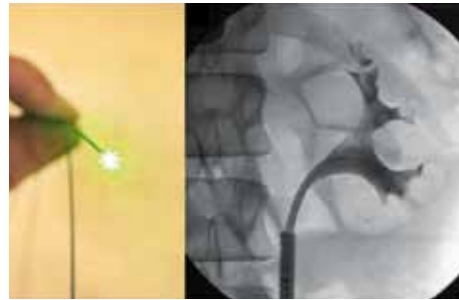
Für alle genannten Verfahren und Therapieansätze sind klinische Begleitstudien zur Entwicklung, Validierung und Qualitätssicherung für künftige Medizinprodukte erforderlich.

3.2.2.4

Plasmamedizin

Im Bereich Therapie und Medizinprodukte eröffnet die Plasmatechnologie innovative und nachhaltige Ansätze, die zu einem Paradigmenwechsel hin zu einer präventiven, individualisierten Medizin beitragen. Dabei kommen Verfahren wie z.B. die Plasma-Oberflächenmodifizierung und die Plasmasterilisation und -dekontamination zur Anwendung.

Neue, gezielte und schonende Therapien vor allem bei der Wundheilung, der Therapie entzündlicher und/oder infektiöser Erkrankungen von Haut und Schleimhaut sowie in der Krebsbehandlung werden durch die Plasmamedizin möglich. Neben diversen klinischen Anwendungen sind auch Medizinprodukte für spezielle Anwendungen im HomeCare-Bereich realisierbar. Durch Plasma-Oberflächenfunktionalisierung können (Bio-) Interfaces geschaffen werden, die als funktionale und/oder antimikrobiell wirksame Oberflächen etwa von Implantaten, Stents und Kathetern wirken. Diese Biointerfaces können im Rahmen regenerativer Therapien die selektive und kontrollierte Kultivierung bzw. Anhaftung von Körperzellen, die Prävention von implantat- oder katheterassoziierten Infektionen oder die kontrollierte Freisetzung von Wirkstoffen (Drug-Release) ermöglichen.



Auf dem Gebiet der Dekontamination und Sterilisierung eröffnet die Plasmatechnologie neue Möglichkeiten der schonenden Aufbereitung von (wiederverwendbaren) Medizinprodukten. Die schnelle und zuverlässige Vor-Ort-Desinfektion von Instrumenten, Geräten und Oberflächen einschließlich Körperoberflächen eröffnet Wege zur effektiven Infektionsprävention im Rahmen therapeutischer Prozesse (z.B. vor und während Operationen). Die plasmabasierte Erzeugung antimikrobieller Oberflächen ermöglicht neue Methodiken der Aufbereitung von Medizinprodukten. Plasmaverfahren können Schutzschichten auf Medizinprodukte aufbringen, wodurch deren Zyklenfestigkeit in der Aufbereitung z.B. gegenüber alkalischen Reinigungsmitteln deutlich erhöht wird.

Die Plasmamedizin hat in den letzten Jahren eine dynamische Entwicklung vollzogen. Funktionsnachweise wurden für zahlreiche Wirkprinzipien und Verfahren erbracht. Im Verbund von Industrie und Forschung müssen nun innovatorische Schritte vorangetrieben werden, um entsprechende Potenziale in Marktpositionen umzusetzen. Dazu müssen plasmatechnische Verfahren in enger Kooperation mit forschenden Kliniken umgesetzt werden.

3.2.2.5

Rahmenbedingungen

Therapie und Medizinprodukte müssen nicht nur dem Patienten sondern auch, und das ist eine wesentliche Randbedingung, dem Leistungserbringer nützen, und zwar in zweifacher Hinsicht: medizinisch und ökonomisch. Das Medizinprodukt muss dem Krankenhaus oder Arzt dazu dienen, den Gesundheitszustand des Patienten zu verbessern. Leistungen im Gesundheitswesen werden aber zunehmend durch ökonomische Randbedingungen definiert. Dabei sind für die Anbieter innovativer Verfahren die folgenden Rahmenbedingungen zu beachten.

Foto: Laserlithotripsie zur Behandlung von Nierensteinen: Via endoskopisch eingeführtem Lichtleiter wird der Nierenstein mit dem Laserstrahl zertrümmert © Medizinisches Laserzentrum Lübeck (Foto: S. Lahme)

Zulassung von Medizinprodukten

Die Zulassung von Medizinprodukten wird immer mehr an die Zulassung von Arzneimitteln herangeführt, was in vielen Fällen nicht sachgerecht ist, Zeitaufwand und Kosten deutlich erhöht. Das Medizinproduktegesetz (MPG) und das Gesetz zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NiSG) definieren neue Anforderungen für die Evaluation medizintechnischer Verfahren. Diese müssen in den Strukturen der Forschungsförderung abgebildet werden.

Zahlreiche geeignete Verfahren und Instrumente sind im Stadium von Demonstratoren vorhanden, aber nur unter Laborbedingungen geprüft. Es fehlen die Übertragung in die Klinik und die hierfür erforderlichen wissenschaftlichen und finanziellen Strukturen.

Förderung der klinischen Forschung

Medizintechnische Forschung sollte analog pharmakologischer Forschung breiter ansetzen, z.B. könnten Teams aus Medizinern und Technikern und Schwestern (Studienleitung, study-nurse) die Untersuchungen zur Evaluation, Validierung und Qualitätssicherung in den Versorgungszentren begleiten und eine optimierte Datenintegration realisieren. Hierzu sind Forschungseinrichtungen, Industrie und Kliniken zu verknüpfen und auch innerhalb der nicht-universitären Kliniken entsprechende Strukturen zu schaffen. Beispielsweise können hierzu stärkere experimentelle Abteilungen, wie Experimentelle Ophthalmologie, Experimentelle Radiologie etc., an den jeweiligen Kliniken eine hervorragende Mittlerrolle zwischen Technologie, Naturwissenschaft und klinischer Anwendung spielen.

Gerade die Erprobung neuer, oftmals mit interdisziplinären Ansätzen verknüpfter, biophotonischer Therapieverfahren verlangt zudem eine Verbesserung der Qualitätssicherung in der Ausbildung von Studenten, Ärzten



*Foto links: Optisches Hauscreening zur Früherkennung von Hautkrebs
© LTB Berlin GmbH*

*Foto rechts: Therapeutische Anwendung von kalten Atmosphären-
druckplasmen zur Behandlung von Hauterkrankungen und Wunden
© INP Greifswald/Manuela Glawe*

und OP-Personal in Kombination mit Expertise-Training in Kooperation zwischen Universitäten und Verbänden. Eine schnellere Verbreitung neuer Techniken könnte durch medizinische Schulungszentren erreicht werden. Hierzu sind neue Modelle notwendig: Kooperation von staatlicher und industrieller Förderung und die Integration in existierende Ausbildungsgänge wie die der Deutschen Gesellschaft für Lasermedizin (DGLM) oder der Deutschen Dermatologischen Lasergesellschaft (DALM).

Die Erstellung von Prototypen oder Kleinserien neuer Instrumente ist im Allgemeinen kostspielig und auch für große Unternehmen nicht immer problemlos darstellbar. Für die Kliniken, die ohnehin unter einem bisher nicht gekannten wirtschaftlichen Druck stehen, sind solche Geräte zumeist nicht finanzierbar, solange keine Abbildung in den Vergütungssystemen besteht. Die Vergütung eines innovativen Verfahrens ist aber (sinnvoll) an den Wirksamkeitsnachweis gebunden. Dies bedeutet, dass die qualifizierte klinische Erprobung unter Einsatzbedingungen ein essentieller Teil des Entwicklungsprozesses ist.

Die Erforschung neuer Technologien und die Identifizierung neuer klinischer Anwendungsgebiete reichen nicht, um die Forschungsergebnisse auf den Markt zu bringen. Die klinische Erprobung sollte mit in den Fokus der Förderpolitik eingeschlossen werden, um den finalen Nutzen besser darstellen zu können und den enormen Aufwand klinischer Studien abzufedern. Dies ist bisher nur ungenügend der Fall.

Anschubfinanzierung

Zahlreiche Entwicklungen biophotonischer Verfahren gehen in Deutschland von den wissenschaftlichen Instituten in Kooperation mit kleinen und mittleren Unternehmen aus, die eine klinische Prüfung im jetzt ge-

forderten Ausmaß zumeist nicht darstellen können. So scheitert gerade in den Zeiten, in denen auch deutsche Hersteller von Medizinprodukten von externen Finanzinvestoren abhängig sind, die Entwicklung von an sich marktfähigen Produkten daran, dass der Return-of-Invest nicht innerhalb einer geforderten kurzen Zeit erfolgen kann, weil sich eine Methode zunächst am Markt etablieren muss. Eine geförderte Anschubfinanzierung (Investitionskosten für klinische Prototypen bei den Medizintechnik-Unternehmen, Personal- und Sachkosten bei den beteiligten Kliniken) könnte hier für viele Medizinprodukte verbesserte Marktchancen eröffnen und Innovationen in Deutschland vorantreiben. Für bereits erfolgreich eingeführte Geräte oder Verfahren sollten bei der Übertragung auf andere Fachgebiete erleichterte Regeln geschaffen werden.

Bei der Überwindung der »Innovations-Markteintritts-Barriere« könnten zudem geeignete Finanzierungsinstrumente helfen. Als ein erfolgreiches Beispiel eines öffentlichen Förderinstrumentes aus der jüngeren Vergangenheit sei auf das frühere KfW-Innovationskreditprogramm verwiesen, das eine Finanzierung mit quotaler Haftungsfreistellung bot. Ein ähnliches Programm könnte gerade kleinen und mittleren Unternehmen sehr helfen, die Innovations-Markteintritts-Barriere zu überwinden.

Infrastruktur

Eine kommunikative IT-Infrastruktur für HomeCare sollte systematisch aufgebaut werden (Fernüberwachung der Daten von Patienten, die am Arbeitsplatz, zu Hause oder im Pflegeheim sind). Datensicherheit ist dabei als wichtiger Punkt zu garantieren. Dabei sollten von öffentlicher Seite die Übertragungswege samt Schnittstellen zu Geräten sowie die Datensicherheit bereitgestellt werden. Die Endgeräte (Patientensensoren, Body Network etc.) sind Aufgabe der Industrie.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Nutzung neuer Medien zur Verbesserung der Versorgung in Regionen geringer Bevölkerungsdichte (»ländlicher Raum«).

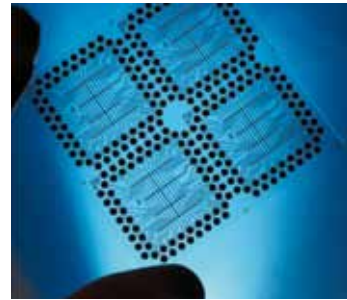


Foto: Elektro-optischer Biochip zur Untersuchung von Biomolekülen wie DNA oder Proteinen © IPHT Jena

Hier könnte z.B. die Hauptstadtregion (Berlin und Brandenburg) als Modellraum dienen, da sie von städtischer hochverdichteter Einwohnerstruktur bis zu dünn besiedelten Randgebieten alle Strukturkategorien aufweist.

Mittelfristig gehören zudem die Nachwuchsgewinnung und ein effektiver Schutz des geistigen Eigentums durch Grundlagenpatente zu den Herausforderungen. Maßnahmen zur Steigerung der Motivation des wissenschaftlichen Nachwuchses in Deutschland zu forschen und eine patentrechtliche Begleitung werden als wichtig erachtet.

Für die Erforschung und Entwicklung neuer photonischer Technologien für Therapie und Medizinprodukte sind die mittelständisch geprägte Medizintechnikindustrie und die technischen und klinischen Institute gut aufgestellt. Die forschenden Unternehmen der Medizintechnik sind auch in Zukunft auf starke Partner auf Seiten der Kliniken angewiesen und auf deren Möglichkeiten, sich im Bereich Forschung und klinische Studien entsprechend zu engagieren.

3.2.3

Analytische Verfahren

Analytische Verfahren spielen eine große Rolle in vielen Gebieten der Produktion und des täglichen Lebens wie Gesundheit, Wellness, Pharmazeutik, Medizintechnik, Biotechnologie, Lebensmittelüberwachung und -qualität sowie Umwelt. Speziell auf dem Gebiet der Gesundheit und Ernährung sind in den nächsten Jahren drastische Entwicklungen absehbar, die entsprechendes Handeln unabdingbar machen. Beispiele wie die dramatische Zunahme von Allergien in der Bevölkerung, die in Europa erkannte weltweite Fehlprognose zur allgemeinen Chemikaliengiftigkeit und die verheerenden Fehleinschätzungen von Arzneimittelrisiken wie VIOXX und TGN 1248 haben uns vor Augen geführt, dass der Menschheit bisher keine adäquaten Verfahren zur Vorhersage bzw. Interpretation komplexer Wechselwir-

kungen synthetischer und natürlicher Substanzen (z.B. Schadstoffe, Wirkstoffe, Mikroorganismen etc.) mit dem menschlichen Organismus in seinem typischen Umfeld und seiner genotypischen Individualausprägung zur Verfügung stehen. Die einzige Möglichkeit, die komplexen Wechselwirkungen zwischen der Zielsubstanz und dem menschlichen Organismus auch auf zellulärer Ebene zu untersuchen, bieten photonische Analyseverfahren. Mit bisher nie dagewesener räumlicher und zeitlicher Auflösung lassen sich Vorgänge untersuchen und verstehen, deren Existenz bisher nicht einmal bekannt war.

Entwicklung des Bedarfs im Gesundheitssektor

Der demografische Wandel wird außerordentlich starke Folgen für das deutsche Gesundheitssystem haben. Gemäß einer Studie des Kieler Fritz-Beske-Instituts wird sich bis zum Jahr 2045 der Anteil der über 80jährigen in der deutschen Bevölkerung im Vergleich zum Jahr 2000 verdreifachen. Dabei schrumpft gleichzeitig der Anteil der unter 20jährigen auf nahezu die Hälfte. Die Konsequenzen dieser Entwicklung sind offensichtlich. Altersbedingte Krankheiten werden stark zunehmen; laut der Studie wird sich die Zahl der Demenzerkrankten relativ zur deutschen Gesamtbevölkerung bis zum Jahr 2050 mehr als verdoppeln. Analoges gilt für die Anzahl von Herzinfarkten und Schlaganfällen. Der Anstieg der Erkrankungen sowie der relative und absolute Abfall der Anzahl Erwerbsfähiger werden dazu führen, dass sich die Leistungsausgaben im deutschen Gesundheitssystem pro Einwohner im erwerbsfähigen Alter mehr als verdreifachen.

Diese Entwicklung lässt sich nur stoppen oder gar umkehren, wenn Durchbrüche hin zu kostengünstigen, teils auch ohne einen Arzt vor Ort einzusetzenden medizinischen Verfahren gelingen. Analytische Verfahren zur Kontrolle des Gesundheitszustands, für Vorsorgeuntersuchungen, Therapiekontrolle und Nachsorge sind dafür eine Grundvoraussetzung. Hier bietet die Photonik schon heute ein breites Spektrum vielversprechender



Foto links: Analytische Luftüberwachung in Reinräumen zur Medikamentenherstellung © Bayer Schering AG

Foto rechts: Zukunftsvision: Das Smartphone als Gesundheitsmonitor? © IPHT Jena (Fotomontage)

Lösungsansätze vom Mikrospektrometer bis zur Nano-lichtquelle. In Zukunft werden diese photonischen Technologien u. a. die Grundlage für implantierbare Mikrolabore liefern, welche kontinuierlich alle wichtigen Daten über den Gesundheitszustand insbesondere älterer Menschen liefern können und so eine umfassende und bezahlbare medizinische Versorgung möglich machen.

Entwicklung des Bedarfs bei Nahrungs- und Genussmitteln

Die Nahrungs- und Genussmittelindustrie weist im Vergleich zur chemischen und pharmazeutischen Industrie sowie zu anderen Branchen des produzierenden Gewerbes einen geringen Automatisierungsgrad auf. Es ist somit davon auszugehen, dass sich aufgrund von Kostendruck und Qualitätssicherung die Nahrungs- und Genussmittelindustrie für die Automatisierungsbranche zu einem wichtigen Zukunftsmarkt entwickeln wird. Laut der 2006 erschienenen Studie »Integrierte Technologie-Roadmap AUTOMATION 2015+« des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) und des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) werden folgende Automatisierungsbedarfe für die Zukunft gesehen:

- Rationalisierung noch nicht automatisierter Prozesse
- Proaktives Prozess- und Qualitätsmanagement – Integration der Qualitätssicherung in die Produktion und Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit
- Tracking und Tracing – Erhöhung der Lebensmittelsicherheit und Verringerung des Lebensmittelverderbs

Ein weiterer Trend ist die Integration pharmazeutischer Wirkstoffe in Lebensmittel. Den optischen Lösungen und hier insbesondere den spektroskopischen Analyseverfahren wird dabei eine wichtige Rolle zukommen, da sie eine berührungslose, zerstörungsfreie und Online-

Kontrolle kritischer Prozess- und Verfahrensparameter ermöglichen. Damit können sie einen wesentlichen Beitrag zu Prozesseffizienz und Qualitätssicherung leisten.

Weitere Herausforderungen ergeben sich bei der Entwicklung von Sensoren für die Detektion von Mikroorganismen, der Entwicklung von Lösungen für die Reinigungsoptimierung sowie für drahtlose Sensornetze. Darüber hinaus ist bei Lebensmitteln in der Prozessgestaltung die Aroma- und Geschmackskomposition bzw. Wahrnehmungsinteraktion von großem auch industriellem Interesse. Schon heute können viele der auftretenden Fragestellungen mit optisch gestützten Sensorverfahren beantwortet werden. Durch den Einsatz von Photonen als Präzisionssensoren lassen sich fast alle wichtigen Parameter bei der Lebensmittelherstellung nicht invasiv und flexibel ermitteln.

Entwicklung des Bedarfs in der Umwelttechnik

Durch die zunehmende Industrialisierung einerseits und die steigenden Anforderungen an den Umweltschutz andererseits wird der Bedarf an empfindlichen Nachweismethoden für chemische und biologische Kontaminationen in Gasen und Flüssigkeiten weiter zunehmen.

Neue analytische Verfahren müssen einfach zu implementieren und zu nutzen sein, eine hohe Empfindlichkeit und Messsicherheit aufweisen. Hier sind vor allem Methoden notwendig, die direkt vor Ort und permanent eingesetzt werden können. So kann auch eine Steuerung von Verfahren zur chemisch-biologischen Dekontamination erfolgen. Plasmaverfahren zur Abluft- und Wasserreinigung und photonische Prozesse bieten dazu gute Voraussetzungen.

3.2.3.1

Die deutsche Position

Auf dem Gebiet »Analytische Verfahren« hat Deutschland bereits eine Spitzenposition inne und gute Chancen diese Spitzenposition nicht nur zu behalten, sondern weiter auszubauen, falls die richtige Weichenstellung erfolgt. Generell ist der Vernetzungsgrad auf diesem

Gebiet bereits gut. Die Kooperation speziell zwischen den Unternehmen könnte allerdings noch verbessert werden, um anwendungsorientierte Entwicklungen voranzutreiben. Für den Standort Deutschland spricht, dass die gesamte Wertschöpfungskette vorhanden ist und die optische Industrie im Bereich der Analytik einen Schwerpunkt in Deutschland einnimmt. Generell sind eine gute Infrastruktur und Forschungslandschaft auf dem Gebiet vorhanden.

Jedoch bereitet der Transfer von Forschungsergebnissen in Produkte Schwierigkeiten. Ursächlich hierfür ist u. a. das Fehlen von Finanzierungsinstrumenten wie z.B. Venture Capital für frühe Phasen oder Transferförderung, was auch durch die Beschaffung von Finanzmitteln auf dem Kapitalmarkt nicht ausgeglichen werden kann. Zu bemängeln ist weiterhin der Abbau der Lehrstühle für Analytik und die daraus resultierenden Defizite in der analytischen Ausbildung.

3.2.3.2

Anforderungen an Prozess- und Vor-Ort-Analytik

Analytische Verfahren unterteilen sich in Verfahren für die Prozess- und Vor-Ort-Analytik. Bei der Prozessanalytik geht es um die kontinuierliche Kontrolle kritischer Parameter während der Fertigung zur Gewährleistung einer konstanten Produktqualität in sicheren, umweltverträglichen und kostengünstigen Prozessen. Hinsichtlich der Prozesskontrolle sollte die PAT-Initiative, ein von der Food and Drug Administration (FDA) in den USA initiiertes Vorgehen um die Qualität pharmazeutischer Produkte sicherzustellen, nicht nur in der Pharmaindustrie umgesetzt werden, sondern auch in anderen Branchen wie der Biotechnologie, der Lebensmittelindustrie, der chemischen Industrie sowie der Umweltanalytik.

Mit der PAT-Initiative stehen wir vor einem Paradigmenwechsel: Von Quality by Testing (QbT) hin zu Quality by Design (QbD). Quality by Design basiert auf der Erkenntnis, dass sich die Qualität von Produkten nicht

durch Testen erzielen lässt, sondern in das Design des Produktionsprozesses implementiert werden muss. Fertigungsprozesse basieren auf Prozessverständnis und ermöglichen damit eine kontinuierliche Sicherung der Qualität durch stabile Prozesse sowie Echtzeitfreigabe. Die Technologie zur Umsetzung von QbD ist die Process Analytical Technology (PAT), der wissenschaftliche und risikobasierte Ansatz zur Analyse und verbesserten Kontrolle von Produktionsprozessen. Primäre Ziele sind die Sicherstellung einer reproduzierbaren, hohen Qualität der Zwischen- und Endprodukte, die Senkung von Herstellkosten, die Förderung innovativer Technologien zur Qualitätssicherung und Prozessoptimierung sowie die Generierung eines tiefergehenden Verständnisses von Herstellungsprozessen. Hierbei werden photonisch basierte Analyseverfahren in Zukunft eine entscheidende Rolle spielen. Prinzipbedingt werden die interessierenden Prozesse durch photonische Analyseverfahren nicht beeinflusst, dennoch können Prozessparameter umfassend und unter widrigsten Umgebungsbedingungen hochgenau erfasst werden.

Im Rahmen der PAT-Initiative der FDA, die in ähnlicher Form auch von der EMEA (European Medicine Agency) getragen wird, wird den Herstellern biopharmazeutischer Produkte und Lebensmittel nahe gelegt, von der bisherigen Praxis der stichprobenartigen Endkontrolle zu einer Prozessbeherrschung durch prozessbegleitende und -steuernde Prüfungen und Messungen überzugehen. Ein durchgängiger PAT-Ansatz sieht die Anwendung von fünf Schritten bzw. Modulen und Werkzeugen vor:

- Risikoanalyse des Fertigungsprozesses, z.B. Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)
- Auswahl geeigneter Prozessanalysatoren (Sensoren, Spektrometer etc.)
- Prozesskontrollsysteme wie Statistische Prozesskontrolle (SPC), Multivariante SPC etc.
- Durchführung einer Versuchsplanung (DoE: Design of Experiment)

Paradigmenwechsel durch »Quality by Design«

Chargenfreigabe nach
Qualitätskontrolle

von Endprodukten

Streng festgelegte
Parameterbereiche

Keine Verbesserung
an bestehenden
Fertigungsprozessen



Echtzeitfreigabe

Kontinuierliche Produktion

Kenntnis davon, wie Prozess-
parameter und Materialeigen-
schaften sich auf die Produkt-
qualität auswirken

Ständige Verbesserung des
Herstellungsprozesses

■ Einsatz Multivariater Datenanalyse

Mit Hilfe einer leistungsfähigen Prozessanalytik im Sinne der PAT-Initiative lassen sich somit Fertigungsprozesse zur Herstellung eines Produktes in der gewünschten Qualität so steuern und regeln, dass nicht nur der Ressourceneinsatz minimiert wird, d.h. minimierter Energieverbrauch bzw. CO₂-Ausstoß erfolgt, sondern auch 100 % kontrollierte Produkte gefertigt werden. Durch einen integrierten systematischen Ansatz aus Prozessanalytik und Prozesssteuerung ergeben sich deutliche Vorteile für die Herstellung kundennaher und kunden-spezifischer Produkte.

Für die Wettbewerbsfähigkeit ist es dringend erforderlich, die Prozessanalytik-Methoden und -Verfahren, d.h. die notwendigen Werkzeuge (Sensoren, Software etc.) so weiterzuentwickeln, dass sie u.a. auch von kleinen und mittelständischen Unternehmen genutzt werden können. Dabei spielen »Einwegreaktoren« eine wichtige Rolle. Dies sind Reaktorbehälter, bei denen für die Produktion notwendige Aktoren (Rührer, Heizung, etc.)

sowie die zur Prozessüberwachung erforderliche Sensorik integriert ist und die nach der Produktion entsorgt werden. Photonische Sensorverfahren sind aufgrund der berührungslosen Arbeitsweise prädestiniert, die geforderte kontaminationsfreie Analytik für derartige Systeme zur Verfügung zu stellen.

Folgende Ziele stehen damit im Vordergrund des Einsatzes einer Prozessanalytik und Prozesssteuerung:

- Erhöhung der Produktivität und der Ausbeute
- Minimierung des Energie- und Ressourceneinsatzes
- Minimierung von Sicherheitszuschlägen im Produktionsbetrieb
- Weniger Reklamationen, höhere operative Flexibilität
- Vorausschauende Wartung, integrierte Selbst-diagnose
- 100 %-konstante und zertifizierte Qualität

Anwendungsgebiete sind vor allem im Bereich der Biotechnologie, der Lebensmittelindustrie, der Pharmaindustrie sowie bei Sicherheit und Umwelt zu sehen.

Neben der Prozessanalytik spielen, insbesondere in den Bereichen Gesundheit, Wellness, Umwelt und Lebensmittel, die Vor-Ort-Analyse-Verfahren eine wichtige Rolle. Im Gesundheitsbereich werden diese unter dem Begriff »Point-of-Care« (POC) zusammengefasst. Durch Anwendung am »Ort« des Bedarfs, z.B. in Arztpraxen, zuhause oder am Ort einer Verschmutzung werden diese Verfahren zunehmend helfen wertvolle Zeit und Ressourcen zu sparen, da Probenmaterial nicht aufwändig an ein spezialisiertes Labor verschickt werden muss, sondern direkt vor Ort analysiert werden kann. Dadurch wird unmittelbar im Anschluss z.B. bei einer Anwendung im medizinischen Bereich eine entsprechende Therapie bzw. Anpassung der Therapie ermöglicht.

An Geräte zur Vor-Ort-Analyse sind deshalb folgende Anforderungen zu richten:

- Die Geräte müssen transportabel, also klein und kompakt sein.
- Es darf keine aufwendige Probenvorbereitung außerhalb des Geräts notwendig sein.
- Das zur Analyse notwendige Probevolumen sollte so klein wie möglich sein.
- Es muss innerhalb kurzer Zeit, idealerweise in weniger als fünf Minuten ein klares und eindeutiges Ergebnis ohne Interpretationsspielraum vorliegen.
- Die Bedienung muss Laien oder Fachpersonal ohne vertieftes Wissen möglich sein.
- Die Geräte müssen robust und zuverlässig sein.

Basierend auf minimalen Mengen einfach zu gewinnender Proben, wie z.B. Flüssigkeiten oder Körperflüssigkeiten (z.B. Blut, Speichel, Urin) oder Gasen, müssen die POC-Geräte in der Lage sein zuverlässig und schnell Analysen vorzunehmen. Idealerweise erfolgt die gesam-

te Probenvorbereitung, wie z.B. Ab- oder Auftrennung der Bestandteile, komplett innerhalb des Gerätes. Neben fortgeschrittenen und weiter miniaturisierten optischen Analysemethoden kommt der Mikrofluidik zum Probenhandling und zur Probenaufbereitung eine besondere Bedeutung zu. Als Nachweismethoden sind verschiedene optische Techniken in besondere Weise geeignet, angefangen bei klassischen Fluoreszenzmethoden, die die Verwendung von Labels erfordern, bis hin zu labelfreien optischen und spektroskopischen Methoden wie beispielsweise die Oberflächenplasmonenresonanz, interferometrische Methoden oder die oberflächenverstärkte Raman-Spektroskopie. Wo sinnvoll können optische Methoden durch nicht-optische Methoden, beispielsweise akustische oder elektrische Systeme, ergänzt werden.

Generell wird an die analytischen Verfahren die Anforderung gestellt, dass sie robust sind und schnell ein zuverlässiges Ergebnis liefern, das einfach und eindeutig zu interpretieren ist. An Geräte zur Vor-Ort-Analyse wird naturgemäß auch die Anforderung gestellt, dass sie möglichst klein und kompakt, also transportabel sind. Speziell im Gesundheitsbereich und im Hinblick auf eine dezentrale Diagnostik besteht für Analysegeräte, die als Tisch- und Handgeräte ausgelegt sind, zudem die Anforderung nach erhöhter Sensitivität. Je nach Einsatzbereich kann weiterhin die simultane Bestimmung mehrerer Parameter von besonderem Nutzen sein, beispielsweise die gleichzeitige Analyse des Gefährdungspotenzials für mehrere Erkrankungen.

3.2.3.3

Anwendungsfelder

Gesundheit

Auf dem Gebiet Gesundheit sind die primären Einsatzgebiete die Anwendung von POC-Analytik für Vorsorgeuntersuchungen, Therapiekontrolle und Nachsorge. Vorsorgeuntersuchungen sind bislang oft nicht minimal-invasiv durchzuführen und besitzen deswegen eine relativ geringe Akzeptanz in der Bevölkerung. Zudem sind sie oft vergleichsweise kostenintensiv (z.B. die Koloskopie –

Darmspiegelung). Hier wäre die Entwicklung einer vorgeschalteten Analyse auf bestimmte Marker sinnvoll, welche es erlauben, eine Risikobestimmung für das Auftreten einer Erkrankung vorzunehmen. Die Einstufung in eine Gruppe mit hohem Risiko könnte die Akzeptanz für weitergehende Untersuchungen steigern und gleichzeitig helfen, Kosten zu vermeiden, die dadurch entstehen, diese Untersuchungen unspezifisch für die gesamte Bevölkerung durchzuführen.

Die POC-Analytik ist die Grundlage, um in Zukunft eine umfassende und bezahlbare medizinische Versorgung der Bevölkerung zu gewährleisten. Basierend auf dem Rückgang der Ärztedichte speziell in den ländlichen Gebieten könnte über die POC-Analytik in Verbindung mit der Telemedizin die gesundheitliche Versorgung hinsichtlich Prädiagnostik und Diagnostik in der Zukunft sichergestellt oder zumindest verbessert werden. Wichtige Einsatzfelder sind Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Infektionskrankheiten und die Onkologie. Bei letzterer kommt beispielsweise auch der Einsatz der POC-Analytik zur Kontrolle des Erfolgs einer ambulanten Chemotherapie in Betracht. Bei den Infektionskrankheiten ist insbesondere die Sepsis ein wichtiges Anwendungsgebiet. Ziel ist dabei die schnelle Analyse von Erregern wie auch der Wirtsantwort.

Wellness

Neben der Gesundheit ist der Wellness-Bereich ein wichtiges zukünftiges Anwendungsgebiet. Als Beispiel sei die Bestimmung von Blutwerten wie dem Laktosewert oder der Konzentration von Antioxidantien genannt, welche Rückschlüsse auf den Fitnessgrad, den Erfolg von Sportprogrammen und den Stresslevel zulassen. Grundlage für die Akzeptanz neuer Customer-Analysegeräte mit entsprechenden Möglichkeiten ist die nicht invasive Analyse. Hierbei werden photonische Sensor- und Analyseverfahren eine große Rolle spielen.

Pharmakologie und Arzneimittelsicherheit

Auf dem Gebiet der Pharmakologie und Arzneimittelsicherheit ist beispielsweise der Einsatz photonischer Analysemethoden zum Content Screening ein breites Anwendungsgebiet. Hierbei ist der Einsatz zur Bestimmung von Markern wie auch deren Einsatz zum funktionellen Screening hervorzuheben. Daneben sind berührungslos und kontaminationsfrei arbeitende photonische Analyseverfahren besonders geeignet, um die Qualität von Arzneimitteln in einer online-Prozesskontrolle zu überwachen.

Lebensmittelsicherheit und -qualität, Umwelt

Weiterhin eröffnet die Möglichkeit der Online-Messung auf der Basis photonischer Technologien neue Anwendungen im Bereich der Ernährung, da hierdurch eine schnelle und hygienisch einwandfreie Qualitätsbestimmung sowie eine entsprechende Prozessoptimierung und -kontrolle (Beispiel: Fermentations- und Trockenmischprozesse) ermöglicht werden. Des Weiteren können Verunreinigungen in Form absichtlich oder unabsichtlich zugesetzter Stoffe (z.B. Allergene) oder biologische Kontaminationen detektiert und quantifiziert werden. Die schnelle und flexible Detektion von Stoffen und Organismen mit photonischen Verfahren ist eine Voraussetzung für die Sicherung der Lebensgrundlagen.

Neben der Detektion der Kontaminationen sind nach Möglichkeit Verfahren einzubringen, die diese direkt im Prozess auch beseitigen oder zumindest umwandeln können. Photonische und plasmabasierte Verfahren haben sich diesbezüglich schon in einigen Aufgabenstellungen bewährt, zum Beispiel bei gering kontaminierten Abluftströmen und bei der Verlängerung der Mindesthaltbarkeit schnell verderblicher Waren durch gesicherte Dekontamination. Die Verfahren bieten den Vorteil, dass sie durch elektrische Betriebsparameter unmittelbar in ihrer Intensität steuerbar sind und sich der momentanen Kontaminationslast dynamisch anpassen können.



Foto: Einwegbioreaktor mit adaptierter Sensorik
© Sartorius Stedim Biotech GmbH

3.2.3.4

Technologische Herausforderungen

Um die jeweiligen Anforderungen an analytische Verfahren zu erfüllen bzw. die Anwendungsfelder in Gänge zu erschließen, ist eine Reihe von Neuentwicklungen und Verbesserungen gegenwärtig verfügbarer Technologien nötig. Besonders wichtig sind dabei Innovationen im Bereich der spektroskopischen Verfahren, insbesondere im Bereich der Gerätetechnik, der Biomarker und Label sowie flankierend auf dem Gebiet der entsprechenden IT- und Systemlösungen, welche im Folgenden weiter ausgeführt werden.

Spektroskopische Verfahren

Um den Anforderungen von applikativer Seite gerecht zu werden, müssen sowohl Methoden als auch Technologien weiterentwickelt werden. So müssen letztere vor allem hinsichtlich Nachweisempfindlichkeit, also hinsichtlich Sensitivität und Detektivität teilweise um Größenordnungen verbessert werden. Mögliche Wege hierzu bestehen zum einen in der Entwicklung sog. Hybridtechnologien, d.h. Kombinationen photonischer und nicht photonischer Verfahren, zum anderen in der Weiterentwicklung von Komponenten, also beispielsweise Lichtquellen, Detektoren und optischen Systemen einschließlich der für die Datenverarbeitung verantwortlichen Einheiten. Diese müssen nicht nur hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit (Schnelligkeit, Sensitivität, Hygienic Design, Resistenz gegen Fouling etc.), sondern für Anwendungen in der Vor-Ort-Analyse auch bezüglich des Miniaturisierungsgrades, der Robustheit beim Transport und der Einfachheit der Bedienung verbessert werden.

Die Datenverarbeitung (Chemometrie, Multivariate Datenanalyse) muss aus Auswerteverfahren bestehen, die dem Benutzer entweder eine verlässliche Ja/Nein Antwort zur Verfügung stellen oder, wo das nicht möglich ist, zumindest eine einfache und verständliche Visualisierung der Daten erlauben. Soweit möglich, sollten standardisierte Protokolle zum Einsatz kommen. Generell sollten Forschungs- und Entwicklungsprojekte »ent-

lang der Applikation« nach dem Schema »Spektroskopie – Datenanalyse – Systemintegration« vorangetrieben werden. Dies schließt insbesondere auch die weitere Methodenentwicklung mit ein.

Spektroskopische Verfahren (Absorptionsverfahren in den Spektralbereichen ultraviolett, sichtbar, nahes bis mittleres Infrarot; Raman-, Surface-Plasmon-Resonanz-, Fluoreszenz-Spektroskopie etc.) werden in diesem Zusammenhang eine führende Rolle einnehmen. Spektroskopische Sensoren und spektroskopische Hybridsensoren definiert über einen breiten Wellenlängenbereich liefern Informationen, die stark mit den momentan im Zwischenprodukt vorhandenen Substanzen korreliert sind. Dieses hat den Vorteil, dass in dem aufgenommenen Spektrum zahlreiche Informationen enthalten sind. Mit einer entsprechenden Multivariaten Datenanalyse lassen sich Informationen gewinnen, die wichtige Parameter über den Gesundheits- sowie Wellness-Zustand der betreffenden Person liefern bzw. über eine Prozessführung und somit für die Produktqualität relevant sind.

Die o.g. spektroskopischen Technologien müssen für die entsprechenden Prozesse und Analyseszenarien (z.B. Vor-Ort-Analytik) ausgelegt werden. Dieses erfordert u. a. auch die Erforschung und Entwicklung leistungsfähiger Analysesonden. Neben der Sensorik ist die Entwicklung einer softwaretechnischen Integration aller verfügbaren Messdaten und deren Aufbereitung bzw. Verarbeitung erforderlich, so dass die notwendigen Informationen z.B. für eine Vor-Ort-Analytik bzw. eine Prozesssteuerung und Prozessoptimierung gewonnen und bereitgestellt werden können.

Biomarker und Labels

Die Erforschung von Biomarkern ist der Schlüssel zur Früherkennung von Krankheiten und damit zu photonischen Screening-Verfahren und einer Vorsorgemedizin



Fotos links: Messsystem für Echtzeitanalysen © m-u-t AG

Foto rechts: Sensorpaket zur Langzeitüberwachung der Gewässerqualität © TriOS GmbH

im Allgemeinen. Neben ihrer Bedeutung für die Diagnostik ist die Analyse von Biomarkern auch der Schlüssel zu einer personalisierten Medizin. In der Sprache der Biomarker gibt der Organismus selbst Auskunft über den Therapiefortschritt. Photonische Technologien ebnen hier den Weg, um Diagnose und Therapie zur sog. Theragnostik zu verbinden. Der Zugang zur Sprache der Marker über die zugehörigen photonisch aktiven Label (z.B. Fluoreszenz-, metallische Nanopartikel-, Raman-Label) erlaubt Einblicke in Organismen und deren Funktionsweise, die bisher unvorstellbar waren. Die photonischen Technologien liefern Lösungen zur Kontrolle allgemeiner verfahrenstechnischer Prozesse, zur Überwachung der Produktqualität und zur Beantwortung sicherheitsrelevanter Fragen im Umwelt- und Life Science-Bereich.

Die Erforschung der Biomarker steht noch ganz am Anfang. Um ihre Sprache zu verstehen müssen Entwickler und Anwender eng zusammenarbeiten. Nur mit Hilfe photonischer Verfahren wird es möglich sein, diese Sprache zu verstehen und daraus Nutzen für Diagnose und Therapie zu ziehen. Mit photonischen Analysemethoden (z.B. Mehrkanalfluoreszenz, schwingungsspektroskopische Methoden) ist es möglich in vergleichsweise kurzer Zeit in High-Throughput Verfahren Biomarker zu identifizieren. Dazu korrespondierend müssen geeignete Label entwickelt werden, die eine Mehrkanaldetektion und damit das umfassende Auslesen biologischer Informationen mit hoher Informationsdichte ermöglichen.

Da Label normalerweise keine endogenen Stoffe sind, müssen sie gemäß den Richtlinien für Arzneimittel validiert und zugelassen werden. Auch die Zulassung erfordert momentan zu viel Zeit und muss deutlich beschleunigt werden, indem die bestehenden Regularien entsprechend vereinfacht werden.

Standards, IT- und Systemlösungen

Für die Umsetzung biologischer Informationen in digitale Informationen gibt es derzeit keine standardisierten Verfahren, Datenstrukturen oder Algorithmen. Generell besteht an Daten die Anforderung, dass sie leicht und ständig verfügbar sowie verlässlich und nachvollziehbar sein müssen, wozu eine standardisierte Abspeicherung und Aufbewahrung wünschenswert wäre. Für die weitere Auswertung der Daten zu Diagnose und Therapie zwecken müssen einheitliche Schnittstellen und Protokolle geschaffen werden.

Im Bereich der Algorithmen zur Datenauswertung (Chemometrie, Multivariate Datenanalyse) sollten dementsprechend Standards für die Erfassung und Auswertung statistischer Messdaten entwickelt und verbreitet werden (z.B. über Ausbildung/Studium). Zur Datenvisualisierung sollten 3D-Verfahren eingesetzt und Datenbanksysteme für Messdaten entwickelt werden, die über intelligente Suchprofile und Datenfilter eine schnelle und effektive Suche von Daten ermöglichen. Im Bereich der Algorithmen sollten Pilotprojekte initialisiert werden, um zu testen, inwieweit eine Standardisierung möglich ist.

Um eine möglichst reibungslose Vernetzung bzw. Systemintegration zu ermöglichen, sollten weiterhin einheitliche Plug&Play-Netze entwickelt werden. Voraussetzungen hierfür sind einheitliche Tag&Annotations-Strategien und eine Standardisierung bzw. Harmonisierung der entsprechenden Schnittstellen.

Dekontaminationsverfahren

Zur Reinigung von Abluft stehen derzeit eine Anzahl unterschiedlicher Verfahren zur Verfügung. Physikalische Verfahren reinigen Abluft vor allem von Partikeln, thermische Verfahren wie die Nachverbrennung sind für höher konzentrierte Abluftströme etabliert. Für zukünftige Anwendungen sind sie aber zu kosten- und energieintensiv. Adsorptions- und Absorptionsverfahren stützen sich vor allem auf die Verwendung von Aktivkohle, die aufwendig regeneriert werden muss.

Biofilter und Wäscher sind allgemeiner Stand der Technik. Biofilter sind jedoch voluminös, müssen regelmäßig gewartet werden (Substrataustausch), und die Abluft muss vorkonditioniert werden.

In der Umwelttechnik sind Plasmen auf Basis von Barriere- oder Koronaentladungen hinsichtlich verschiedener chemischer Verfahren untersucht worden. Ein effektiver Abbau von Schad- und Geruchsstoffen sowie Aerosolen aus Abgasen und Abluft mittels nicht-thermischer Plasmen ist möglich und sollte Gegenstand zukünftiger Forschung sein und die Anwendung thermischer Plasmen ergänzen.

3.2.3.5

Rahmenbedingungen – Neue interdisziplinäre Wege für die Analytik

Wie bereits ausgeführt, besteht ein Hemmnis darin, dass Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Analytik einerseits stark technologiegetrieben und andererseits mit hochkomplexen Fragestellungen seitens der Applikation verbunden sind. Dementsprechend müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die zu einer stärkeren Einbindung der Anwender führen. So muss im Bereich Gesundheit das medizinische Problem zusammen mit dem Mediziner stärker in den Fokus der FuE-Aktivitäten gestellt werden.

Demgemäß sollte die Verbundforschung stark interdisziplinär ausgerichtet werden. Parallel dazu sollte eine systematische Suche nach den »unmet needs« auf allen Ebenen erfolgen, beispielsweise durch Workshops auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene. Neue Technologien und Geräte sollten durch entsprechende Fördermaßnahmen vom Demonstrator in verwertbare bzw. marktfähige Produkte überführt werden (Transferförderung einschließlich der Phase der Markterschließung, Förderung von Spin-Offs und Bereitstellung oder Absicherung von Wagniskapital in der Seed-Phase). Hierzu müssten die Schnittstellen zwischen den Beteiligten (z.B. BMBF, BMWi, KfW) besser definiert und ausgearbeitet werden.

Die Interdisziplinarität sollte sich zukünftig auch verstärkt in den Inhalten und Organisation der Lehre widerspiegeln. Hier könnten beispielsweise interdisziplinäre Projekte und/oder das Lernen in entsprechenden Projektgruppen gezielt das Verständnis für die jeweils andere Disziplin fördern und helfen, eine gemeinsame Sprache zu entwickeln.

Grundsätzlich sollte die Vernetzung zwischen Industrie und Hochschule bezüglich der Lehre verbessert werden. Zudem sollten Fort-, Aus- und Weiterbildungsprogramme etabliert werden; drei Säulen sind dabei zu berücksichtigen:

- Eintägige Fortbildungen z.B. im Rahmen von Kolloquien; Ziel: Informationen über den Stand der Technik und Technikentwicklungen auf einem definierten Spezialgebiet
- Mehrtägige Weiterbildungsmaßnahmen im Rahmen von Kursen; Ziel: Weiterbildung von Personal, das im Bereich der analytischen Verfahren in der Industrie, Medizin oder im Umweltbereich arbeitet oder zukünftig arbeiten soll.
- Studiengang (Bachelor, Master) Innovative Analytik, der die verschiedenen Aspekte der Analytik (Prozess-, Gesundheits-, Umweltanalytik) in Modulen (Wahl/Pflicht) zusammenführt; Ziel: Ausbildung zum Analytiker mit entsprechender Breite und inhaltlicher Tiefe, schnellere Anpassung der Studieninhalte an aktuelle Entwicklungen

Fort- und Weiterbildungsangebote ermöglichen es, die Prozess-, Gesundheits- und Umweltanalytik als Disziplin zu etablieren und einem möglichst breiten Kreis zugänglich zu machen. Eine Zertifizierung der Weiterbildungsmaßnahmen sollte angestrebt werden. Mittelfristig sollte, der Bedeutung der Analytik entsprechend, eine Hochschulausbildung im Bereich der Bachelor- und Masterstudiengänge etabliert werden.



Foto: Minispektrometer zur analytischen Prozessüberwachung in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie © InfraTec GmbH

Alle Maßnahmen könnten maßgeblich von kurzen Wegen profitieren, daher sollte die Bildung lokaler Cluster für Forschung und Lehre gezielt gefördert werden. Lokale Cluster sollten sich wiederum zum Erfahrungsaustausch im Sinne von »best practice« auf nationaler Ebene vernetzen.

3.2.3.6

Die Handlungsfelder im Überblick

Um die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Potenziale analytischer Verfahren zu erschließen, müssen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den folgenden Themenkomplexen durchgeführt werden:

- Neuartige Sensorsysteme für die Messung kritischer Gesundheits-, Umwelt- und Prozessparameter
- Sensoren mit dem Schwerpunkt auf Nicht-Invasivität, Realzeitfähigkeit, Modularität, Einfachheit und Robustheit, Resistenz gegen Fouling etc.
- Verfahren mit hoher Sensitivität
- Lösungsorientierte Prozessanbindungen unter den Aspekten des Quality by Design und einer vollautomatischen Prozessführung
- »Kalibrationsfreie« Methoden und Verfahren
- Plug&Play-Lösungen
- Systeme mit vorausschauender Wartung, Selbstreinigung, integrierter Selbstdiagnose, Fernkalibrierung und Steuerung sowie Netzwerkfähigkeit
- Software-Tools zur Erfassung und Auswertung komplexer Datenmengen (Chemometrie, Multivariate Datenanalyse)
- Hardware- und Software-Lösungen für die Vor-Ort-Analytik sowie einen durchgängigen PAT-Ansatz (Process Analytical Technology), von der Risikoanalyse bis zur Multivariaten Datenanalyse

- Aktive Steuerung und Regelung dynamischer Dekontaminationsverfahren

Spezifische Entwicklungsbedarfe werden in den folgenden Bereichen gesehen:

- Optische Verfahren für eine schnelle, hochspezifische und sensitive Spurenanalytik sowie für die Detektion kleinster Materialmengen
- Praxistaugliche Lösungen zur Detektion des Hygiene- und Reinigungszustandes
- Neue technologische Ansätze für kostengünstige, robuste und stark miniaturisierte Spektrometer für einen weiten Wellenlängenbereich vom ultravioletten bis in den Infrarot-Bereich sowie die notwendige Beleuchtungstechnik und optische Komponenten
- Online-fähige chemische Bildgebungsverfahren
- Multimodale Messkonzepte durch Kombination verschiedener Technologien/Sensoren
- Simultane Mehrsubstratanalysen mit Blick auf die zunehmend wachsenden Metabolomaktivitäten
- Neue photonische und plasmabasierte Verfahren zur biologischen und chemischen Dekontamination von Gasen und Flüssigkeiten, insbesondere Wasser

Eine erfolgreiche Umsetzung erfordert eine anwendungsorientierte Verbundforschung. Dies bedeutet:

- Entwicklungsprojekte ausgehend von konkreten Applikationen, entlang der Wertschöpfungskette
- Stärkere Einbindung von Anwendern, verbunden mit einem neuen Fördermodul, der Transferförderung

Flankierend müssen Fort-, Aus- und Weiterbildungsprogramme eingerichtet werden um die Prozess-, Gesundheits- und Umweltanalytik als Disziplin zu etablieren und die Diffusion der neuen Technologien voranzutreiben.

3.2.4

Zusammenfassung

Die Photonik ist heute ein unverzichtbarer Bestandteil von Medizintechnik, Umwelttechnologie und Analytik. In den Lebenswissenschaften und der medizinischen Forschung leistet sie wichtige Beiträge zu einem immer tieferen Verständnis zellulärer Vorgänge. Damit verbunden ist ein junger, wachsender Markt, in dem Deutschland gut aufgestellt ist.

Der Umsatz mit Medizinprodukten und Geräten auf Basis Optischer Technologien beträgt derzeit 4 Mrd. € p.a. und es arbeiten schon heute mehr als 20.000 Beschäftigte in Deutschland in diesem Bereich. Bei den Optischen Technologien für die Medizintechnik ist Deutschland weltweit die Nummer zwei. Die Ausgangsposition ist gut, doch holen vor allem asiatische Wettbewerber auf. Wir dürfen deshalb nicht stehen bleiben, müssen Innovationen vorantreiben und die hervorragenden Ergebnisse aus der Grundlagenforschung noch schneller in die Anwendung führen.

Lebensprozesse genauer untersuchen, Krankheiten besser verstehen und grundsätzlich erforschen, statt nur Symptome zu behandeln – dies erlauben neue optische Verfahren, Mikroskop- und Endoskopsysteme. Zwei Drittel aller Krankheiten, darunter Demenz und Augenerkrankungen oder Aids, sind heute noch nicht ursächlich behandelbar, viele Krankheiten sind zu unsicher oder zu spät diagnostizierbar, entsprechende Wirkstoffe oder Behandlungsverfahren fehlen. Drei Viertel der Mittel in der globalen Gesundheitsvorsorge werden für die symptomatische Behandlung fortgeschrittener Krankheitsbilder ausgegeben. Die Zukunft liegt in vorbeugenden und frühzeitigen Gesundheitsmaßnahmen. Diesen Paradigmenwechsel muss die Life Science-Forschung leisten mit ihren Einblicken in die Genetik und den Zellstoffwechsel. Optogenetik wird mehr und mehr

zu einer unverzichtbaren Grundlage für die regenerative Medizin.

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 3D. Photonische Verfahren haben das Potenzial zur minimalinvasiven und patientenschonenden bildgebenden Diagnostik für eine Vielzahl von Einsatzgebieten. Zu den Herausforderungen für die nächste Dekade gehören höchstauflösende optische und dabei physiologisch verträgliche Systeme, die es erlauben, die im Größenbereich von 20 bis 200 Nanometer 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. Für den Blick in lebende Zellverbände benötigen wir neue Ansätze zur effektiven Nutzung von Licht im Patienten, um eine Schädigung der Zellen durch zu hohe Lichtdosen zu verhindern. Zudem sind neue Konzepte für die zur Sichtbarmachung notwendigen Labels erforderlich, die für In-vivo-Untersuchungen geeignet sind.

In besonderer Weise werden zukünftig auch Auge, Haut und intrakorporale Schleimhaut in den Mittelpunkt Optischer Technologien für die bildgebende Diagnostik rücken. So nehmen beispielsweise Hautkrankheiten wie Hauttumore, allergische und entzündliche Hauterkrankungen oder Wundheilungsstörungen stetig zu und müssen besser diagnostiziert und mit einer geeigneten Therapiekontrolle versehen werden. Um die zunehmende visuelle Informationsvielfalt sicher beherrschen zu können, müssen auch die leistungsfähige Bildverarbeitung, die 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).

Zukünftige Entwicklungen bei Therapie und Medizinprodukten verfolgen das Ziel, Wunden schnell und komplikationslos heilen und Schmerzen minimieren zu können. Sofern ein Zugang in das Körperinnere erfolgen muss, soll dieser Zugang so sanft wie möglich erfolgen (sanfte Chirurgie). Optische Verfahren bieten hierfür hervorragende Möglichkeiten z.B. durch die Verknüpfung von in situ-Diagnostik und Therapieverfahren. Diese Verschmelzung von Diagnose und Therapie (Theragnostik) gehört zu den zentralen Handlungsfeldern im Bereich biophotonischer Verfahren. So ermöglicht beispielsweise eine Online-Gewebsdetektion und -identifikation eine zielgerichtete OP-Navigation – der Schlüssel zu minimalinvasiven OP-Verfahren. Optische Technologien eröffnen beim Einsatz in der Endoskopie sowie der minimalinvasiven Chirurgie die Vision des schmerzfreien Operierens. Der endoskopische Zugang erfolgt über natürliche Körperöffnungen, durch einen schmerzfrei verheilenden Schnitt in die Organwand gelangt der Operateur in die Bauchhöhle. Längere Zugangswege stellen dabei künftig das optische System und die Operationstechnik vor neue Herausforderungen. Lösungen dafür bieten der Laser als vielseitiges medizinisches Instrument und neuartige Plasmaquellen. Photonische Ansätze mittels plasmamedizinischer Therapien eröffnen auch neue Möglichkeiten bei der Wundheilung und der Behandlung entzündlicher Erkrankungen durch die Funktionsmodulation von Zellen und Zellverbänden sowie neue Methoden der Dekontamination. Hier ergeben sich zahlreiche Herausforderungen für die nächste Dekade. Unser Ziel: Mit der Biophotonik den Weg in die Kliniken gehen.

Um den Anstieg der Kosten im Gesundheitssystem, der mit dem demographischen Wandel verknüpft ist, einzudämmen, müssen Durchbrüche hin zu kostengünstigen, teils auch ohne einen Arzt vor Ort einzusetzenden medizinischen Verfahren gelingen. Analytische Verfahren zur Kontrolle des Gesundheitszustands, für Vorsorgeuntersuchungen, Therapiekontrolle und Nachsorge sind dafür eine Grundvoraussetzung. Hier bietet die Photonik schon heute ein breites Spektrum vielversprechender Lösungsansätze vom Mikrospektrometer bis zur Nanolichtquelle. In Zukunft werden photonische Technologien u. a. die Grundlage für implantierbare Mikrolabore liefern, welche kontinuierlich alle wichtigen Daten über den Gesundheitszustand insbesondere älterer Menschen liefern können und so eine umfassende und bezahlbare medizinische Versorgung möglich machen. Aber auch im Bereich der Lebens- und Arzneimittelsicherheit sowie bei der Senkung von Produktionskosten und bei der Dekontamination von Gasen und Flüssigkeiten spielen analytische Verfahren für eine automatisierte Prozessüberwachung eine wichtige Rolle. Technologische Herausforderungen in der nächsten Dekade ergeben sich hier vor allem bei den spektroskopischen Systemen, die hinsichtlich ihrer Nachweispfeiflichkeit um Größenordnungen verbessert werden müssen. Besonders wichtig ist dabei die Ausrichtung der Forschungsaktivitäten entlang der Linie »Spektroskopie – Datenanalyse – Systemintegration«. Unter diesen Gesichtspunkten sind Verfahren anzustreben, die durch eine neuartige Analytik auch auf Prozesse und Verfahren zugreifen, die zum Beispiel die Dekontamination in oder am Prozess ermöglichen oder unterstützen. Photonische Prozesse und plasmabasierte Verfahren bieten dazu die Möglichkeit, weil eine Steuerung über elektrische Betriebsparameter erfolgen kann.

Um die Potenziale der Biophotonik in Deutschland zu erschließen, ist die frühzeitige klinische Erprobung neuer optisch-diagnostischer und therapeutischer Verfahren erforderlich. Dies sollte in den Forschungsstrukturen berücksichtigt werden. Die frühe Mitwirkung von Kliniken in FuE-Projekten und die Förderung von »Proof of Concepts« bis zu klinischen Studien sind hier zu intensivieren. Eine geförderte Anschubfinanzierung für klinische Prototypen könnte zudem für viele Medizinprodukte verbesserte Marktchancen eröffnen und Innovationen in Deutschland vorantreiben. In diesem Zusammenhang sollten auch »Tutorenmodelle« angestrebt werden, bei denen sich Industrieunternehmen bereits während der Entwicklung Partnern aus kleinen und mittelständischen Unternehmen öffnen, um einen »gesamtheitlichen« Produktentwicklungsprozess zu realisieren.

Gerade die Biophotonik mit ihren stark interdisziplinären Ansätzen verlangt ein »Mannschaftsspiel« von Wirtschaft und Wissenschaft, von »groß und klein«. Wenn es uns gelingt, das Zusammenspiel auch künftig erfolgreich zu gestalten, wird Deutschland in der nächsten Dekade in diesem Zukunftsfeld ganz vorne sein.

3.3

KOMMUNIKATION UND INFORMATION

Die Deutsche Position

Der flächendeckende Umbau der kabelgebundenen Telekommunikationsanschlüsse auf Glasfaserverbindungen bis zum Endkunden erzeugt einen sprunghaften Anstieg der Nachfrage nach optischen und optoelektronischen Bauelementen und Modulen. Um sich in diesem dynamischen Markt behaupten zu können, ist die Fähigkeit zur kostengünstigen Fertigung wesentlich. Es wird erwartet, dass dieser Kostendruck einer der wichtigsten Treiber der mittel- und langfristigen Entwicklung hin zu einer integrierten Photonik sein wird – analog dem Übergang von der diskret aus Einzelkomponenten aufgebauten Elektronik zur Mikroelektronik in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts.

Deutsche Unternehmen haben sich durch ihr exzellentes Know-How und die enge Zusammenarbeit mit international renommierten deutschen Forschungsinstituten in den letzten Jahren eine sehr gute Marktposition erarbeitet, um von dieser ausgehend den Markt für optische Telekommunikation, der allein für glasfasergebundene Zugangsnetze in Deutschland auf mehr als zehn Milliarden Euro geschätzt wird, zu erschließen. Die Erarbeitung markttauglicher Lösungen für integrierte photonische Systeme bedarf insbesondere auch der Einbindung in einen europäischen Kontext.



Skalierbare Infrastruktur bleibt den zukünftigen Anforderungen gewachsen © ADVA AG Optical Networking

3.3.1

Photonische Kommunikationsnetze

Photonische Kommunikationsnetze sind das Rückgrat unserer vernetzten Gesellschaft. Egal ob wir einen Telefonanruf, eine Email oder eine Webanwendung nutzen, immer werden optische Netze verwendet, um, unsichtbar für den Nutzer, die benötigten Daten schnell, sicher und zuverlässig zu transportieren. Und auch aus der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation sind optische Netze nicht mehr wegzudenken: Sei es zur Verbindung von Servern im Rechencenter oder zur Vernetzung von Systemkomponenten in Auto, Flugzeug, Schiff – ohne Photonik blieben viele Bereiche unseres täglichen Lebens im Dunkeln.

Zukünftig wird die Bedeutung photonischer Netze weiter zunehmen: Allein der globale IP-Verkehr steigt mit einer Rate von mehr als 50 % pro Jahr. Dieses Wachstum lässt sich nachhaltig und zukunftssicher nur mit der Verlegung von Glasfaser zum Endkunden bewältigen. Mit seiner nahezu unbegrenzten Bandbreite wird die Glasfaseranbindung zu einem wichtigen Standort- und Wettbewerbsfaktor und fungiert als Motor für die Entwicklung neuer Dienste.

Der Trend, Datenspeicherung, Applikationen und Rechenkapazität zunehmend aus einer verteilten Datencenter-»Cloud« zu beziehen, stellt zudem neue Anforderungen an optische Hochgeschwindigkeits-Netze hinsichtlich Flexibilität, Skalierbarkeit und Energieeffizienz. Auch innerhalb des Datencenters wird der Einfluss photonischer Technologien weiter steigen – angefangen bei optischen Interconnects über Chip-zu-Chip-Verbindungen bis hin zur On-Chip-Photonik. Und auch in neuen Anwendungsfeldern wie Smart Grids oder e-health ist photonische Netztechnik erforderlich – angepasste photonische Netze bilden die sichere, zuverlässige und skalierbare Basisinfrastruktur für die Bereitstellung kritischer Dienste.

Neue Dienste, steigende Bandbreiten in den Fest- und Mobilnetzen sowie die zunehmende intensivere globale Nutzung des Internets – ein Ende dieser Entwicklung ist nicht erkennbar, sie wird sich voraussichtlich noch beschleunigen. Ein Wachstum des Verkehrsaufkommens um 50 % pro Jahr hat zur Folge, dass die globale Netzkapazität in den nächsten fünf Jahren um den Faktor acht gesteigert werden muss. Bei einem Verkehrswachstum von 100 % pro Jahr müsste die Netzkapazität sogar um den Faktor 30 gesteigert werden. Diese Entwicklung stellt immense Herausforderungen an Netzbetreiber und Netzausrüster. Abgesehen von einem stetigen Ausbau der Kapazität mit existierender Netztechnik, der aus wirtschaftlicher Sicht als nicht realisierbar angesehen wird, gibt es bisher keine Alternative, diese Herausforderungen zu bewältigen. Hier sind Forschung und Entwicklung im Zusammenspiel aller Beteiligten massiv gefordert, wirtschaftlichere und besser skalierbare Netz- und Systemlösungen zu erarbeiten.

Mit einem Netzwerk aus mehr als 50 Firmen und 20 Forschungseinrichtungen ist Deutschland ein weltweit führender Forschungs- und Entwicklungsstandort für photonische Kommunikationstechnik. Optische System-, Komponenten- und Messtechnik aus Deutschland ist international geschätzt. Weltweit beachtete Forschungsergebnisse, eine Vielzahl an Patenten und die Mitwirkung an zahlreichen Standards stehen darüber hinaus für den Erfolg des Standort Deutschlands. All das ist jedoch kein Grund, sich zurückzulehnen: Im globalen Wettbewerb mit Ländern wie den USA, Japan und China muss jeder Vorteil permanent neu erarbeitet werden.

3.3.1.1

Photonische Netze – Lösungen aus Licht

Photonische Netze stellen die universelle Basisinfrastruktur für das Internet der Zukunft dar. Sie sind Voraussetzung für eine schnelle, sichere und zuverlässige Kommunikation und liefern Beiträge zu wichtigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen.

Klimaschutz und Umwelt

Schnelle Glasfasernetze ermöglichen ein verteiltes Arbeiten, den Austausch großer Datenmengen und hochqualitative Videokonferenzen. Sie erlauben ein effizientes Teleworking, reduzieren Reisen und verringern den Ressourcenverbrauch. Über optische Netze kontrollieren Smart Energy/Grid/Metering- und eCar-Mobility-Anwendungen den Energiebedarf in Industrie und Haushalt und steuern Energieeinspeisung und -verbrauch. Durch ihre höhere Energieeffizienz im Vergleich zu elektrischen Technologien helfen optische Interconnect-Technologien, den Energieverbrauch der Informations- und Kommunikationstechnologie zu begrenzen.

Produktion und Logistik

In Produktion und Logistik erlauben photonische Netze eine effiziente hochbitratige Maschine-zu-Maschine-Kommunikation. Sie können schnell, kompakt und leistungsarm große Datenmengen transportieren und sind wegen ihrer exzellenten elektromagnetischen Verträglichkeit auch in sensiblen Umgebungen einsetzbar.

Mobilität

Photonische Netze binden Mobilfunk-Basisstationen breitbandig an das Kernnetz an und erlauben nomadischen Nutzern einen schnellen Zugriff auf große Datenmengen, egal wo sie sich aufhalten. In Telematik-Anwendungen erlauben sie eine weiträumige Anbindung von Kameras oder Sensoren an eine Leitzentrale. In Verkehrsmitteln sorgen optische Bordnetze für die schnelle Übertragung von Steuerungs-, Sicherheits- und Kommunikationsdaten.

Life Science und Medizin

Photonische Netze ermöglichen die schnelle Übertragung elektronischer Patientendaten und Untersuchungsergebnisse und helfen bei der Erstellung und Archivierung hochqualitativer elektronischer Patientenakten. Sie erlauben Ferndiagnosen durch den Arzt und die gemeinsame Diskussion von Untersuchungsergebnissen zwischen Ärzten. Für Ambient Assisted Living oder Smart Home/City-Anwendungen stellen sie die benötigte breitbandige Netzinfrastruktur zur Verfügung.

3.3.1.2

Marktüberblick

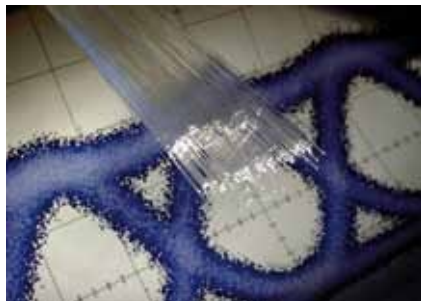
Mit einem globalen Marktvolumen von 14 Mrd. USD für optische Netztechnik und 4 Mrd. USD für zugehörige optische Komponenten im Jahr 2008²⁷ sind photonische Kommunikationsnetze ein wichtiger Wachstumsmarkt mit strategischer Bedeutung für die deutsche Industrie. Ergänzt man diese Zahlen um das Marktvolumen optischer Zugangsnetze (über 2 Mrd. USD in 2008), neuer Anwendungsfelder und Verkabelungssysteme, kann man von einem derzeitigen jährlichen Marktvolumen von mehr als 20 Mrd. USD mit steigender Wachstumsrate ausgehen.

Mehr als 50 Firmen mit ca. 3.700 Mitarbeitern und über 850 Mio. € Jahresumsatz²⁸ und 20 Forschungseinrichtungen arbeiten in Deutschland an Weltmarktlösungen für photonische Kommunikationsnetze. Deutschland ist drittgrößter Exporteur von Telekommunikationstechnik in der OECD nach Korea und den USA²⁹. Neben großen Systemherstellern wie ADVA, Alcatel-Lucent, Ericsson und Nokia Siemens Networks entwickeln eine Vielzahl kleinerer Firmen Gerätetechnik (z.B. Keymile, ELCON, Microsens), Subsysteme (z.B. Cisco-CoreOptics, FOC)

27 Strategic Research Agenda der Europäischen Technologieplattform Photonics21

28 BMBF Marktstudie Optische Technologien 2007, Zahlenbasis für 2005

29 OECD Communications Outlook 2009



und Komponenten (z.B. u2t) für die Telekommunikation, viele davon mit eigener Fertigung in Deutschland (z.B. ADVA, ELCON, Microsens, Nokia Siemens Networks, u2t). Auch Verkabelungssysteme und Bordnetze (z.B. LEONI, ADC Krone) sowie optische Interconnects und die zugehörigen Komponenten (z.B. Vertilas, ULM Photonics) werden in Deutschland entwickelt und produziert.

3.3.1.3

Die deutsche Position

Photonische Netze mit Ihrer zugehörigen System-, Subsystem-, Komponenten- und Messtechnik sind gute Beispiele für Hightech »Made in Germany«. Zu diesen Erfolgen hat auch die Projektförderung des BMBF maßgeblich beigetragen. In folgenden Produktbereichen nimmt Deutschland im weltweiten Vergleich aktuell eine führende Position ein:

- Optische Systeme:
40G/100G-Transponder für Kern- und Metronetze (ADVA, Alcatel-Lucent, Nokia Siemens Networks)
- Optische Module:
Kohärentes 40G-Transceiver-Modul für den Weitverkehr (Cisco-CoreOptics)
- Optische Komponenten:
Integrierter kohärenter 100G-Empfänger (u2t)
Langwellenlängen-10G-VCSEL –
vertikal emittierende Laserdioden (Vertilas)
- Optische Messtechnik:
100G-Optical-Transport-Network-/
Ethernet-Tester (JDSU)

Aus Marktstudien (z.B. BMBF Marktstudie Optische Technologien) und Positionspapieren (z.B. zur 100GET-Initiative) lässt sich ableiten, dass in der deutschen Industrie jährlich 50 bis 100 Mio. € in die Erforschung und Entwicklung optischer Netze und der zugehörigen System-, Subsystem-, Komponenten- und Messtechnik fließen. Dabei kann auf eine langjährige Erfahrung und ein etab-

Foto links: Glasfasern sind das Rückgrat der modernen Informationsübertragung © Fraunhofer HHI

Foto Mitte: Backbone-Verkabelung einer Serverfarm © Alcatel-Lucent

Foto rechts: Glasfaserkabel in einem Experiment zu Hochgeschwindigkeitsdatenübertragungsnetzen © Alcatel-Lucent Deutschland AG

liertes Netzwerk zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen zurückgegriffen werden. Schwerpunkte der deutschen Industrie sind Hochgeschwindigkeits-Netze nebst der zugehörigen System- und Komponententechnik, VCSELs für Interconnect-Anwendungen und optische Verkabelungslösungen. Auf der optischen Komponentenseite besteht dabei in Deutschland eine starke Fokussierung (Hochgeschwindigkeits-Empfänger, langwellige VCSELs, optische Hochgeschwindigkeits-Transceiver für dichtes Wellenlängenmultiplex – DWDM, in Teilen optische Fasern / Faserkabel und Faserverstärker). Komponentenentwicklung für andere benötigte (Standard-) Komponenten findet oft nicht mehr in Deutschland statt, sondern in den USA oder in Asien. Um die volle Wertschöpfungskette bei photonischen Netzen zumindest in ausgewählten Bereichen abbilden zu können, sind sowohl Ideen für neue Komponenten als auch z. T. externe Partner (z. B. die europäischen Töchter großer Komponentenhersteller wie Oclaro in Großbritannien) erforderlich.

Um gegenüber den USA und der stark zunehmenden asiatischen Konkurrenz nicht zurückzufallen, muss durch zielgerichtete Forschung und Entwicklung die deutsche Position bei den photonischen Kommunikationsnetzen und -systemen verteidigt und weiter ausgebaut werden. Ein besonderes Augenmerk ist hierbei auch auf neue Anwendungsfelder außerhalb der klassischen Telekommunikation zu legen, die ein hohes Marktvolumen versprechen.

3.3.1.4

Herausforderungen

Durch den steigenden Bandbreitenbedarf in allen Anwendungsgebieten werden photonische Netze und Systeme in Zukunft eine noch stärkere Rolle spielen als heute. Auch Privatanwender, für die photonische Netze heute weitgehend unsichtbar sind, werden zukünftig für den Internetanschluss und Heimnetze photonische Technologien unmittelbar nutzen. Als Vision für das Jahr 2020 lässt sich das folgende Szenario entwerfen:

- »Unbegrenzte« Bandbreite ist für jeden überall und jederzeit über Glasfaser verfügbar.
- Offene und flexible optische Netze erlauben eine freie Entwicklung und Nutzung neuer Dienste.
- Speicher/Applikationen/Computing werden aus einer optisch vernetzten »Cloud« bedient.
- Photonische Netze liefern eine sichere und zuverlässige Infrastruktur für neue Anwendungen (Smart Grids, Smart Cities, e-Health etc.).

Eine Reihe von Fragen muss jedoch zunächst beantwortet werden, um solch ein Szenario in 2020 Wirklichkeit werden zu lassen:

Wie ist ein offener Glasfaseranschluss bis zum einzelnen Haushalt flächendeckend, kostengünstig und zukunftssicher zu realisieren? Es steht außer Frage, dass ein Glasfaser-basierter Teilnehmeranschluss eine nachhaltige Infrastruktur-Investition darstellt und als einziger in der Lage ist, mit dem künftigen Bandbreitenwachstum Schritt zu halten. In Deutschland sind jedoch aktuell über Glasfaser bis zum Gebäude (FTTB³⁰) bzw. bis zum Haushalt (FTTH³¹) erst weniger als 1 % der Haushalte erreichbar³². Deutschland gehört damit weltweit zu den Schlusslichtern beim Faserausbau. Schätzungen für einen flächen-

deckenden FTTH-Ausbau gehen von einem Investitionsvolumen von bis zu 50 Mrd. € aus, wobei davon typisch ca. 70 bis 80 % auf die passive Infrastruktur (Verlegung der Glasfasern) entfallen. Neben einem tragfähigen wirtschaftlichen Modell, das die lange Lebensdauer der Glasfaser-Infrastruktur von über 30 Jahren berücksichtigt, ist hier insbesondere dafür Sorge zu tragen, dass ein offener Netzzugang und ein diskriminierungsfreier Zugriff auf Dienste möglich ist.

Wie lassen sich die steigenden Datenmengen und -raten beherrschen? Wenn jedem der ca. 40 Mio. Haushalte in Deutschland eine Bandbreite von 1 Gb/s (Gigabit pro Sekunde) zur Verfügung gestellt wird, so entspricht das einer mittleren Kapazität von 40 Tb/s (Terabit pro Sekunde), die in jeder der ca. 1000 Vermittlungsstellen (mit im Mittel jeweils 40.000 angeschlossenen Teilnehmern) vorgehalten werden muss. Auch wenn dieser Verkehr vor dem Übergang ins Metro-/Kernnetz noch aggregiert wird, so wachsen die Bandbreiten der Netzknoten doch um mindestens eine Größenordnung. Gleichzeitig steigt der Energieverbrauch. Skalierbare Netze, Systeme und Komponenten sind im Metro- und Kernnetz erforderlich, um diesen Bedarf bedienen zu können. Mit zunehmenden Datenraten stößt auch die Glasfaserkapazität an Grenzen und erfordert neue Wege, um der Sättigung der spektralen Effizienz entgegenzuwirken.

Wie sieht das Datencenter der nächsten Generation aus? Bereits im Jahr 2007 waren Datencenter für 1 % des globalen Energieverbrauchs verantwortlich³³. Mit dem zunehmenden Einsatz von Cloud Computing werden die Datencenter-Kapazitäten und der zugehörige Energieverbrauch weiter anwachsen. Neben gesellschaftlichen Herausforderungen wie der Akzeptanz von Cloud-Computing und Fragen nach Datensicherheit und -integrität sind hier technische Lösungen gesucht, die im Datencenter auf Basis Optischer Technologien eine bessere Konnektivität und eine effizientere Datenverarbeitung ermöglichen.

30 FTTB: Fiber to the Building

31 FTTH: Fiber to the Home

32 FTTH Council Europe, Stand Dez. 2009

33 R. Tucker, 2009

Wie sehen Netze für neue Anwendungen aus? Neue Anwendungen erfordern aus Sicherheits-, Performance- und/oder Kostengründen oftmals dedizierte Netze. Bei optischen Heimnetzen z. B. bedarf es standardisierter und einfach zu installierender Massenmarkt-Technik, die sich von Netzbetreiber-Technik grundlegend unterscheidet. Energieinformations- oder Sensornetze zeichnen sich dadurch aus, dass sie eine sehr hohe Zahl feingranularer Datenströme sehr zuverlässig und mit niedrigen Verzögerungszeiten transportieren müssen. Netze zum Management von Krankenakten müssen in der Lage sein, auf Abruf große Bandbreiten zur Verfügung zu stellen. Alle diese neuen Anwendungen erfordern angepasste Netz-, System- und Komponententechnologien.

Derzeit verwenden Zugangsnetze in Deutschland für den Teilnehmeranschluss in der Regel Kupferdoppeladern, die Nutzerdatenraten unterhalb von 100 Mb/s (Megabit pro Sekunde) zur Verfügung stellen können. Im Metro- und Weitverkehrsbereich werden vorwiegend optische Wellenlängenmultiplex-Systeme mit Kanaldatenraten von 10 Gb/s eingesetzt, wobei darüber hinaus 40 Gb/s zur Verfügung stehen. Die Markteinführung von 100 Gb/s-Technik pro Wellenlänge steht kurz bevor. Die optischen Netze werden hauptsächlich statisch betrieben. Rekonfigurierbare optische Netzelemente werden zur einfacheren Bereitstellung neuer Dienste oder zur Netzrekonfiguration im Fehlerfall eingesetzt. In Datacentern stehen faserbasierte optische Interconnect-Techniken bis 120 Gb/s pro Kabel (10 x 10 Gb/s mit parallelen Optiken) zur Verfügung. Chip-zu-Chip- und On-Chip-Verbindungen erfolgen elektrisch. Optische Heimnetze sind nicht existent.

Bis zum Jahr 2020 wird der globale Internet-Verkehr Schätzungen zufolge um einen Faktor 50 anwachsen. Beherrschen lässt sich dieser Verkehrsanstieg nur durch eine Kombination aus Nutzung freier Übertragungskapazitäten, höher kapazitiven Systemen und einer effizienteren Netzarchitektur. Dabei ist ein besonderes Augenmerk auch auf die Energieeffizienz zu legen. Es wird erwartet, dass Datenraten von 1 Gb/s pro Nutzer

im Zugangsnetz und Kanaldatenraten von 400 Gb/s bis 1 Tb/s im Metro-/Kernnetz erforderlich werden. Erste Überlegungen hierzu sind in den Standardisierungsgremien ITU-T, IEEE und FSAN bereits begonnen worden. Auch im Datacenter und in der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation werden die Datenraten ähnlich stark ansteigen. Gleichzeitig muss eine stärkere Dynamisierung der optischen Netze stattfinden, um die verfügbaren Netzressourcen effizienter nutzen zu können. Schaltfunktionen, die die Kanaldatenrate an die Bedürfnisse der Anwendung und die Möglichkeiten der Übertragungsstrecke anpassen, und die Entwicklung von einem starren Wellenlängenraster zu einer programmierbaren Kanalbandbreite/-allokation für Wellenlängenmultiplexsignale ermöglichen die Dynamisierung im Kern- und Metronetz. Das Zusammenwachsen von Informationstechnik und Kommunikationstechnik sowie der Trend von einer zentralen Netzsteuerung hin zu einer stärkeren Nutzer- und Anwendungskontrolle unterstützen diese Entwicklung.

3.3.1.5

Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland

Der steigende Bandbreitebedarf ist der Motor der Entwicklung photonischer Netze. Er treibt die Netztechnik in neue Anwendungs-/Netzbereiche und erfordert neue Netz-, System- und Komponententechnik. Für eine nachhaltige Entwicklung sind dabei Energieeffizienz und Zukunftssicherheit wichtige Erfolgsfaktoren. Kurzfristig steht die Erforschung neuer optischer Zugangsnetztechniken im Fokus. Die Einführung solcher Techniken erfordert dann in einem nächsten Schritt den weiteren Ausbau der Metro-, Kernnetz- und Datacenter-Kapazitäten sowie die Einführung optischer Netztechnik in Heim- und Firmennetzen. Schlüsseltechnologien auf der Komponentenseite werden die photonische und die optisch-elektronische Integration sein. Daneben gewinnt aber auch die richtig dosierte elektronische Verarbeitung der Daten in den Schichten 1, 2 und 3 immer mehr

Bedeutung, die zwangsläufig in Architekturüberlegungen einbezogen werden muss. Außerdem werden optische Netze stärker automatisiert, um die Netzinstallation und den Netzbetrieb zu erleichtern und eine einfachere Dynamisierung zu ermöglichen.

Es ist davon auszugehen, dass neben der Hardware die zu einer optischen Netzplattform gehörende Software einen immer stärkeren Einfluss ausübt und eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Systemherstellern erlaubt. Das eröffnet eine Möglichkeit, ähnlich den Plattformkonzepten in der Automobilindustrie, Hardware in Kooperation zwischen verschiedenen System- und Komponentenherstellern im deutsch-europäischen Rahmen zu entwickeln, Kosten zu teilen und Skaleneffekte gemeinsam zu nutzen. Kandidaten hierfür sind am ehesten längerfristige Themen, da hier der akute Konkurrenzdruck am geringsten ist.

Von besonderer strategischer Bedeutung für die nächste Dekade sind drei Themenfelder, in denen sich durch Vorlauftforschung in Deutschland frühzeitig Wettbewerbsvorteile erzielen lassen:

- Photonik für den »Information Highway«
Flexible Netze mit offenem Zugang
 - Energieeffiziente, skalierbare und sichere Netz- und Knotenarchitekturen
 - Programmierbare Hochgeschwindigkeits-Netze
 - Software-definierte/kognitive Optik
- Photonik im Datencenter – Konnektivität für die »Cloud«
 - Tb/s aktive optische Kabel
 - Chip-zu-Chip-Interconnects
 - On-Chip-Photonik
- Photonik überall – Basis für neue Anwendungen
 - Optische Heim- und Bordnetze
 - Energieinformationsnetze
 - Netze für Spezialanwendungen (z. B. Gesundheit, Forschung und Lehre, Überwachung, Sensoren)

Um diese Themenfelder zu erschließen und Produktoptionen und Marktanteile zu erarbeiten, sind umfangreiche Anstrengungen in Forschung und Entwicklung in enger Kooperation von Unternehmen und Forschungseinrichtungen erforderlich. Fragestellungen und Lösungsansätze sind im Folgenden zusammengestellt:

Photonik für den Information Highway – Flexible Netze mit offenem Zugang

Energieeffiziente, skalierbare und sichere Netz- und Knotenarchitekturen:

- Skalierbarkeit von Netzen, Systemen und Knoten bis hin zu Multi-Tb/s (Kapazitäten, Nutzerzahl, Kompaktheit, Datenraten, Leistungsaufnahme, effiziente Wellenlängennutzung)
- Flexibilisierung für Energieeinsparung, Zukunftssicherheit, Management des Kapazitätswachstums
- Disruptive Ansätze für Energieeffizienz als Kernstück nachhaltiger Netze (z. B. GreenTouch-Initiative von Alcatel-Lucent Bell Labs)
- Substitution von Router-/Switch-Technologien durch energieeffizientere Ansätze
- Verbrauchsüberwachung in Netzen und Berücksichtigung der Energieeffizienz im Netzdesign
- Ausfallsicherheit und Abwehr von Netzangriffen auf verschiedenen Ebenen; Aufbau von Notfallstrukturen
- Abhörsicherheit und Sicherstellen der Datenintegrität auf niedrigster Ebene

Programmierbare Hochgeschwindigkeits-Netze mit Software-definierter/kognitiver Optik:

- Von statischen über Software-programmierbare zu kognitiven optischen Netzen (Bitrate, Reichweite, Modulation, optische Bandbreite, Spektralallokation)

- Von zentraler Steuerung über Nutzer- hin zur Anwendungskontrolle: »service-aware networking« and »networking-aware service«
- Einfache Installations- und Wartungsprozesse (Plug&Play, eingebaute digitale und optische Überwachungsfunktionen)
- Multi-Level-/Multi-Carrier-/Super-Channel-Modulation
- Steigerung der Einzelkanalrate und der Faserkapazität
- Universale, programmierbare Sender-/Empfänger-Frontends (kohärent), digitale Signalverarbeitung
- Kompakte, voll-blockierungsfreie rekonfigurierbare optische Add/Drop-Multiplexer (ROADM) mit freier Spektralallokation und Bandbreitenzuweisung
- Rauscharme optische Verstärkung
- Entzerrungsverfahren und fehlerkorrigierte Codes (Vorwärtsfehlerkorrektur – FEC)
- Photonische Integration/Silizium-Photonik

Offener, breitbandiger Zugang:

- Skalierbare Zugangsnetzarchitektur für 1 Gb/s oder mehr pro Nutzer
- Kostengünstige Massenmarkt-Komponenten für den Zugangsnetzbereich (Quantensprung in Kosten, insbesondere WDM-Komponenten, Standardisierung für Volumenproduktion)
- Photonische Integration, Aufbau und Verbindungstechnik (Motherboard-Techniken, mikro-optische Bänke, elektrische Integration)
- Abstimbare Laser mit hohem Temperaturbereich und niedrigem Leistungsverbrauch

Photonik im Datencenter – Konnektivität für die »Cloud«

- Tb/s faseroptische Interconnects: Parallelisierung (z. B. durch optische Integration und Multicore-Fasern), Mehrstufenübertragung pro Kanal, Treiber und Analog-Digital-Konverter (ADCs/DACs) mit geringer Leistungsaufnahme, universelle Interconnect-Bausteine mit programmierbarer Bandbreite/Reichweite
- Optische Chip-zu-Chip- und Intra-Chip-Kommunikation/Silizium-Photonik

Photonik überall – Basis für neue Anwendungen

Optische Heimnetze:

- Vorhandene Technologien für den Massenmarkt tauglich machen: einfache Installationstechnologien, einfache Steckertechniken, Baukastensysteme
- Neue Technologien für höhere Energieeffizienz
- Konzepte für Mehrfachnutzung des optischen Netzes z. B. für Kommunikation & Facility-Control
- Deutsche/europäische Standards – durch deutsche Referenz vorantreiben

Photonische Netze und Systeme für neue Anwendungsgebiete:

- Optische Netztechnik im Aggregationsbereich
- Energieinformationsnetze
- Kommunikationssysteme für die Medizintechnik
- Automatisierung und Maschine-zu-Maschine-Kommunikation
- Kommunikationssysteme für Verkehrsmittel (Auto, Flugzeug, Schiff)



*Foto links: Die Arbeiten an den optischen Hochgeschwindigkeitsnetzen der nächsten Generation haben bereits begonnen
© ADVA AG Optical Networking*

Foto Mitte: Skalierbare Wavelength Division Multiplexing (WDM) Systeme für maximale Bandbreite © ADVA AG Optical Networking

*Foto rechts: Backbone-Verkabelung einer Serverfarm
© Alcatel-Lucent Deutschland AG*

3.3.1.6

Rahmenbedingungen

Komplementäres Know-How und eine kritische Masse zur Erforschung und Entwicklung energieeffizienter, skalierbarer Netzarchitekturen sind in Deutschland (ggf. in Kooperation mit ausgewählten europäischen Partnern) vorhanden. Vorwettbewerbliche Kooperationen und gemeinsame Entwicklungsplattformen werden dabei effizient durch die Projektförderung des BMBF (und der EU) unterstützt. Dabei stellt jedoch die zunehmende Fokussierung auf Anwendungen und Dienste ein potenzielles Hemmnis dar. Anwendungen und Dienste sind relevante Themen, die aber eine entsprechende optische Kommunikationstechnik als Basis benötigen. Dies sollte künftig weiter Beachtung finden.

Der Schritt von vorwettbewerblicher Forschung zu einem Produkt ist kapitalintensiv und mit technischen Risiken verbunden. Hier wäre es wünschenswert, die Fördermöglichkeiten für produktnahe Entwicklung zu erweitern. Zudem sollten die steuerlichen Rahmenbedingungen für Forschung und Entwicklung in Deutschland verbessert werden. Ein vereinfachter Zugang zu Venture Capital insbesondere in der Seed-Phase ist ebenfalls erforderlich, um den Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse zu beschleunigen.

Grundsätzlich sollte die Wertschöpfungskette in Deutschland bis hin zu Komponenten erweitert werden (strategischer, selektiver Aufbau um Kernthemen). Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine internationale Arbeitsteilung bei Massenkomponten, die einen ho-

hen Arbeitseinsatz in der Produktion erfordern, nicht zu vermeiden sein wird. Entsprechend sollte der Fokus auf hochpreisige (Hochleistungs-) Komponenten gelegt werden. Ein konzertierter Ansatz dazu ist erforderlich, ggf. unter Einbindung europäischer Partner.

Im Bereich disruptiver Ansätze eröffnet die Silizium-Photonik neue Chancen. Hier wird – ergänzend zu Maßnahmen auf nationaler Ebene – eine europäische Initiative als zielführend erachtet; zudem wird die Einbeziehung eines Prozessor-Herstellers (z. B. AMD) empfohlen.

Die strategische Erschließung der genannten Themenfelder könnte durch die Schaffung eines deutschen Industrieforums (wie z. B. die Optoelectronics Industry Development Association OIDA in den USA) unterstützt werden. Ein solches Forum wäre auch eine gute Basis für ein geschlosseneres, »sichtbares« Auftreten der Industrie (z. B. Veröffentlichung von Marktdaten und »Erfolgsgeschichten«, Teilnahme an der geplanten »Zukunftsinitiative Intelligente Netze«).

Ein gemeinsames Vorgehen der deutschen Industrie ist auch im Hinblick auf die Standardisierung für optische Netze erforderlich. Diese wird gegenwärtig intensiv von den USA und zunehmend auch von China und Korea vorangetrieben. Durch verstärkte Präsenz und ein abgestimmtes Auftreten in internationalen Standardisierungsgremien wie ITU-T, IEEE und FSAN kann sichergestellt werden, dass die spezifischen Anforderungen deutscher Unternehmen und Netzbetreiber angemessen berücksichtigt und die Ergebnisse der Standardisierungsarbeit frühzeitig in wettbewerbsfähige Produkte umgesetzt werden können.

Im Bereich des breitbandigen Zugangs liegen die größten Herausforderungen beim Investitionsvolumen für die Fasern. Der Gesetzgeber sollte daher den inkrementellen Faserausbau bei Baumaßnahmen verpflichtend machen. Zudem sollten neue Teilnehmeranschlussleitungen verpflichtend in Glasfasertechnologie ausgeführt werden. Entsprechend könnte die optische Verkabelung in öffentlichen Gebäuden vorangetrieben werden (Vorbild-

charakter). Dazu ist ein nationaler Plan für den Faserausbau erforderlich.

Schlussendlich hängt Innovation an kreativen Köpfen. Es gilt daher, in Kooperation von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik attraktive Rahmenbedingungen zu schaffen, um kreative Köpfe auch aus dem Ausland anzuwerben.

3.3.2

Konvergenz von Photonik und Elektronik

Elektronische integrierte Schaltkreise haben seit ihrer Erfindung in den 70er Jahren des 20. Jahrhundert die Entwicklung unserer Gesellschaft maßgeblich geprägt. Ein einzelnes heutiges Handgerät wie Taschenrechner oder iPod beinhaltet mehr Rechenleistung als z.B. dem amerikanischen Mondfahrtprogramm zur Verfügung stand. Die Vernetzung der heutigen Gesellschaft durch Internet und Mobiltelefonie wäre ohne die rasante Entwicklung der elektronischen integrierten Schaltkreise undenkbar.

Die fortschreitende Integrationsdichte elektronischer integrierter Schaltkreise mit dem entsprechenden Kostenverfall für elektronische Funktionalitäten ist einer der wesentlichen Grundlagen für die moderne Gesellschaft und die moderne Wirtschaft. Von 1970 bis 2000 folgte diese Entwicklung exponentiellen Gesetzen: Die Taktfrequenz stieg um ca. 30 % p.a., die Anzahl der integrierten Transistoren um ca. 40 % p.a. Seit dem Jahr 2000 flacht dieses Wachstum jedoch ab. Physikalischer Hintergrund sind hier prinzipielle Begrenzungen, die das weitere Wachstum der Taktfrequenz und die pro Chipfläche abführbare Verlustleistung begrenzen. Gleichzeitig ist die maximale Fläche eines Chips (»Reticle size«) durch

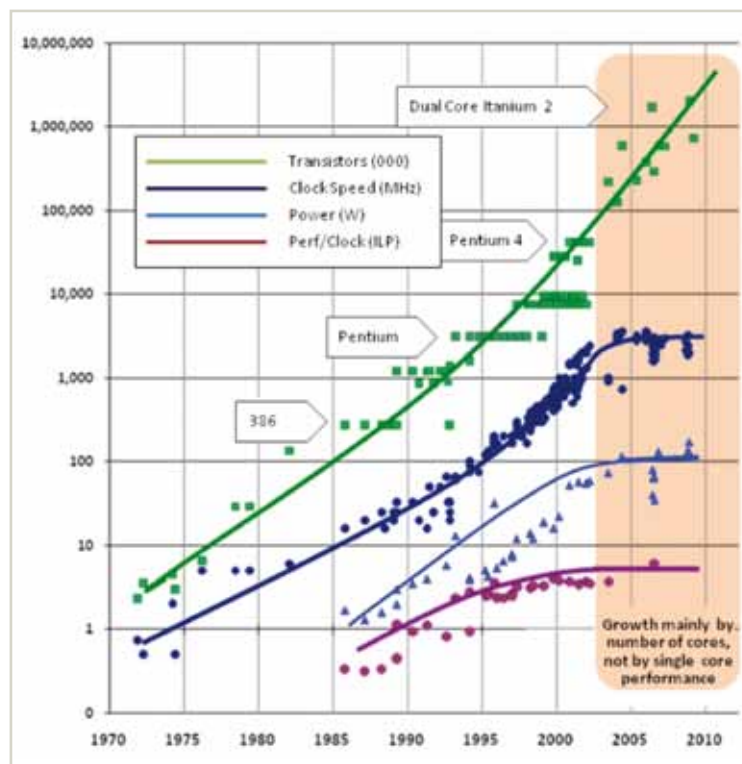
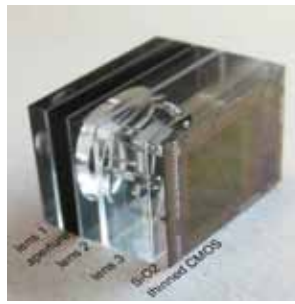
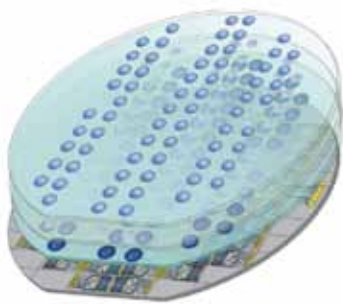


Abbildung 4: Grenzen des Wachstums bei Mikroprozessoren (Quelle: Herb Sutter, Dr. Dobbs Journal, March 2005, updated Aug 2009)

die hochkomplexe Abbildungsoptik bei der Chipherstellung begrenzt. Als Konsequenz ist seit einigen Jahren die Mehrkernertechnik der wesentliche Wachstumspfad bei Mikroprozessoren. Diese Technik stellt Anforderungen an die Datenübertragungsraten zwischen Kernen, und gleichzeitig auch Chip zu Chip oder Board zu Board, die künftig nur mit photonischen Integrationstechniken erfüllt werden können.

Die Herausforderungen, die sich daraus für die Mikro-photonik ergeben werden, sind enorm:

- Die Stückzahlen für optische Kommunikationselemente werden vom heutigen Millionen-p.a.-Bereich bis in den Milliarden-p.a.-Bereich wachsen.



Fotos oben: Prinzip der hybriden Wafer-Level 3D-Integration und so gefertigtes opto-elektronisches Modul bestehend aus drei Linsen, einer Blende (optische Komponenten) und einem CMOS-Imager (elektronische Komponente) © Fraunhofer IOF

- Die Herstellkosten werden mindestens um einen Faktor zehn sinken müssen.
- Die Design- und Herstellmethoden werden sich von der heutigen hohen Diversifikation in Richtung Standard-Designflows und Foundry-Modelle entwickeln, wie sie in der Elektronik schon lange existieren.

Die damit einhergehende Konvergenz von Photonik und Elektronik wird einer der wesentlichen Treiber für die Weiterentwicklung der Photonik, aber auch der Elektronik sein. Know-How in integrierter Mikrophotonik wird – wie heute Know-How in Elektronik – eine der Kernkompetenzen entwickelter Volkswirtschaften werden.

Neben Anwendungen in optischen Interconnects wird dieses Know-How Sensorik- und medizinische Anwendungen unterstützen, die sich heute nicht oder wegen der enormen Kosten nur in Laboren realisieren lassen. Es sind persönliche Mikro- und Nanosysteme für die medizinische Sensorik (»Lab on a chip«), z. B. für die kontinuierliche Blutzuckerbestimmung bei Diabetes, oder Labor-basierte, massiv parallele Diagnostiken denkbar, die die Entwicklung einer personalisierten Medizin, basierend auf individuellen Genomanalysen, erlauben.

3.3.2.1

Integrierte Mikrophotonik und optische Interconnects – Lösungen aus Licht

Integrierte Mikrophotonik und optische Interconnects sind Basistechnologien. Auf diesen Technologien entwickelte Anwendungen werden Beiträge zu wichtigen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Fragen leisten:

Klimaschutz und Umwelt

Optische Interconnects sind Voraussetzungen für Supercomputer der nächsten Generation. Nur mit solchen Supercomputern lassen sich die Vorhersagen von (kurzfristigen) Wetterkatastrophen und (langfristigen)

Klimaänderungen weiterentwickeln und in der Verlässlichkeit steigern. Darüber hinaus eröffnet die Nutzung optischer Datenübertragung im Intrasystembereich die Möglichkeit, derartige Supercomputer energieeffizient zu realisieren und somit dem Trend zu stark steigendem Energieverbrauch in der Informations- und Kommunikationstechnologie entgegenzuwirken. Auf integrierter Mikrophotonik basierende Sensorik erlaubt zudem eine wesentlich dichtere Erfassung umweltrelevanter Substanzen. Gegenmaßnahmen werden so früher möglich oder können ganz vermieden werden.

Produktion und Logistik

Mehrdimensionale (Bild-) Datenerfassung ist ein wesentliches Element zur Steuerung und Kontrolle automatisierter Produktionsanlagen. Die integrierte Mikrophotonik kann hier Anwendungsbereiche zugänglich machen, die ansonsten wegen ihrer Kosten verschlossen blieben.

Mobilität

Erfahrungsgemäß dauert es ca. acht Jahre, bis eine neue Computertechnologie aus dem Supercomputer-Segment bis in den Notebook-Bereich migriert. Die »Mobilmachung« rechenintensiver Anwendungen wie Bild- und Spracherkennung hat das Potenzial, die Mobilität in ihrer Wahrnehmungsfähigkeit eingeschränkter Menschen (ältere Menschen, Behinderte) zu steigern.

Life Science und Medizin

Auf integrierter Mikrophotonik basierende Sensorik kann personalisierte Rohdaten für Ferndiagnosen durch den Arzt für Ambient Assisted Living bereitstellen. Auf optischen Interconnects basierende Supercomputer werden in der medizinischen Forschung z. B. in der 3D-Rekonstruktion von Biomolekülen aus einfacheren Scandaten Anwendung finden.

3.3.2.2

Marktüberblick

Der Markt für integrierte Mikrophotonik und optische Interconnects ist nicht wegen seiner heutigen Größe sondern wegen seines Wachstumspotenzials bedeu-



tend. Der Marktanalyst CIR (2010) geht davon aus, dass bereits in 2015 der Markt für optische Interconnects 3,5 Mrd. USD betragen wird, und das ohne signifikanten Beitrag der Intrachip- oder Intra-board-connects. Nimmt man für diese beiden Bereiche 50 % des CPU-Markts an, bedeutet dies zusätzlich ca. 15 Mrd. USD p.a.

Gegenwärtig werden etwa eine Milliarde Mobiltelefone p.a. verkauft, die zu etwa 60 % über eine Kamera auf Basis von CMOS-Imagern verfügen³⁴. Etwa 70 % dieses Marktes kommt Systemen mit höheren Auflösungen von zwei bis fünf Megapixeln zu, deren Herstellung auf Wafer-Level bisher nicht möglich ist. Das anvisierte Preisziel liegt bei 1 USD pro Megapixel, so dass langfristig von einem Marktvolumen von 1,3 Mrd. USD p.a. ausgegangen werden kann. Kamerasysteme finden ebenso Einsatz in Notebooks mit einem Absatz von etwa 180 Mio. Stück p.a., was bei einer mittleren Auflösung von drei Megapixeln einem Volumen von 500 Mio. USD p.a. mit einer jährlichen Wachstumsrate von etwa 10 % entspricht³⁵.

Der Weltmarkt für Sensorik insgesamt beträgt ca. 70 bis 120 Mrd. USD³⁶. Der von Entwicklungen in der Mikro-Photonik direkt profitierende Anteil kann zu etwa 10 Mrd. USD geschätzt werden (Fa. SICK), wobei die deutsche Industrie hier im Vergleich zu den anderen Applikationen überproportional vertreten ist.

3.3.2.3

Die deutsche Position

Deutschland ist bei optischen Interconnects und der integrierten Mikro-Photonik sowie der dazugehörigen Forschung international wettbewerbsfähig. Zahlreiche kleine und mittlere Unternehmen (KMU), Universitäten und Institute besitzen komplementäres Know-How zu optischer Integration und besetzen attraktive Marktnischen.

Foto links: InP/Polymer-basierter hybrid integrierter bidirektionaler Transceiver-OEIC für Fiber To The Home © Fraunhofer HHI, ELBAU GmbH

Foto rechts: Auf gleicher Technologie basierender Wellenlängensplitter © FOC – fibre optical components GmbH

Auf *Chipebene* besitzen beispielsweise das Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) bei CMOS/SiGe-basierten elektronischen Bauelementen und das Heinrich-Hertz-Institut (FhG-HHI) bei III/V-basierten optischen und opto-elektronischen Bauelementen umfangreiche Erfahrungen. In Zusammenarbeit mit Unternehmen in Deutschland (z. B. u2t, Nokia Siemens Networks, TESAT) wurden erste Anwendungen erschlossen.

Hybridintegration auf Wafer-Ebene wurde bereits vom Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (FhG-IOF) mit der 3D-Integration auf Wafer-Level und vom Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (FhG-IZM) mit dem 3D-Chip stacking demonstriert.

Die *Polymer-basierte Hybridintegration* zeichnet sich durch vergleichsweise geringen Entwicklungsaufwand aus und ist damit auch für mittlere und kleine Stückzahlen geeignet. Diese Technologie wird vom HHI entwickelt und gemeinsam mit KMUs wie FOC, u2t und Aifotec zur Anwendungsreife gebracht.

Auf *Boardebene* sind neue Entwicklungen zur hybriden Integration optischer Interconnects auf Basis von Dünn-glas durch das IZM durchgeführt worden (in Zusammenarbeit mit Firmen wie Siemens, Würth Electronics und ERNI Electronics), wobei insbesondere die Wellenleitertechnologie und die Schnittstellenkonzepte Gegenstand der Forschungen waren.

Die Forschungsaktivitäten stehen im Wettbewerb insbesondere mit den USA. Die Förderung der DARPA³⁷ für dieses Gebiet ist signifikant, was seine strategische Bedeutung unterstreicht. In Europa existieren lediglich deutlich kleinere Aktivitäten, z. B. am IMEC³⁸ in Belgien.

³⁴ IDC, Frost & Sullivan

³⁵ IDC

³⁶ AMA Fachverband für Sensorik e.V.

³⁷ DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency, USA

³⁸ IMEC: Interuniversity Microelectronics Centre, Leuven

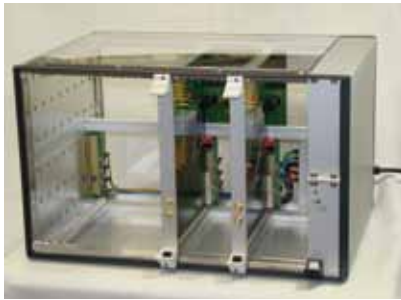


Foto links: Elektro-optischer Board-Backplane-Demonstrator mit planar integrierten optischen Wellenleitern auf Dünnglasbasis © Siemens AG

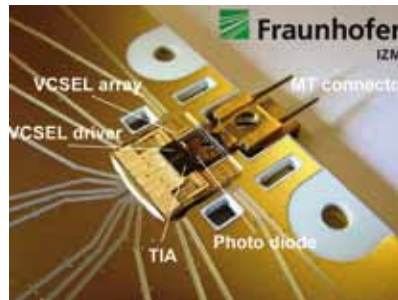


Foto rechts: Elektro-optisches 4 x 10 Gigabit pro Sekunde-Transceiver-modul auf Glasbasis mit Faserkopplung © Fraunhofer IZM

Die deutsche Position im Bereich der integrierten Mikrophotonik außerhalb der optischen Interconnects ist hervorragend, da potenzielle Partner für die Umsetzung – auch dieses Forschungsgebiet ist noch vor der Marktreife – mit großen und mittelgroßen Firmen wie z.B. SCHOTT, Jenoptik, SÜSS, Fresnel Optics und SICK am Standort bereitstehen. Insbesondere im Bereich der optischen Sensorik und Messtechnik ist Deutschland international mit führend und kann aus einer starken Marktstellung heraus neue Segmente erschließen.

Da beide Anwendungsbereiche noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen, besteht trotz starker Konkurrenz aus den USA die Chance, durch zielgerichtete Forschung und Entwicklung eine führende Position zu erlangen.

3.3.2.4

Herausforderungen

Um opto-elektronische Integrationstechniken auf breiter Front zur Anwendungsreife zu führen sind eine Reihe von Punkten zu adressieren. Da die technische Reife der Integrationstechniken recht unterschiedlich ist, werden sowohl grundlagenwissenschaftliche als auch anwendungsorientierte Fragen aufgeworfen.

Haben optische Integrationstechniken für den Weitverkehr auch Chancen für kurzreichweitige optische Interconnects? In der opto-elektronischen Integration für Anwendungen in der klassischen Datenübertragung ist bisher die monolithische, InP-basierte Integration die Technologie der Wahl. Ist diese Technologie mit den entsprechenden Anforderungen an Stückpreis und Volumen skalierbar?

Wie wird Licht in Silizium-basierten Technologien erzeugt? Vollkommen offen ist, wie in Silizium-basierten

OEICs Lichtquellen realisiert werden. Lösungsansätze wie optisches Pumpen durch InP-Chips, Wafer-Bonding mit InP-Wafern und die Realisierung aktiver Bauelemente in Silizium werden hier erforscht.

Welche Silizium-basierte Technologie eignet sich für welchen Zweck? Es existiert eine breite Vielfalt Silizium-basierter Technologieplattformen, die potenziell mit optischen Strukturen integrierbar sind. Welche Technologie (CMOS, Bipolar-CMOS, SiGe, Silicon-on-Insulator etc.) mit welcher Auflösung (40 nm ... 120 nm) kann welche Anforderungen erfüllen? Ist die Fokussierung auf eine Technologie sinnvoll?

Welche anderen Substrattechnologien auf Polymer- oder Glasbasis sind aussichtsreich? Optische Integration erfordert durchgängige photonische Packaging-Konzepte, wobei insbesondere die Fragen der Schnittstellenpräzision in Strukturierung und Aufbau- und Verbindungstechnik wie auch Zuverlässigkeit im Betrieb (Wellenlängenstabilität, Koppleffizienz) wesentlich sind.

Wie kann die Automatisierung in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) zu wettbewerbsfähigen Produktionstechniken führen? Hohe Stückzahlen für optische Kommunikationselemente bis in den Milliarden-p.a.-Bereich erfordern neue Konzepte für eine automatisierte Fertigung inkl. Designflows. Hier sind u. a. Foundry-Modelle zu diskutieren.

3.3.2.5

Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland

Von besonderer strategischer Bedeutung für die nächste Dekade sind drei Themenfelder, in denen sich durch Vorlaufforschung in Deutschland frühzeitig Wettbewerbsvorteile erzielen lassen. Hierbei dienen die Basistechnologien als Voraussetzungen für Forschung und Entwicklung zu den Anwendungsgebieten Optical Interconnects und Mikrophotonik für Sensorik und Diagnostik.



Optical Interconnects

Technologien für TB/s aktive optische Kabel (ca. 2 bis 2000 m) – Die Rechnerleistung von Servern in Rechenzentren bzw. die steigenden Kapazitätsanforderungen an Router im Internet führen zu enormen Anforderungen an die Verbindungstechnik zwischen den typischerweise mehreren tausend Servern.

Heute eingesetzte Technologien sind auf 10 Gb/s limitiert, wobei sich 40 Gb/s und teilweise auch 100 Gb/s in der Einführung befinden. Bis 100 Gb/s konnte das Kapazitätswachstum durch Parallelisierung, d.h. durch Vervielfachung von Laser, Detektor, und Glasfaser innerhalb eines Kabels erreicht werden. Für das Wachstum darüber hinaus existieren bisher keine Konzepte. Es ist absehbar, dass Techniken wie Wellenlängenmultiplexen, Multilevel- und Multiphasen-Kodierung, die heute im Kernnetz des Internets installiert sind, zukünftig ihren Weg in die Kurzstrecken finden müssen. Dies bedeutet gewaltige Herausforderungen bezüglich der Leistungsaufnahme und Kostenreduktion; es bedeutet allerdings auch für die heutigen Marktteilnehmer im Weitverkehr die Chance zur Erschließung neuer attraktiver Märkte. Kandidaten für passende Integrationstechnologien sind die Si-basierte (Hetero-) Integration und InP-basierte monolithische Integration.

Interconnects im Multichip-Modul – Die weitere Steigerung der Rechnerleistung von Prozessoren wird in erster Linie über die Anzahl der parallel rechnenden Kerne geschehen, weniger über die Steigerung der Taktfrequenz bzw. der Performance des Einzelkerns. Dies bedeutet aber gleichzeitig enorme Herausforderungen an die Kommunikation zwischen mehreren Kernen z.B. in einem Multichip-Modul.

Fotos: Optische Verkabelung in einem Supercomputer (MareNostrum, 2008). Bei einer Bandbreite von 10 Gb/s werden 5.000 optische Kabel erforderlich (1.700 je Central Switch Rack) © IBM Deutschland GmbH

Ein mögliches Konzept ist das 3D-stacking unterschiedlicher Chips, unter Einschluss einer optischen Lage. Diese Chips müssen elektrisch und optisch durchkontaktiert werden. Kandidaten für Integrationstechnologien sind Si-basierte (Hetero-) Integration und Wafer-Level-Packaging.

Intrachip Interconnects – Etwas weiter in der Zukunft liegt die komplette Realisierung der optischen Interconnects in einem gemeinsamen Chip mit der Elektronik. Hier müssen unterschiedliche Integrationskonzepte (Frontend of line, Backend of line) sowie Technologien zur Lichterzeugung in Si-basierten Materialien erforscht werden. Diese Anwendungen sind besonders interessant, da sich hier echte Synergien von Photonik und Elektronik ergeben, d. h. die Photonik kann zu einem Boost der Elektronik-Performance beitragen.

Mikrophotonik für Sensorik und Messtechnik

Das Gebiet der optischen Sensorik und Messtechnik zeichnet sich durch eine ausgesprochen große Vielfalt an Lösungen aus. Hier steht eine immer größer werdende Leistungsbreite zur Verfügung. So können durch empfindlichere Detektoren oder durch höhere Intensität der Anregung auch schwache Signale noch detektiert werden. Neue Entwicklungen wie photonische Kristalle und Lichtwellenleiterfasern mit photonischen Bandlücken oder neue Verfahren zur Herstellung diffraktiver Optiken erweitern das Potenzial optischer Sensorik und eröffnen neue Designmöglichkeiten. Mikro- und Nanosysteme auf der Basis opto-elektronischer Bauelemente bis hin zur Verschmelzung von Nanooptik und Mikroelektronik auf einem Chip sind nun der nächste, konsequente Schritt und ermöglichen Technologiesprünge im Hinblick auf Leistungsfähigkeit, Baugröße und Herstellkosten. Damit können künftig auch völlig neue Anwendungen erschlossen werden.

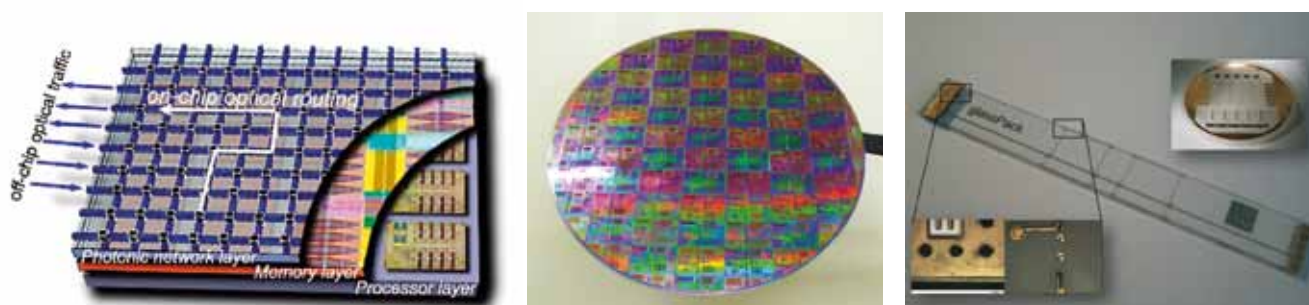


Foto links: Multikern-Prozessor mit Photonic Network Layer
© IBM Deutschland GmbH

Foto Mitte: Front-End-of-Line-Integration auf 200mm
SOI-Substraten © IHP

Foto rechts: Refraktometrischer Sensor mit integriertem
Mach-Zehnder-Interferometer in Dünnglas, hybrid integriertem
Laser und Photodioden © Fraunhofer IZM

Mikro- und Nanosysteme für die medizinische Sensorik (»Lab on a chip«) – Auto-Fluoreszenz- und Raman-Spektroskopie bei Anregung durch die Haut oder Körperhöhlen ermöglichen den Nachweis von Biomolekülen und medizinischen Wirkstoffen, z.B. für die kontinuierliche Blutzuckerbestimmung zur kontrollierten Insulinzufuhr bei Diabetes. Geeignete Sensoren einschließlich Display sollten Größen von nur einigen Quadratmillimetern besitzen, um eine direkte Applikation z. B. auf der Haut zu ermöglichen.

Labordiagnostik für die personalisierte Medizin – Individuelle Genom- und Proteomanalysen sollten personalisierte Therapieverfahren ermöglichen, erfordern aber umfangreiche Nachweise diagnostisch relevanter Wirkstoffe. Dafür müssen hochempfindliche, optische Verfahren entwickelt werden, die eine enge Kopplung mit elektrischer Auswertung erlauben. Erforderlich sind miniaturisierte Sensor-Arrays, mit denen gleichzeitig eine Vielzahl verschiedener Stoffe nachgewiesen werden kann.

Sensorsysteme für mehrdimensionales Erfassen und Messen – Die Verschmelzung von Nanooptik und Mikroelektronik auf einem Chip ist ein entscheidender Schritt hin zu Technologiesprüngen z. B. in der 3D-Messtechnik. Dort könnte z. B. eine wesentlich höhere Ortsauflösung in Verbindung mit verbesserter Energiebilanz realisiert werden. »Mehrdimensional« bedeutet dabei weit mehr als nur drei Ortsdimensionen; dazu gehören auch Farbe, Einfallswinkel, Bewegung usw. Zu neuartigen Sensorprinzipien führende Technologietreiber können hier neue mikro- und nanophotonische Verfahren und Effekte wie z. B. direkt auf den Silizium-Chip aufgebrachte plasmonische Strukturen sein.

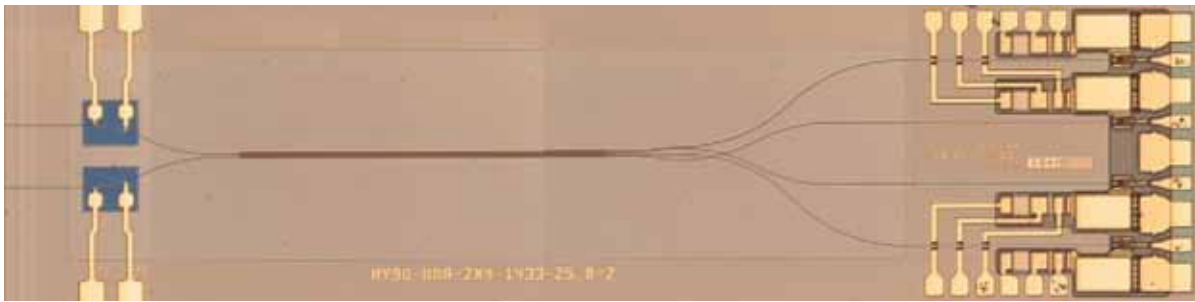
Sensorik in der Bildtechnik – Darüber hinaus ergeben sich aus der Kombination innovativer Herstellungstechnologien optischer Komponenten mit opto-elektronischen Bauelementen wie digitalen Bildwandlern und halbleiterbasierten Lichtquellen künftig neuartige Funktionalitäten mit Anwendungen der Sensorik im Maschinenbau, in dem Deutschland einen Wettbewerbsvorsprung besitzt, und in Hochvolumenmärkten wie der digitalen Bildaufnahme.

Basistechnologien für Bauelemente und Integration

Monolithische III/V-Integration – Die heutige III/V-basierte Integration ist in erster Linie vom Bedarf der optischen Datenübertragung im Bereich von 40 bis 2000 km getrieben. Die Stückzahlen liegen dementsprechend im Bereich von unter einer Million pro Jahr. Das weitere Wachstum des Internetverkehrs mit ca. 50 % pro Jahr wird hier stetig neue Herausforderungen an Integration und Fertigungsverfahren stellen. Dazu sind einerseits die Basistechnologien weiter zu erforschen, andererseits bietet eine Vereinheitlichung des Designflows und einer Aufnahme in der Mikroelektronik bewährter Design-techniken die Möglichkeit, die Entwicklung zunehmend komplexer Schaltkreise deutlich effizienter zu gestalten. Es sind, analog zur heutigen Struktur bei elektronischen ICs, Foundry-Modelle denkbar.

Der Bedarf bei kurzreichweitigen optischen Interconnects wird einen Quantensprung sowohl bei der Industrialisierung der monolithischen III/V-Integration, als auch bei der Reduktion der Leistungsaufnahme pro optischer Funktionalität erfordern.

IV-basierte Heterointegration/Silizium-Photonik – Das wesentliche Potenzial der IV-basierten (Hetero-) Integration liegt in der Reife und der Volumenfähigkeit der zugrundeliegenden Technologien. Die Integration optischer Funktionalitäten kann beginnen mit der Entwicklung einer CMOS-Komponente mit integrierter Lichtquelle (LED oder Laser), z. B. für spektroskopische Anwendungen. Weiterhin ist eine Integration schneller



optischer Empfänger (Photodioden und Wellenleiternetzwerk) auf einem Silizium-Chip für den Empfang hoher Datenraten und eine vollständige Integration eines Intrachip-Transceivers aus Emitter, Modulator, Wellenleiter und Detektor auf einer CMOS-Plattform denkbar. Neben der CMOS-Plattform sind auch SiGe, Bipolar-CMOS, oder Silicon-on-Insulator (SOI) potenzielle Kandidaten für eine Silizium-basierte Integration. Die breite Vielfalt der Möglichkeiten lässt eine Fokussierung und Koordinierung der deutschen Forschungsaktivitäten sinnvoll erscheinen.

Hybridintegration und Wafer-Level-Packaging – Als ein Erfolg für die Hybridintegration von Photonik und Elektronik sind digitale Bildaufnahmesysteme zu nennen, die die zuvor etablierte Analogtechnik nahezu vollständig abgelöst haben. Preiswerte CMOS-Bildwandler haben Bildaufnahmesysteme für Anwendungen in Mobiltelefonen, Personal Digital Assistants (PDA), Notebooks und in der Endoskopie ermöglicht. Den opto-elektronischen Systemen wurde damit ein völlig neuer Hochvolumenmarkt von mehreren 100 Millionen Stück pro Jahr erschlossen. Der Wettbewerb in diesem Marktsegment wird von Themen wie Kosten, Miniaturisierung und Auflösung bestimmt.

Zur Verringerung der Herstellungskosten muss künftig die Fertigung der opto-elektronischen Systeme im Vielfachnutzen, d. h. parallelisiert auf Wafer-Level und damit kompatibel zu den Herstellungsverfahren der Mikroelektronik, vorangetrieben werden, entsprechend einer hybriden 3D-Integration der optischen (Linsen/Filter/Blenden) und elektronischen (CMOS-Imager) Komponenten als einem »photonic system on a chip«. Neben dem Wegfall der manuellen Assemblierung der Komponenten wird ein weiterer wesentlicher Vorteil der Übergang zu immer weiter miniaturisierten opto-elektronischen Subsystemen sein, der die Realisierung neuartiger mehrdimensional messender Sensorprodukte in sehr kompakter Bauform für komplexe Messaufgaben ermöglicht.

Foto: Monolithisch integrierter phasensensitiver Empfangs-OEIC (Optoelectronic Integrated Circuit) © Fraunhofer HHI, u2t Photonics AG

3.3.2.6

Rahmenbedingungen

Ein erfolgreiches Erschließen des jungen Themenfeldes integrierte Mikrophotonik und optische Interconnects in der nächsten Dekade erfordert ein abgestimmtes Vorgehen der Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik in Deutschland. Dabei ist eine bundesweite Vernetzung in den einzelnen Forschungsfeldern anzustreben.

Die breite Vielfalt an Silizium-basierten Technologieplattformen verlangt eine Fokussierung. Um Kompatibilität und auch mögliche Synergien ausschöpfen zu können, ist es empfehlenswert, Technologielinien auszuwählen und gezielt voranzutreiben. Hier könnte das BMBF im Rahmen der Projektförderung Leitlinien festlegen und als Katalysator wirken. Ein Wettbewerb der Technologielinien könnte durchgeführt werden, um dann im Weiteren die Verbundforschung auf besonders vielversprechende Plattformen auszurichten. Damit würde zugleich die erforderliche thematische Fokussierung der Forschungseinrichtungen in Deutschland vorangetrieben.

Grundsätzlich sollte die Projektförderung von Technologielinien mit marktnaher Ausrichtung erfolgen. Hier sollte auf bestehenden Kooperationen von Unternehmen und Forschungseinrichtungen aufgebaut werden. Aufgrund der Komplexität der notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollte für entsprechende Fördermaßnahmen ein längerfristiger Rahmen (oberhalb von drei Jahren) ermöglicht werden, um das Technologiefeld strategisch zu entwickeln.

Foundries für Basistechnologien (z.B. III-V, Silizium-Photonik) mit einem Designflow analog zur CMOS-Welt würden die Kräfte konzentrieren und die Entwicklung der entsprechenden Basistechnologien erheblich beschleunigen. Möglichkeiten zur Einrichtung solcher



Foto links: Blaue Laserdiode für die mobile Projektion
© OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Foto Mitte: Direkt grün emittierende Laserdiode – ein Meilenstein für die mobile Laserprojektion © OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Foto rechts: 3D-Konturerfassung mittels Streifenprojektion
© ITO, Universität Stuttgart

Foundries sollten daher geprüft werden, ggf. unter Einbeziehung europäischer Partner. Analoges gilt für ein Applikationszentrum für Hybrid-Technologie, das im Rahmen eines Public-Private-Partnership-Modells errichtet werden sollte, um den Ergebnistransfer von den Forschungseinrichtungen zu den Unternehmen zu beschleunigen.

Die bisher fragmentierten Anbieter von Einzellösungen für kompakte Wafer-Level-Sensorik (z.B. SÜSS, SCHOTT, Jenoptik, OSRAM, Fresnel Optics, c2v, X-FAB) und die beteiligten Forschungseinrichtungen (z.B. IOF, IZM, Universität Jena) sollten im Rahmen neuer Technologieentwicklungen zu einem Cluster zusammengeführt werden. Im Hinblick auf standardisierte Lösungen wären hier Plattformtechnologien anzustreben.

Gelingt eine Konzertierung aller Partner im vorwettbewerblichen Bereich, so bestehen gute Chancen, in Forschung und Entwicklung auch künftig international eine Spitzenposition zu besetzen und neue Marktoptionen für Unternehmen in Deutschland zu erschließen.

3.3.3

Bilderfassung und Visualisierung

»Ein Bild sagt mehr als tausend Worte.« – Dieser Satz beschreibt die Macht der Bilder, ihre Fähigkeit, komplexe Inhalte oder Sachverhalte schnell und einfach zu vermitteln.

Die rasanten Fortschritte in der Fotografie haben die Möglichkeiten der Bilderfassung und Visualisierung deutlich erweitert. Mit der Einführung digitaler Bildsensoren in den 70er Jahren, dem Erscheinen digitaler

Consumer-Kameras in den 80er und der Entwicklung des Internets in den 90er Jahren sind wir nun in einer Gesellschaft angekommen, in der Bilderfassung und Visualisierung eine zentrale Rolle einnehmen. Unterstützt wird diese Entwicklung durch technologische Fortschritte in vielfältigen Bereichen wie z.B. Rechenleistung, Datentransfer, Miniaturisierung im Gerätebau oder Beleuchtungstechniken, denn nur das Zusammenspiel dieser Disziplinen ermöglicht nachhaltigen Erfolg.

Fortschritte bei Bilderfassung und Visualisierung bestimmen in erheblichem Maße die Entwicklungen der großen Trends unserer Zeit mit. Neue Halbleiterlichtquellen und hochintegrierte Miniprojektoren sind die technologische Basis für die mobile Laser- und LED-Projektion in Mobiltelefonen und Laptops und unterstützen den gesellschaftlichen Trend zu mobiler Visualisierung von Informationen.

3.3.3.1

Bilderfassung und Visualisierung – Lösungen aus Licht

Gesellschaftliche Trends und Herausforderungen, zu denen die Informationsverarbeitung, insbesondere durch Bilderfassung und Visualisierung, wichtige Beiträge liefert, werden nachfolgend zusammengefasst.

Gesundheit

Die Gesellschaften der Industrienationen werden zunehmend älter. Themen der Gesundheit und Kosten des Gesundheitssystems treten immer stärker in den Vordergrund. Neue bildgebende Verfahren in der Medizintechnik ermöglichen frühere und bessere Diagnosen sowie (teil-) automatisierte Behandlungsmethoden und tragen so zum Erhalt der Gesundheit bei.

Mobilität

Mobilität und sicherer Verkehrsfluss sind Kennzeichen einer modernen Gesellschaft. Sie bilden die Grundlage für weiteres Wirtschaftswachstum. Bildgebende Verfahren als Basis für Assistenzsysteme erhöhen die Mobilität und steigern die Sicherheit und Lebensqualität der



Verkehrsteilnehmer. Vernetzte Fahrzeuge helfen, den Verkehrsfluss zu optimieren; Bilderfassung und Visualisierung sind eine Grundlage künftiger Verkehrsleitsysteme. Unterstützt werden müssen diese Technologien durch Entwicklungen bei Mensch-Maschine-Interfaces, die eine sichere und intuitive Nutzung der neuen Mobilitätsfunktionen gewährleisten.

Neue Halbleiterlichtquellen ermöglichen eine einzigartige Miniaturisierung von Piko-Projektoren und deren Integration in Mobiltelefone, Laptops etc. Dies entspricht den Anforderungen der Menschen in einer zunehmend mobilen Gesellschaft. Aktuelle Trends gehen zu höherer Auflösung (XGA und HD), mehr Farbe, geringerem Bauraum und Energieverbrauch zu deutlich geringeren Kosten.

Sicherheit

Das Bedürfnis der Menschen nach Sicherheit steigt. Dies betrifft verschiedenste Aspekte: Sicherheit von Staaten, Grenzen, Veranstaltungen oder Gebäuden, aber auch den Schutz des Menschen in potenziell gefährlichen Situationen. Frühzeitige und (halb-) automatisierte Erkennung und Analyse von Gefahren hilft, dem Grundbedürfnis Sicherheit nachzukommen.

Energie und Umweltschutz

Neben ihrem Nutzen für die Umwelt haben sich Technologien zum schonenden Umgang mit Ressourcen zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor entwickelt. Bei der effizienten Visualisierung mit neuen Halbleiterlichtquellen treffen sich die Anforderungen mobiler Geräte wie Kleinstprojektoren nach geringem Energieverbrauch mit den Bedürfnissen des Umweltschutzes.

Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

IKT ist als Querschnittstechnologie heute integraler Bestandteil fast aller Branchen sowie des privaten Bereiches. Der zunehmende Einsatz mobiler IKT und immer komplexere Interaktionsformen erfordern neue Mensch-Maschine-Interfaces z.B. für die Gestenerkennung und neue Formen der Visualisierung wie z.B. 3D-Darstellungen.

Foto links: Nachtsichtsysteme erhöhen die Sicherheit im Straßenverkehr © Continental Automotive GmbH

Foto Mitte: Fahrerassistenzsysteme erkennen Gefahren frühzeitig © BMW AG

Foto rechts: Head up Display – mittels Laser werden Informationen in das Sichtfeld des Fahrers projiziert © Blaupunkt GmbH & CO. KG

Produktion

Die Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist eine Grundlage unseres Wohlstands. Innovationen bei der Prozesskontrolle, Qualitätssicherung und Automatisierung helfen, die Wettbewerbsfähigkeit unseres Standorts zu sichern. Hierzu tragen automatisierte Mess- und Visionssysteme entscheidend bei. Zunehmend komplexere Aufgaben erfordern weitere Innovationen in der bildgebenden Sensorik.

Freizeit/Entertainment

Freizeitgestaltung nimmt einen immer wichtigeren Stellenwert in unserer Gesellschaft ein, verbunden mit einem steigenden Bedürfnis nach Information und Kommunikation über Multimedia-Displays und -Geräte. Liegt der Schwerpunkt heute noch auf der 2D-Darstellung von Bildern und Filmen, so gewinnt doch die 3D-Projektion zunehmend an Bedeutung. Zugleich wächst der Bedarf an Geräten für die mobile Projektion. Hier ergeben sich neue technologische Herausforderungen und neue Marktoptionen.

3.3.3.2

Die deutsche Position

Im Bereich der Bilderfassung und Visualisierung besteht bei Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Deutschland eine sehr gute technologische Basis, eine Voraussetzung auch für den künftigen Erfolg. Besondere Stärken liegen in Anwendungsbereichen wie Medizintechnik, Maschinenbau, Sicherheitstechnik und Automotive (z.B. Bosch, Continental, Siemens). Bei Komponenten und Baugruppen hat Deutschland starke Kompetenzen z.B. in der Beleuchtungstechnik und der abbildenden Optik sowie im Systemdesign. Großunter-

nehmen (z. B. Jenoptik, LINOS, OSRAM, Zeiss) besitzen einen breiten Marktzugang, kleine und mittlere Unternehmen (z. B. HOLOEYE) agieren erfolgreich in Nischenmärkten. Dagegen liegen Schwächen im Bereich der großvolumigen Kommunikations- und Unterhaltungselektronik und der darin enthaltenen optischen Systeme. Obwohl auch hier technologische Kompetenz vorhanden ist, fehlen große »Player«. Es gilt daher, Entwicklungen in Deutschland zu fokussieren und Stärken auszubauen. Dies erfordert eine enge Kooperation der Hersteller von Komponenten und Baugruppen mit den Systemherstellern aus den Leitindustrien Medizintechnik, Maschinenbau, Sicherheitstechnik und Automotive.

3.3.3.3

Herausforderungen

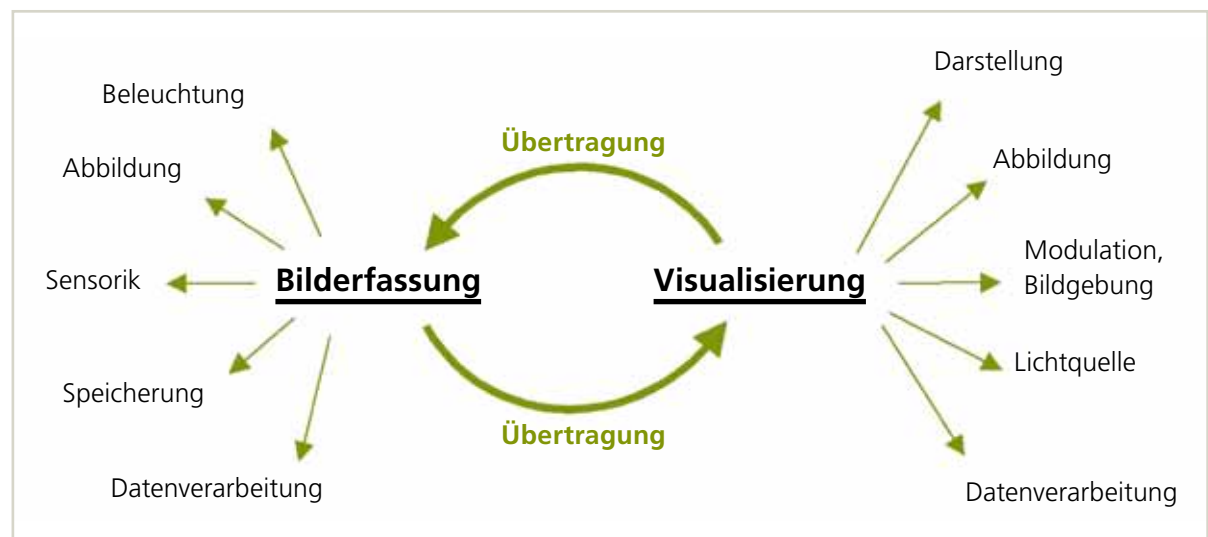
Um Innovationen in der Bilderfassung und Visualisierung hin zu deutlich kompakteren, energieeffizienteren und kostengünstigeren Geräten für die, insbesondere auch mobile, 2D- und 3D-Darstellung voranzutreiben, müssen neue oder verbesserte Technologien in allen (Teil-) Bereichen entwickelt werden. Dies erfordert abgestimmte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der

Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft entlang der gesamten Technologiekette.

Die Bilderfassung benötigt eine geeignete Beleuchtung des Objekts. Mittels einer abbildenden Optik wird das vom Objekt kommende Licht auf einen Sensor abgebildet, oft ein CCD- oder CMOS-Sensor. Die dort erzeugten Daten müssen dann verarbeitet und gegebenenfalls gespeichert werden. Um zu einer Visualisierung eines Bildes zu kommen, bedarf es in der Regel einer Datenübertragung an das Visualisierungssystem. Dort wird nach einer spezifischen Datenverarbeitung das Licht einer geeigneten Quelle moduliert und durch eine abbildende Optik mittels eines Mediums dargestellt.

Damit ergeben sich technologische Fragestellungen und Herausforderungen in den folgenden Technologiefeldern:

- Lichtquellen/Beleuchtungen
- Abbildende Systeme
- Sensorik/Modulation
- Hardware-nahe Datenverarbeitung



Zudem müssen ggf. neue Lösungsansätze für die Datenübertragung frühzeitig Berücksichtigung finden.

3.3.3.4

Handlungs- und Forschungsfelder in Deutschland

Aus den zunehmenden Anforderungen an Energieeffizienz und Mobilität, verbunden mit den aktuellen Markt- und Consumer-Trends hin zu Miniaturisierung und erhöhter Funktionalität bis hin zur 3D-Darstellung ergibt sich dringender Handlungsbedarf für die Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Deutschland. 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. Diese Handlungsfelder fassen wesentliche Trends und Entwicklungen zusammen. Mit abgestimmten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hierzu im vorwettbewerblichen Bereich kann die starke deutsche Position im Bereich der Bilderfassung und Visualisierung nachhaltig gesichert und weiter ausgebaut werden. Die Märkte der Zukunft werden durch gesellschaftliche Trends und Leitthemen definiert. Gezielte technologische Fortschritte durch Forschung und Entwicklung in den nachfolgend dargestellten Bereichen werden den wirtschaftlichen Erfolg in diesen Zielmärkten ermöglichen. Dabei muss die Forschung in enger Abstimmung von Unternehmen und Forschungseinrichtungen an den Erfordernissen des Marktes ausgerichtet werden, damit Technologie-Know-How in Deutschland in kommerziellen Erfolg umgesetzt werden kann.

2D/3D-Bilderfassung

Die Erfassung von Bilddaten wird zukünftig 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. Im Folgenden werden technologische Fragestellungen exemplarisch in Bezug zu gesellschaftlichen Trends und Leitthemen zusammengestellt.

Gesundheit – In der Medizintechnik werden Zusatzinformationen die Grundlage für eine verbesserte Diagnostik liefern und neue Anwendungen wie Fernbehandlung oder automatisiert geführte Therapieeingriffe ermöglichen. Ein wesentliches Ziel dabei ist es, Diagnosen mit deutlich verbesserter Auflösung und einem höheren Automatisierungsgrad als heute in Echtzeit zu erstellen. Weitere Anwendungsfelder werden durch kostengünstigere und kompaktere Geräte erschlossen werden, z. B. auch für den mobilen Einsatz.

Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den folgenden Aspekten:

- Automatisierte optimierte Bildaufnahme mit reduzierter Komplexität für den Benutzer
- Kombination verschiedener Bildgebungsverfahren in der Diagnostik (optisch abbildend, spektroskopisch, multispektral, optische Kohärenztomographie etc.)
- Datenfusion und Verarbeitung großer Datenmengen (Aufnahme, Transfer, Analyse, Kompression, Archivierung, Verlaufsanalyse)
- Intelligente Datenverarbeitung (Defekterkennung und -klassifizierung, selbstlernende Systeme, Datenreduktion)
- Optimierung und Rekonstruktion von Bildern mit starker Streulicht-Degradation
- Bildverbesserung bei Bewegungsunschärfe, robustes Echtzeit-Tracking
- 3D-Bildgebung mit Echtzeit-Navigation und echtzeitfähiger ROI (Region of Interest) bzw. Zoom mit verbesserter Auflösung

Produktion – Verbesserte Wirtschaftlichkeit und (Energie-) Effizienz von Produktionsprozessen ist eine Voraussetzung dafür, am Standort Deutschland Arbeitsplätze zu sichern und neu zu schaffen. Genaue Prozesskenntnis und -kontrolle sowie effiziente Qualitätssicherung werden mehr und mehr zu einer Grundvoraussetzung für eine wettbewerbsfähige Fertigung. Insbesondere für Produkte in künftigen Leitmärkten der Energie- und Umwelttechnik (z. B. Batterien für Elektrofahrzeuge, Photovoltaik-Systeme), ist eine verbesserte Wirtschaftlichkeit von außerordentlicher Bedeutung. Unterstützt wird diese durch mobile Aufnahme- und Messsysteme und robuste, echtzeitfähige Inline-Prozessmesstechnik. Hierbei sind die klassischen Mess- und Sensorfunktionen zu kombinieren und zu erweitern, unterstützt durch eine angepasste Datenverarbeitung.

Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den folgenden Aspekten:

- »Messende Werkzeuge«, Integration von »embedded sensors«
- Kombination verschiedener Sensoren (optisch abbildend, spektroskopisch, mechanisch/taktil etc.)
- Adaptive flexible Messtechnik (Serienvarianten, einfache Anpassung an Umweltparameter etc.)
- Datenfusion und Verarbeitung großer Datenmengen
- Intelligente Datenverarbeitung
- Multiskalige Messtechnik (Erfassung globaler Formtreue bis hin zu Mikrodefekten)

Freizeit/Entertainment – In den vergangenen Jahren gab es immer wieder vereinzelte Vorstöße der Filmindustrie, in den 3D-Bereich vorzustoßen, jedoch blieb der nachhaltige Durchbruch aus. Für die Zukunft stellt sich dies jedoch anders dar, da sowohl im Kinobereich als auch im Sport erfolgreiche 3D-Projekte umgesetzt wurden. Auch im Spiele-Segment eröffnet die Bilderfassung in 3D durch Gestenerkennung neue Konzepte und Möglichkeiten. Intuitive Bedienung wird aus dem Frei-

zeitsektor auch in andere Bereiche übertragen werden können, in denen neue Interaktionsformen notwendig oder hilfreich sind. Ein Beispiel stellt die Nutzung des Internets beim Autofahren dar. Die Kombination von Sensorik und Projektion erscheint ebenso vielversprechend.

Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den folgenden Aspekten:

- 3D-Aufnahmetechniken und Lichtquellen
- Kombination von Sensorik und Projektion
- Miniaturisierung der Sensorik
- Integrierte Mikro-Kameramodule
- Verbesserte Mensch-Maschine-Schnittstellen, Sensorik und Displays mit User-Interface
- Leitapplikation »intelligentes Haus«

Basistechnologien – Zahlreiche neue technologische Ansätze oder Verbesserungen verfügbarer Technologien auf der Ebene der Komponenten oder Methoden werden Einfluss auf verschiedene Anwendungsbereiche haben und diese voranbringen. Forschungsbedarf bei den Basistechnologien besteht insbesondere zu den folgenden Aspekten:

- Beleuchtungskomponenten
 - Höhere Leistungen und Effizienz bei Lichtquellen (LEDs, Laser)
 - Infrarot-LEDs höchster Brillanz
 - Temperaturstabile Laser
 - Multichannel-LEDs
 - Low-cost Laser und LEDs für die 3D-Bilderfassung und Sensorik
 - Homogenisierte Lichtquellen (refraktive und diffraktive Optiken)
- Systeme
 - Miniaturisierte hochintegrierte Systeme
 - Wafer-Level-Kameras
 - »Array optics«

- Sensoren mit höchstem Dynamikbereich und geringem Rauschen
- Bildgebende Sensorik im nahen Infrarot-Bereich jenseits der 1000 nm
- Bildgeber-Sensor-Kombinationen
- neue Aufnahmetechniken (größere Farbräume etc.)

■ Methoden

- Kostengünstige, volumentaugliche Aufbau- und Verbindungstechnik
- Restaurationsalgorithmen
- Datenkompression
- Strukturierte Beleuchtung
- Gestenerkennung mit 3D-Sensorik
- Standardisierung von 3D-Bildern und Schnittstellen

Mobile 2D/3D-Visualisierung

Die Visualisierung von Bildinhalten wird sich in den kommenden Jahren mit hoher Dynamik weiterentwickeln. Durch die zunehmende drahtlose Verfügbarkeit von Informationen und die fortschreitende Miniaturisierung in der Gerätetechnik wird sich insbesondere die Bedeutung mobiler Anwendungen erhöhen. Dabei ist davon auszugehen, dass eine Erweiterung der Darstellung von Bildinhalten über klassische 2D-Displays, wie z.B. Flüssigkristallbildschirme, hinaus erfolgen wird. Möglichkeiten ergeben sich hier durch die Projektion virtueller Bilder sowie durch Techniken der 3D-Darstellung.

Mobilität und Sicherheit – Die Mobilität von Waren und Menschen bildet das Rückgrat unserer modernen Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft. Deutschland ist durch seine starke Automobilindustrie entscheidend an der Sicherstellung der Mobilität, auch in anderen Ländern, beteiligt. In modernen Fahrzeugen halten vermehrt Assistenzsysteme Einzug, die den Fahrer unterstützen und seine Entscheidungen vorbereiten. Allerdings stellt die Übermittlung der Information an den Fahrer oft selbst ein Risiko dar, da dieser den Blick auf

Armaturenbrett oder Mittelkonsole richten muss. Abhilfe schaffen hier Head-up-Displays. Sie erlauben eine Informationsvermittlung, ohne dass der Fahrer den Blick von der Straße abwenden muss. Wird die Darstellung noch durch Zusatzinformationen angereichert, wie zum Beispiel Nachtsichtbilder, graphisch dargestellte Bremswege oder weitergehende Verkehrsinformationen, so kann durch diese erweiterte Realität (Augmented Reality) z.B. auch die Mobilität älterer Menschen erhalten werden. Dies wird in unserer zunehmend alternden Gesellschaft von großer Bedeutung für Sicherheit und Lebensqualität sein.

Das Konzept der »Augmented Reality«, die durch visuelle Zusatzinformationen erweiterte Realitätswahrnehmung, wird künftig auch in anderen Bereichen an Bedeutung gewinnen: z.B. zur Hilfestellung bei komplexen Aufgaben im Design, bei der Wartung von Maschinen und Anlagen oder in der Medizin zur besseren Operationsführung. Eine Grundvoraussetzung dafür sind mobile Systeme für die 2D/3D-Visualisierung.

Mobilität und Freizeit/Entertainment – Im Verlauf der letzten 15 Jahre ist die mobile verbale Kommunikation eine Selbstverständlichkeit geworden. Neue Generationen der Mobiltelefone, die sogenannten Smartphones, vereinen heute bereits eine Vielzahl von Funktionen in einem Gerät: Kamera, MP3- und MPEG-4-Player, Internetzugang, Kalender, Spielkonsole etc. Die Vielfalt an Funktionen stellt neue Anforderungen an die Displays dieser Geräte. So erscheint es auf Dauer nicht attraktiv, zunehmend komplexe Inhalte auf Mini-Displays darzustellen. Die Integration eines lichtstarken und energieeffizienten Kleinstprojektors ist hier die Lösung. International gibt es umfangreiche Aktivitäten zur Entwicklung solcher Piko-Projektoren. Deutsche Unternehmen sind bei Komponenten und (Sub-) Systemen gut positioniert und können durch schnelles Handeln Wettbewerbsvorteile erarbeiten.

Nach der erfolgreichen Etablierung des 3D-Kinos durch Blockbuster-Filme wie »Avatar« wird sich auch der Bedarf

an 3D-Fernsehern steigern. Erste Modelle sind bereits auf dem Markt erhältlich. Hier wird es darauf ankommen, ob der heutige Stand der Technik, Shutter- bzw. Polarisationsbrille, eine breite Akzeptanz beim Zuschauer erhalten wird. Alternative Entwicklungen basierend auf Holographie und Autostereoskopie bieten neue Chancen für deutsche Unternehmen.

Basistechnologien – Die mobile Visualisierung von 2D- und 3D-Bildinformationen bringt zahlreiche neue Fragestellungen mit sich. Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den folgenden Aspekten:

■ Beleuchtung

- Höhere Leistung und Systemeffizienz der RGB-Halbleiter-Lichtquellen (Rot-Grün-Blau):
 - RGB-Laser (Einzelemittler und Arrays), grüne Laserdioden
 - Verbesserung der Helligkeit und Temperaturbeständigkeit von LEDs, (insbes. bei Grün und Rot), Verbesserung der Konversionseffizienz
 - Hinterleuchtung neuartiger LCD-Technologien (z. B. »Blue Phase«) mit farbangepassten und effizienten LEDs
- Neue Herstellungsverfahren und Packages für Low-cost LEDs und Laser
- Neue Herstellungsverfahren für Low-cost Mikrooptik und hocheffiziente Elektronik (anwendungsspezifische integrierte Schaltungen – ASICs)
- Gerichtete/polarisierte Emission bei LEDs für Bildgeber und Hinterleuchtung

■ Abbildung

- Achromatische Mikrooptik
- Optische Freiformflächen: Herstellung, Vermessung und Montage
- Großformatige temperaturstabile Kunststoffoptiken
- Kostengünstige Realisierung von Antireflexverhalten

■ Bildgebung/Strahlformung

- Low-cost 2D-Imager mit kleiner Bauform, höheren Auflösungen und geringerem Energieverbrauch
- Mikro-elektromechanische Systeme (MEMS) für Laserprojektion mit höherer Auflösung
- Displays als Lichtquelle (LED-Chips hybridintegriert mit CMOS)
- Speckle-Reduktion bei Laserprojektion

■ Systeme und Methoden

- Ultrakompakte hochintegrierte Projektionseinheiten: Hybride und monolithische Integration von Lichtquelle/Bildgeber/Optik/Elektronik; »projector on a chip«
- Augmented Reality: Near-to-eye-Projektion, Head-up-Projektion
- Standardisierte Dateninterfaces
- Bidirektionale Displays/Kameras
- Virtuelle und reale 3D-Projektion (holographische Laserprojektion, Autostereoskopie etc.)

Intelligente Sensorfusion

Das Themengebiet »intelligente Sensorfusion« subsumiert neue Messstrategien, die über den Bereich der 2D/3D-Bilderfassung hinausgehen. Eine Triebfeder hierzu ist das steigende Bedürfnis nach Sicherheit, welchem durch verbesserten Informationsgewinn nachgekommen werden kann. Informationen stehen dabei heute oft in zunehmender Detaillierung und Komplexität zur Verfügung. Auf der Basis dieser Informationen müssen Entscheidungen, ggf. von großer Tragweite, sehr schnell getroffen werden. Die Entscheidungen müssen somit zuverlässig und belastbar sein. Der Begriff »Sicherheit« lässt sich in diesem Zusammenhang auf verschiedene Anwendungsfelder beziehen, wie z.B. Gefahrstofferkennung, Überwachung von Grenzen, Infrastruktureinrichtungen oder Großveranstaltungen, Verkehrsüberwachung und -lenkung oder auch Überwachung der Lebensmittelsicherheit. Dementsprechend vielfältige Lösungsansätze müssen verfolgt werden, um den unterschiedlichen Anwendungen gerecht zu werden. Ih-

nen gemeinsam ist die Verknüpfung unterschiedlicher Aufnahmekanäle zu komplexen Sensorsystemen. Dabei wird auch über die reine Bilderfassung hinausgegangen.

Forschungsbedarf besteht insbesondere zu den folgenden Aspekten:

- Aufnahme und Verarbeitung großer Mengen an Bilddaten und die schnelle Navigation darin
- Multispektrale Datenaufnahme in mehreren Kanälen für ganzheitlichen optimierten Informationsgewinn je nach Objekttyp oder Ziel der Beobachtung (Tag/Nacht, sichtbarer Spektralbereich/Infrarot/Radiofrequenz, Time-of-Flight-Signale etc.)
- Datenfusion aus mehreren Aufnahmekanälen
- Bildverbesserung für erhöhten Informationsgewinn (Auflösung, automatische Kontrastoptimierung, Restauration von Bewegungsunschärfe etc.)
- Flexible automatisierte Bildaufnahme (Panorama/Region of Interest, Tracking, Kompensation der Helligkeitsdynamik etc.)
- Schnelle Datenauswertung (Segmentierung, Spektralinformation, Merkmalerkennung, Klassifizierung, Bewegungsdetektion, Gefahrenerkennung etc.)
- Selbstkonfigurierende Systeme, die sich auf wechselnde Bedingungen einstellen

3.3.4

Zusammenfassung

Aus der Welt der Erfassung, Verarbeitung, Übertragung und Visualisierung von Informationen ist das Photon heute nicht mehr wegzudenken. Das Internet wurde in den letzten Jahren zu einer wegweisenden Technologie für die Freizeit, für Unternehmen und im Kampf für Demokratie. Nur mit Licht können wir die Datenmengen bewältigen, die dafür nötig sind.

Unternehmen in Deutschland wie z. B. ADVA und Nokia Siemens gehören bei photonischen Kommunikationsnetzen international zu den Top-Playern, kleine und mittelständische Unternehmen besetzen erfolgreich Marktnischen. Bei der integrierten Mikro photonik hat Deutschland starke Marktpositionen vor allem in der optischen Sensorik und Messtechnik. Im Bereich der Bilderfassung und Visualisierung liegen unsere Stärken bei Komponenten und Baugruppen, z. B. in der Beleuchtungstechnik und der abbildenden Optik (u. a. LINOS, OSRAM, Zeiss); Leitmärkte sind Medizintechnik, Maschinenbau, Sicherheitstechnik und Automotive (z. B. Bosch, Continental, Siemens).

Photonische Kommunikationsnetze sind das Rückgrat unserer vernetzten Gesellschaft. Zukünftig wird ihre Bedeutung weiter zunehmen: Allein der globale IP-Verkehr steigt mit einer Rate von mehr als 50 % pro Jahr. Dieses Wachstum lässt sich nachhaltig und zukunftssicher nur mit der Verlegung von Glasfasern bis zum Endkunden bewältigen. Die nahezu unbegrenzte Bandbreite macht die Glasfaseranbindung zu einem wichtigen Standort- und Wettbewerbsfaktor. Der Trend, Datenspeicherung, Applikationen und Rechnerkapazität zunehmend aus einer verteilten Datencenter-»Cloud« zu beziehen, stellt zudem neue Anforderungen an optische Hochgeschwindigkeits-Netze hinsichtlich Flexibilität, Skalierbarkeit und Energieeffizienz. Auch innerhalb des Datencenters wird

der Einfluss photonischer Technologien weiter steigen – angefangen bei optischen Interconnects über Chip-zu-Chip-Verbindungen bis hin zur On-Chip-Photonik. Und auch in neuen Anwendungsfeldern wie Smart Grids oder e-health ist photonische Netztechnik erforderlich, um eine sichere und zuverlässige Infrastruktur zu gewährleisten.

Der steigende Bandbreitebedarf ist der Motor der Entwicklung photonischer Netze. Er treibt die Netztechnik in neue Anwendungs-/Netzbereiche und erfordert neue Netz-, System- und Komponententechnik. Kurzfristig steht die Erforschung neuer optischer Zugangsnetztechniken im Fokus. Schlüsseltechnologien auf der Komponentenseite werden die photonische und die optisch-elektronische Integration sein. Optische Netze müssen in Zukunft stärker automatisiert werden, um die Netzinstallation und den Netzbetrieb zu erleichtern und eine einfachere Dynamisierung zu ermöglichen.

Von besonderer strategischer Bedeutung für die nächste Dekade sind hierbei drei Themenfelder, in denen wir durch Vorlauftforschung in Deutschland frühzeitig Wettbewerbsvorteile erzielen können:

- Photonik für den »Information Highway« – Flexible Netze mit offenem Zugang
 - Energieeffiziente, skalierbare und sichere Netz- und Knotenarchitekturen
 - Programmierbare Hochgeschwindigkeits-Netze
 - Software-definierte/kognitive Optik
- Photonik im Datacenter – Konnektivität für die »Cloud«
 - Tb/s aktive optische Kabel
 - Chip-zu-Chip-Interconnects
 - On-Chip-Photonik

■ Photonik überall – Basis für neue Anwendungen

- Optische Heim- und Bordnetze
- Energieinformationsnetze
- Netze für Spezialanwendungen (z. B. Gesundheit, Forschung und Lehre, Überwachung, Sensoren)

Im Bereich der Informationsverarbeitung führt die rasant wachsende Datenmenge zu einer Integrationsdichte, 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 Mehrkern-technik, aus der hohe Anforderungen an die Datenübertragungsraten zwischen Kernen resultieren. Diese Anforderungen werden in Zukunft nur photonische Integrationstechniken erfüllen können. Die Herausforderungen sind enorm, die Stückzahlen optischer Kommunikationselemente werden in den Bereich Milliarden pro Jahr wachsen und die Herstellkosten müssen um einen Faktor zehn oder mehr sinken. Design- und Herstellmethoden müssen sich von der heutigen hohen Diversifikation in Richtung Standard-Designflows und Foundry-Modelle entwickeln, wie sie in der Elektronik schon lange existieren. Die damit einhergehende Konvergenz von Photonik und Elektronik wird einer der wesentlichen Treiber für die Weiterentwicklung der Photonik, aber auch der Elektronik sein.

Neben Anwendungen in optischen Interconnects wird die integrierte Mikrophotonik neue Anwendungen in Sensorik und Medizin erschließen. Es sind persönliche Mikro- und Nanosysteme für die medizinische Sensorik (»Lab on a chip«), z. B. für die kontinuierliche Blutzuckerbestimmung bei Diabetes, oder laborbasierte, massiv parallele Diagnostiken denkbar, die die Entwicklung einer personalisierten Medizin erlauben.

Um opto-elektronische Integrationstechniken auf breiter Front zur Anwendungsreife zu führen, müssen wir in der nächsten Dekade eine Reihe von Punkten adressieren und hier die Forschung in Deutschland vorantreiben. Diese betreffen die Integrationstechniken für optische Interconnects, die Lichterzeugung in siliziumbasierten Technologien und Fragen der Substrattechnologie ebenso wie eine automatisierte Aufbau- und Verbindungstechnik für optisch-integrierte Bauelemente.

Fortschritte bei Bilderfassung und Visualisierung bestimmen in erheblichem Maße die Entwicklungen in den großen Trends unserer Zeit mit. Neue Halbleiterlichtquellen und hochintegrierte Miniprojektoren unterstützen den gesellschaftlichen Trend zu mobiler Visualisierung von Informationen. Um Innovationen hin zu deutlich kompakteren, energieeffizienteren und kostengünstigeren Geräten für die, insbesondere auch mobile, 2D- und 3D-Darstellung voranzutreiben, müssen wir neue oder verbesserte Technologien in allen (Teil-) Bereichen entwickeln. Technologische Fragestellungen und Herausforderungen betreffen die Lichtquellen, die abbildenden Systeme, die Sensorik/Modulation und die Hardware-nahe Datenverarbeitung.

Bei der Erfassung von Bilddaten werden sich viele Anwendungsgebiete künftig Zusatzinformationen zunutzen machen, um bessere Entscheidungsgrundlagen zu erlangen, automatisierte oder teilautomatisierte Abläufe zu initiieren und Prozesse zu kontrollieren und zu regeln. Bei der Visualisierung von Bildinhalten wird sich die Bedeutung mobiler Anwendungen erhöhen, die Darstellung wird über klassische 2D-Displays hinaus erweitert werden. Herausforderungen ergeben sich hier u. a. bei der Projektion virtueller Bilder sowie bei Techniken der 3D-Darstellung.

Ein wichtiger Trend bei der Bilderfassung und Visualisierung ist die »intelligente Sensorfusion«. Eine Triebfeder hierzu sind Anwendungen im Bereich der

Sicherheit: Gefahrstofferkennung, Überwachung von Infrastruktureinrichtungen oder Großveranstaltungen, Verkehrsüberwachung etc. Hier müssen unterschiedliche Aufnahmekanäle zu komplexen Sensorsystemen verknüpft werden. Forschungsbedarf besteht u. a. bei der Aufnahme und Verarbeitung großer Mengen an Bilddaten, der nachfolgenden Datenfusion und der (Selbst-) Konfiguration der Systeme.

Um den Weg von der Forschung zum Markt zu ebnen, müssen wir geeignete Rahmenbedingungen schaffen. Im Bereich der breitbandigen Zugangsnetze ist ein nationaler Plan für den Faseraufbau erforderlich, z. B. auch in Verbindung mit Anreizsystemen. Die Standardisierung optischer Netze verlangt ein gemeinsames Vorgehen der Unternehmen. Ein deutsches Industrieforum (ähnlich der Optoelectronics Industry Development Association OIDA in den USA) könnte hier unterstützend wirken. Im Bereich der staatlichen Programme sollten die Fördermöglichkeiten für produktnahe Entwicklung verbessert werden. Zudem ist ein vereinfachter Zugang zu Venture Capital insbesondere in der Seed-Phase erforderlich, um den Transfer wissenschaftlicher Ergebnisse zu beschleunigen.

Die Erfassung, Verarbeitung, Übertragung und Visualisierung von Informationen wird mehr und mehr zur Domäne der Photonik. Deutschland ist hier gut aufgestellt. Gelingt eine Konzertierung der Partner im vorwettbewerblichen Bereich, so bestehen gute Chancen, in Forschung und Entwicklung auch künftig international eine Spitzenposition zu besetzen und Märkte für Unternehmen in Deutschland zu erschließen.

3.4

BELEUCHTUNG UND ENERGIE

Die deutsche Position

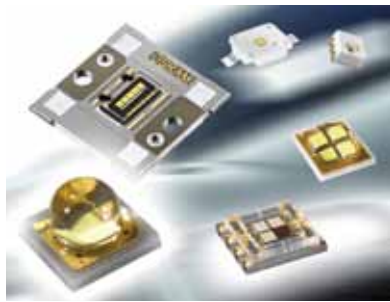
Beleuchtung: LED und OLED werden die Lichtquellen der Zukunft. Und Deutschland als eine der führenden Lichtnationen will und muss dabei voranschreiten. Im Beleuchtungsmarkt gehört OSRAM neben General Electric (USA) und Philips (NL, mit starkem Entwicklungsschwerpunkt in Deutschland) zu den Weltmarktführern. OSRAM Opto Semiconductors ist der zweitgrößte Hersteller optoelektronischer Halbleiter hinter dem Weltmarktführer Nichia (J). Um unsere Position am Markt im Wettstreit mit asiatischen und amerikanischen Wettbewerbern zu behaupten, sind erhebliche Forschungsanstrengungen und Investitionen zu leisten. Mit dieser Entwicklung gehen weitere Paradigmenwechsel einher: Halbleiterhersteller werden potenzielle Lichtanbieter; Chemiekonzerne wie die BASF oder Merck entwickeln und liefern die Materialien für das neue Licht. Gleichzeitig ändern sich Geschäftsmodelle: Lichtanbieter verkaufen »Lichtpakete«, rüsten Gebäude und Straßen aus, übernehmen Wartung

und Betrieb. Ein neuer Markt für Lichtversorger entsteht – »light contracting«. Der Triumphzug von LED und OLED kann maßgeblich in Deutschland und Europa stattfinden, zur Standortsicherung beitragen, Arbeitsplätze schaffen und einen Beitrag zum Umweltschutz leisten – Deutschland wird Effizienzweltmeister.

Energie: In nur wenigen Jahren hat sich am Standort Deutschland eine weltweit führende Photovoltaik-Industrie mit mehr als 100 produzierenden Unternehmen – Zellen, Module und Komponenten – etabliert. Der Marktanteil deutscher PV-Unternehmen liegt im Durchschnitt aller Wertschöpfungsstufen bei rund 20 %, der deutsche Solar-Maschinenbau hat Marktanteile bis über 50 %. Künftig gilt es, diesen Weltmarktanteil auch gegen die wachsende Konkurrenz, vor allem aus den USA und China, zu behaupten. Dafür muss die Solarwirtschaft ihre Anstrengungen weiter verstärken, die besten Produkte anzubieten und die Fertigungskosten kontinuierlich zu senken. Die Herausforderung dabei besteht darin, auch in Zukunft immer mindestens einen Schritt schneller zu sein als die Wettbewerber – Forschung und Entwicklung bilden hierfür die entscheidende Grundlage.



WM-Stadion in Durban mit LED-Lichtbogen © OSRAM GmbH



3.4.1

Beleuchtung –

Die Zukunft des Lichtes

Die heutigen Licht- und Strahlungsquellen auf der Basis von Glüh- und Entladungslampen erhalten immer stärkere Konkurrenz: das Halbleiterlicht. Halbleiterlichtquellen – LED (Licht emittierende Dioden) und organische LED (OLED) – nutzen die Elektrolumineszenz anorganischer bzw. organischer Halbleiter und 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 völlig neue Designmöglichkeiten.

3.4.1.1

Halbleiterlicht für Mensch und Umwelt

In den letzten Jahren war die Forschung an den Halbleiterlichtquellen dominiert von Effizienz- und Helligkeitssteigerungen der Komponenten. So ist es gelungen, die Lichtleistung von LEDs in nur drei Jahren zu verdreifachen. Durch diese enormen Fortschritte konnte eine Vielfalt von Anwendungsfeldern erobert werden. So kommt heute kein Mobiltelefon ohne die winzigen Lichtquellen aus. Dem Einsatz in der Innenbeleuchtung im Automobil folgte schrittweise auch die Verwendung im Außenbereich, angefangen von den Bremsleuchten bis hin zu Frontscheinwerfern basierend auf weißen LEDs. Für die Automobilindustrie bieten neue LED-Systeme aber auch weiterhin ein enormes Innovationspotenzial. Kamera- oder sensorunterstützte, intelligente Beleuchtungssysteme sehen tiefer in die Nacht, reagieren intelligent auf Kurvenfahrten, führen das Licht mit oder passen die Beleuchtungsstärke gezielt an die Verkehrs- und Wettersituation an. Die Vision des völlig blendfreien Fernlichts als Teil eines integralen Fahrzeug-Sicherheitskonzepts wird greifbar.

Der derzeitige Mega-Markt für die LED-Lichtquellen ist die Hinterleuchtung von LCD-Bildschirmen in Lap-

Foto links: Hochleistungs-LEDs © OSRAM GmbH

*Fotos Mitte und rechts: Straßenbeleuchtung mit konventionellen Hochdrucklampen (Mitte) und mit LEDs (rechts)
© OSRAM Opto Semiconductors GmbH*

tops und Fernsehern. Getrieben wird die zunehmende Durchdringung von LEDs in diesen Segmenten durch extrem flache Designs, neue Funktionalitäten wie das lokale Dimmen sowie Energieeinsparungen von bis zu 50 %.

Nun folgt der nächste Schritt: Ähnlich dem Wandel in der Elektronik von der Vakuumröhre zu Transistor und integrierter Schaltung vor über 30 Jahren kündigt sich in der Allgemeinbeleuchtung ein Paradigmenwechsel an: Von den Glüh- und Entladungslampen hin zu Festkörperlichtquellen auf Halbleiterbasis. Das spart Kosten und dient der Umwelt: Knapp 20 % des weltweiten Stromverbrauchs wird für die Beleuchtung eingesetzt. Mit den künftigen LED-Lichtquellen in Kombination mit intelligenten Lichtmanagementsystemen könnten bis zu zwei Drittel dieser Energie eingespart und CO₂-Emissionen reduziert werden.

Neben der Forderung höchster Energieeffizienz stehen bei der anstehenden Neuausrichtung des Lichtmarktes aber auch die Lichtqualität und die ästhetische Wirkung von Lichtquellen im Vordergrund; LED und OLED bieten hier enormes Potenzial. Halbleiterlichtquellen können zudem in Zukunft höhere Funktionalitäten bieten, die Helligkeitsvariationen und Farbwechsel einschließen, physiologische und biologische Aspekte des Lichts nutzen und durch intelligente Ansteuerung unser tägliches Leben begleiten.

3.4.1.2

Marktüberblick und deutsche Position

Im Jahre 2008 betrug der Weltmarkt für Lampen und LEDs etwa 20 Mrd. € (OPTECH Consulting). Deutschland hält daran einen Anteil von 12 %, mit OSRAM als einem der Marktführer. In Deutschland sind in diesem Bereich über 10.000 Menschen beschäftigt. Weitere



Foto links: Transparente OLED-Lichtquellen © Novaled AG

Foto Mitte: Eine Zukunftsvision: Transparente OLED-Fenster
© OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Foto rechts: LED-Frontscheinwerfer © AUDI AG

Wertschöpfung entsteht bei den zahlreichen zumeist kleinen und mittelständischen Leuchtenherstellern. Am Gesamtmarkt für Beleuchtungstechnik mit einem weltweiten Volumen von etwa 60 Mrd. € hat Deutschland einen Anteil von ca. 7 % (ZVEI).

Deutschland startet damit aus einer führenden Position in das Rennen um die künftigen Märkte in der Beleuchtung. Dabei wird den LEDs eine Schlüsselrolle zukommen. Nach Marktprognosen wird der weltweite Markt für High Brightness LEDs von 4,9 Mrd. USD im Jahr 2009 auf 14,9 Mrd. USD im Jahr 2013 anwachsen (Strategies Unlimited, August 2009). Die höchsten Wachstumsraten werden für die Bereiche Displays und Beleuchtung erwartet. Für LEDs in der Allgemeinbeleuchtung gibt Strategies Unlimited einen Anstieg von 665 Mio. € in 2009 auf über 4,3 Mrd. € im Jahre 2014 an.

Damit kündigt sich ein massiver Wechsel im Lichtmarkt an. Der Anteil der LED-Beleuchtung in 2020 wird mit bis zu 80 % prognostiziert. Der Paradigmenwechsel zum Halbleiterlicht bietet sowohl Chancen als auch Herausforderungen für den deutschen Beleuchtungsmarkt. Die deutsche Lichtindustrie ist gut aufgestellt, aber die Konkurrenz in Asien und den USA ist stark. Auch Halbleiter- und Elektronikhersteller drängen nun in den Beleuchtungsmarkt und üben damit Druck auf die Hersteller traditioneller Lichtquellen und Beleuchtungssysteme aus.

Die Bedeutung der Halbleiter-Lichttechnik für die zukünftige Entwicklung eines ganzen Industriezweiges ist auch international erkannt worden. Entsprechend intensiv sind die Anstrengungen. Dabei kommt der staatlichen Förderung eine wichtige Rolle zu, da die LED-Technologie sehr effizient im Zusammenspiel von

Forschungsinstituten und Entwicklungsabteilungen der Industrie vorangebracht werden kann.

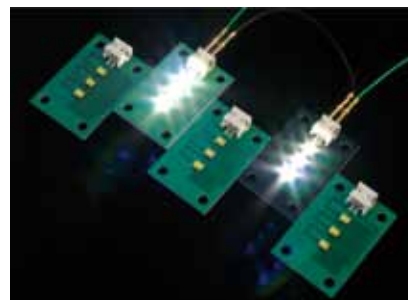
Für die Jahre 2009 bis 2013 hat beispielsweise Korea 17 sogenannte Wachstumsbereiche definiert, in denen alleine die LED-Forschung mit etwa 230 Mio. € unterstützt wird. Die USA haben mit dem Solid State Lighting Programm des Department of Energy (DOE) ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm aufgelegt, aus dem allein der Bereich LED/OLED von 2006 bis 2009 mit 100 Mio. € unterstützt wurde. Das Programm wurde aktuell um 50 Mio. € aufgestockt. Neben den Basistechnologien werden auch die Produktionstechnologien gefördert. Zudem unterstützen verschiedene Maßnahmen die Markteinführung, z.B. Design-Wettbewerbe und Demonstrationsprojekte. China fördert mit mehreren hundert Millionen Euro jährlich den Aufbau entsprechender Infrastrukturen im Land.

Angesichts des zunehmenden Wettstreits mit amerikanischen und asiatischen Wettbewerbern gilt es nun für Deutschland, aus einer starken Position heraus zu agieren und sich im Zusammenspiel von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik an die Spitze der Entwicklung des Lichtmarktes zu stellen.

3.4.1.3

Paradigmenwechsel zum Halbleiterlicht: große Chancen aber auch große Herausforderungen

Die LED-Technologie steht derzeit noch am Anfang. Ihr Potenzial konnte bereits in vielen Forschungsergebnissen und Anwendungen aufgezeigt werden, ist aber bei weitem noch nicht ausgeschöpft. LED-Lichtquellen können in der Zukunft alle bestehenden Lichtquellen in puncto Effizienz überflügeln. Daraus resultieren zum einen die bereits genannten ökologischen Vorteile, da mit der Energieeinsparung auch die Emission von Treibhausgasen vermieden wird und LEDs zudem kein Quecksilber enthalten, wie dies bei konventionellen Energiesparlampen der Fall ist.



Zum anderen bietet das LED-Licht dem Konsumenten neben einer Kostenersparnis aber auch neue Funktionalitäten, innovative Designmöglichkeiten und nicht zuletzt höhere Sicherheit auf den Straßen.

Was ändert sich?

- *Lichtsysteme und -lösungen anstelle einzelner Lichtquellen:* LED-Lösungen werden die Adaption intelligenter Lichtsteuerungssysteme ankurbeln und in Gebäude integriert werden.
- *Funktionalität:* Adaptive, intelligente und individuelle Lichtlösungen werden an Bedeutung gewinnen.
- Die Erwartungen der Konsumenten ändern sich: Licht erhält einen höheren Stellenwert; LED-Licht ist mit *Emotion und Komfort* verbunden.
- Vielfältige *Designmöglichkeiten* werden zum Verkaufsargument.

Die erwartete Marktentwicklung wird wirtschaftliche Vorteile für die Lichtindustrie mit sich bringen: Innovative Lichtlösungen sind Treiber für Wachstum, stärken die Wettbewerbsfähigkeit, sichern und schaffen neue Arbeitsplätze. Für Deutschland und Europa spielt dabei die Verbindung von Technik, Design und intelligenter Funktion eine besondere Rolle. Im Gegensatz zur konventionellen Mikroelektronik wird es im LED-Markt der Zukunft eben nicht nur auf kostengünstige Massenproduktion ankommen.

Dem breiten Einsatz von LED-Lösungen stehen aber neben den beiden Kriterien Kosten und Performance derzeit noch viele weitere Herausforderungen gegenüber, da die LED-Technologie radikale Veränderungen für den gesamten Lichtmarkt mit sich bringt.

Foto links: Visuelle Inspektion bei der OLED-Pilotfertigung in Aachen © Philips Deutschland GmbH

Foto Mitte: Beschichtungskammer für die LED-Fertigung © Aixtron AG

Foto rechts: LED-Module © Fraunhofer IZM

Herausforderungen:

- Beleuchtung transferieren vom Konsumgut zum Investitionsgut: Anstelle der Initialkosten werden die über die Lebensdauer summierten Gesamtkosten die Kaufentscheidung bestimmen müssen. Dieser Wechsel stellt insbesondere im Consumer-Bereich eine große Herausforderung dar.
- Die lange Lebensdauer der LED-Lichtquellen erfordert eine Änderung der Geschäftsmodelle:
 - Der Lampenersatzmarkt verschwindet (dafür höhere Initialkosten).
 - Die Differenzierung zwischen Lampe und Leuchte verschwimmt.
 - Die Zuverlässigkeit des gesamten Systems, Austauschbarkeit, Kompatibilität mit Folgegenerationen, Wartungsmöglichkeiten werden Schlüsselfaktoren, die es zu entwickeln gilt.
 - Neue Garantiemodelle werden verlangt.
 - Neue Geschäftsmodelle müssen gefunden werden, z. B. Contracting für Lichtlösungen oder Licht-Leasing.
 - Halbleiter- und Elektronikhersteller werden zu Lichthanbietern und üben damit Druck auf die traditionellen Lampenhersteller aus, dem es zu widerstehen gilt.

Ein Blick in die Vergangenheit unterstreicht die Herausforderungen. Die Marktdurchdringung der Energiesparlampe (Compact Fluorescent Lamp) wurde durch hohe Initialkosten und insbesondere durch mangelnde Lichtqualität jahrelang blockiert. Die gleichen Fehler beim Halbleiterlicht zu wiederholen, muss tunlichst vermieden werden.



Foto links: Flächendstrahlende OLEDs eröffnen neue Designmöglichkeiten © Philips Deutschland GmbH

Foto Mitte: LED-Lichtinstallation im Opernhaus Hannover © Hochtief AG

Foto rechts: LEDs ermöglichen neue Lampenkonzepte © Trilux GmbH & Co. KG

3.4.1.4

Neue Lichtquellen für die Beleuchtung – Handlungsfelder und Forschungsbedarf in Deutschland

Um den Siegeszug der LED in der Allgemeinbeleuchtung für Deutschland erfolgreich zu gestalten, sind die folgenden vier eng vernetzten Handlungsfelder in der nächsten Dekade von besonderer Bedeutung. Auf diese sollte der Fokus künftiger Forschung bis hin zu Markteintrittsmaßnahmen gelegt werden.

1. Applikationseffizienz und Systemkosten – das Gesamtsystem optimieren
2. LED-Lichtlösungen – die spezifischen Möglichkeiten der LED nutzen
3. »Gutes« Licht – Wirkung und Möglichkeiten erforschen und ins Bewusstsein bringen
4. Rahmenbedingungen – den Sprung von FuE in den Markt erleichtern

Applikationseffizienz und Systemkosten – das Gesamtsystem optimieren

Während der letzten zehn Jahre war die Forschung in erster Linie auf die Steigerung von Effizienz und Helligkeit der LED selbst konzentriert, was verbesserte Halbleiterstrukturen, Chip- und Gehäusetechnologie umfasste. Mit den enormen Erfolgen wurde eine Reihe von Anwendungen ermöglicht, in denen die LED bis dahin keinen Einsatz fand, wie z.B. im Automobilfrontscheinwerfer oder in der Hinterleuchtung von Bildschirmen. Erste Produkte sind auch für die Allgemeinbeleuchtung verfügbar. Um eine breite Marktdurchdringung zu erreichen, müssen aber große Anstrengungen in

der Forschung unternommen werden, die nicht nur die Verbesserung der LED selbst, sondern aller Systemkomponenten (LED, Optik, Elektronik, Kühlung, Gehäuse) bis hin zur Optimierung des Gesamtsystems einschließen.

Halbleiter-, Chip- und Package-Technologien – LEDs befinden sich aufgrund ihrer bereits heute hohen Effizienz an der Schwelle zum Eintritt in die Allgemeinbeleuchtung. Gleichzeitig fordern aber auch die jetzt aufkommenden Massenmärkte, Automobil und die TV-/Display-Hinterleuchtung, permanent höhere Effizienzen und Innovationen. Kaltweiße LEDs erreichen in der Produktion bereits sehr hohe Lichtausbeuten im Bereich von über 100 Lumen pro Watt (lm/W), warmweiße LEDs liegen im Bereich von 75 lm/W.

Trotz der enormen Steigerung in den letzten Jahren ist das Rennen um die Effizienz aber noch nicht vorbei. Im Gegenteil ist die technologische Herausforderung, Lichtausbeute und Helligkeit zu steigern, sehr groß. In der 2010 aktualisierten Roadmap des DOE wird für kaltweiße LEDs eine Effizienz von 240 lm/W für 2020 vorhergesagt. Für warmweiße LEDs, wobei auch Multichip-Gehäuse mit roten und weißen LED-Chips einbezogen werden, wird für 2020 ein Wert von bis zu 230 lm/W prognostiziert. Diese Werte zeigen deutlich, dass auch im Bereich der Effizienzsteigerung noch deutliches Potenzial besteht und daher weitere Forschung auf diesem Gebiet unerlässlich ist. Gleichzeitig müssen die Kosten bis 2020 mindestens um den Faktor zehn reduziert werden.

Die Effizienz blauer LEDs hängt von zahlreichen Faktoren ab, u. a. der Erzeugung von Licht im Halbleiter, bestimmt durch die interne Quanteneffizienz, und der Auskopplung von Licht aus dem Halbleiter, der Auskoppleffizienz. Beide Effizienzen liegen heute bei etwa 75 %, müssen aber in den nächsten Jahren auf mindestens 90 % gesteigert werden. Gleichzeitig gilt es, die elektrischen Verluste zu minimieren.

Hohe Lichtleistung benötigt hohe Ströme und damit hohe Leistungsdichten. Die Effizienz von LEDs nimmt

aber unter diesen Bedingungen drastisch ab. Um höhere interne Quanteneffizienzen zu erzielen, muss dieses Phänomen, der sogenannte »Droop-Effekt«, besser verstanden, die Halbleiterstrukturen müssen auf den Betrieb bei höheren Temperaturen optimiert werden, z. B. durch Nanostrukturierung der Halbleiter oder weitere Defektreduzierung in neuartigen Substraten. Eine Erhöhung der Auskoppel-effizienz kann durch verbesserte Materialien (hochreflektiv, hochrefraktiv) oder neuartige Oberflächentexturierung erzielt werden.

Um ausreichende Lichtströme zu erreichen, werden kompakte Multichip-Gehäuse benötigt, die auch für die sogenannten »Light Engines« zentraler Baustein sind. Neue Lösungen für chip-nahe Farbhomogenisierung sind erforderlich, z. B. miniaturisierte Chips. Das Wärme-management wird gerade bei hohen Lichtströmen eine essentielle Rolle spielen. Die Aufbau- und Verbindungstechnik muss derartige Anforderungen RoHS-kompatibel³⁹ erfüllen und sowohl die elektrische Verbindung als auch die Entwärmung dauerhaft sicherstellen. Die konventionelle Aufbau- und Verbindungstechnik stößt hier an ihre Grenzen und neue Ansätze müssen erforscht werden, wie z. B. der Ersatz konventioneller Lottechniken durch Sintertechniken.

Um die Nachteile elektronischer Vorschaltgeräte wie z. B. mangelnde Lebensdauer, geringe Effizienz und voluminöse Ausmaße zu umgehen, müssen innovative Ansätze für Hochvolt-LEDs und -Multichip-Gehäuse erforscht werden.

Weiß LEDs werden überwiegend über das Leuchtstoff-Konversions-Prinzip mit Hilfe blauer LEDs realisiert. Um die prognostizierten Effizienzen für weiß LEDs halten zu können, müssen die Leuchtstoffe aber gravierend verbessert werden. Zum einen muss eine hohe Quanteneffizienz auch bei hohen Temperaturen gewährleistet sein, und zum anderen müssen Streuverluste mini-

miert werden, z. B. durch neue Aufbringstechniken, ohne die Homogenität zu reduzieren. Um die Nachteile der Leuchtstoffe zu umgehen, müssen auch völlig neue Ansätze für phosphorfreie weiß LEDs erforscht werden.

Systemkomponenten und Gesamtsystem – Eine effiziente LED alleine ist zwar Grundlage und »Enabler« der LED-Technologie, für ein gutes Endprodukt und eine breite Markteinführung aber noch nicht ausreichend. 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, und thermische sowie optische Verluste senken die Gesamteffizienz im System auf etwa die Hälfte der Komponenteneffizienz. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Es ist entscheidend, hier sogar noch einen Schritt weiterzugehen. Da die LEDs gerichtetes und spektral einstellbares Licht abgeben, können sie große Vorteile in der Applikation ausspielen. Die Direktionalität kann den Wirkungsgrad von Leuchten erheblich steigern.

Für LED-Lampen und -Leuchten müssen sowohl die einzelnen Komponenten, Elektronik, Sensorik, Optik und Kühlung, als auch das Gesamtsystem optimiert werden. Neuartigen Kühlsystemen kommt eine besondere Bedeutung zu, da über die Senkung der Junction-Temperatur am Chip erhebliche Effizienzsteigerungen erzielt werden können und auf die Kühlung gemäß einer Prognose des DOE 2015 knapp 50 % der Herstellkosten entfallen werden. Darüber hinaus werden im Bereich Elektronik, Mechanik und Optik neue Anschlusstechnologien benötigt. Lösungen mit verteilten Lichtquellen beispielsweise vermindern die individuelle Wärmelast am Chip.

Neben der Effizienz sind die Kosten zum Thema Nummer eins geworden. Die Kosten müssen bereits in den nächsten fünf Jahren um den Faktor zehn reduziert werden. Hier sind die Prozesstechnologie, die Materialforschung und auch die Maschinenteknologie vor enorme Herausforderungen gestellt.

³⁹ RoHS – Restriction of the use of certain hazardous substances, EG-Richtlinie 2002/95/EG

Die sogenannten Retrofit-Lösungen, die auf den traditionellen Lampen mit Standard-Sockelsystemen und vorgegebenen Ausmaßen beruhen, sind für LED-Lösungen wenig geeignet. Kurzfristig werden die LEDs den Markt dennoch auch über Retrofit-Lösungen erobern; die Potenziale der LED können jedoch nur dann vollständig ausgeschöpft werden, wenn geeignete Sockel- und Leuchtensysteme entwickelt werden. Daher fordern die Leuchtenhersteller standardisierte Light Engines, die definierte mechanische, thermische und optische Schnittstellen aufweisen und sich damit einfach in verschiedene Leuchten integrieren lassen. Auch hier liegt ein erheblicher Kostenhebel für das Gesamtsystem. Diese kompakten Light Engines müssen alle erforderlichen Komponenten weitgehend integrieren, wie Kühlung, Elektronik oder auch Sensoren, die die Alterung kompensieren und eine Kommunikation mit anderen Light Engines gewährleisten.

Die Energieeffizienz des gesamten Systems und dessen Kosten bestimmen die Kosten über die Lebensdauer (Total Cost of Ownership; TCO). Diese sind für den Kunden relevant und müssen zukünftig an erster Stelle stehen. Neben den TCO gewinnt aber die Lichtqualität an Bedeutung und wird die Kaufentscheidung maßgeblich beeinflussen. Beide Faktoren müssen daher berücksichtigt und gemeinsam betrachtet werden.

Fazit – Der Schlüssel für den Siegeszug der LED in der Allgemeinbeleuchtung liegt in der Verbesserung der Systemeffizienz unter Berücksichtigung der Lichtqualität und der Reduktion der Kosten.

Aufgaben – Zusammengefasst ergeben sich damit folgende Handlungsfelder für die Forschung, wobei die gesamte Wertschöpfungskette einbezogen werden muss:

- Optimierung des Gesamtsystems und der einzelnen Komponenten von der LED über massentaugliche Light Engines bis zur Leuchte unter Einbeziehung von Materialien, LED-Chip, Multichip-Gehäuse, Elektronik, thermischem Management und Optik

- Fokus auf System- und Applikationseffizienz

- Kostengünstige Herstellung durch hohe Automatisierung und neue Prozesstechnologie

Im Speziellen sind folgende Themen relevant:

System- und Applikationseffizienz:

- Neue Materialien und deren Prozesstechnik: lichtstabile, wärmeleitfähige, hochbrechende Polymere; thermisch leitfähige Materialien und Beschichtungen, effiziente, thermisch stabile Leuchtstoffe und Aufbringtechniken für die Konversion
- Effizienz-, Helligkeits- und Qualitätssteigerung von LED-Komponenten: Epitaktisches Wachstum (Homogenität); single-chip white LEDs, Ansätze für LEDs ohne Konverter, Hochvolt-LEDs, breitbandig weiß emittierende LEDs; Realisierung einer hohen Farbwiedergabe für hohe Lichtqualität, hochtemperaturtaugliche LEDs sowie Aufbau- und Verbindungstechnik, neue Substrate und defekt- bzw. spannungsfreies Kristall-Wachstum, Optimierung für Hochstrombetrieb (»Droop-frei«), neue Ansätze für Leuchtdichteerhöhung, chip-integrierte elektronische Funktionen
- Multichip-Gehäuse mit integrierten Farb-/Helligkeits-/Temperatur-/Anwesenheitssensoren
- Light Engines: standardisierbare LED-»Lampen« mit thermischer, optischer und mechanischer Schnittstelle; Integration von Sensoren, miniaturisiert
- Integration (Photonics-on-Silicon; Integration von Sensorik, integrierte Treiber)
- Effizientes und kostengünstiges thermisches Management: neue aktive und passive Kühlkonzepte, verbesserte thermische Leitfähigkeit thermischer Baugruppen und Materialien
- Elektronik/Vorschaltgeräte: miniaturisiert, verlustarm, zuverlässig, neue Konzepte für längere Lebensdauer

- Optik: verlustarme Optiken, Vermeidung von Blendung, Strahlformung, Ausnutzen der Direktionalität, Freiformoptiken; adaptive Optik, verbesserte Temperatur- und Ultraviolett-Beständigkeit; Farbmischung
- Leuchten: Entwicklung des mechanischen Design durch Integration aller Einzelkomponenten unter Berücksichtigung von Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Kostenminimierung
- Kommunikation zwischen den Modulen und Leuchten

Kosten:

- Ansatzpunkte für Kostensenkung (mehr lm/€) durch
 - Epitaxie: neue Binning-Konzepte (Nutzung der gesamten Produktion)
 - Neue Materialien (Halbleiter, Gehäuse, Optik)
 - Neuartige Halbleiterstrukturen und Wachstum auf neuen, großflächigen Substraten
 - Chip-interne Strahlformung und Konversion
 - Effiziente Fertigungsanlagen in der gesamten Prozesskette und neuartige Wachstumskonzepte
 - Höherer Automatisierungsgrad und Flächenskalierung in der Produktion (Vorbild Siliziumtechnologie)
 - Neue Herstellungstechnologien in Frontend (z. B. Plasma-assistierte CVD – Chemical Vapor Deposition) und Backend
- Kosteneffiziente und kompakte Kühlung
- Kostengünstige Elektronik und Optik
- Kostengünstige und zuverlässige LED-Chip-Kontaktierung

Der Schlüssel zum Erfolg liegt hier insbesondere in der abgestimmten Optimierung der Einzelkomponenten, die eine Bündelung der Aktivitäten entlang der Wertschöpfungskette erfordert.

Zurzeit ist die Forschung auf Halbleiterlichtquellen, LED und OLED, konzentriert. Aber es müssen ebenso neue Ansätze in der Lichttechnologie identifiziert werden, die

vielversprechend in ihrer Effizienz, Lichtqualität und Helligkeit sind. Gleichzeitig können vorhandene Technologien für neue Applikationen genutzt werden; so könnte z. B. die Projektion auch für die Allgemeinbeleuchtung attraktiv werden.

LED-Lichtlösungen – die spezifischen Möglichkeiten der LED nutzen

Die Beleuchtung von morgen wird nicht durch einzelne Lampen bestimmt. Der Trend geht vielmehr hin zu intelligenten Lichtlösungen, die die Energieeffizienz optimieren und hohe Funktionalität bieten.

Was bisher fehlt, ist die Ausnutzung der spezifischen Eigenschaften des Halbleiterlichts, d. h. seiner Flexibilität hinsichtlich elektrischer Steuerbarkeit von Helligkeit, Lichtfarbe und Lichtrichtung, welche die Möglichkeit bietet, die Beleuchtung individuell auf den Nutzer oder die Applikation zuzuschneiden und ganz neue Funktionalitäten zu realisieren. Dabei stehen zwei Herausforderungen im Mittelpunkt: Zum einen ist die Vernetzung von Lichtpunkten und Beleuchtungsanlagen mit dem Betreiber/Anwender notwendig, zum anderen müssen zunehmend individuelle Bedürfnisse berücksichtigt werden.

Neue Funktionalitäten beinhalten also zum einen die automatisierte Steuerung des Lichts, z. B. eine Anpassung von Farbtemperatur, Helligkeit und Lichtverteilung je nach Tageslichtsituation und Anwesenheit oder auch die Anpassung an die Wettersituation in der Straßenbeleuchtung. Die Optimierung von Energieeffizienz, Annäherung der künstlichen an die natürliche Beleuchtung und Sicherheit sind hier die Treiber. Zum anderen sollen neue Funktionalitäten in individuellen Lösungen geschaffen werden, die durch den einzelnen Anwender nach Bedarf gesteuert werden können. Ältere Menschen beispielsweise benötigen mehr Licht, Atmosphäre kann durch unterschiedliche Farben geschaffen werden. Dafür müssen die technologischen Grundlagen erschlossen werden, z. B. Steuerungsmöglichkeiten (drahtlos oder drahtgebunden über das Stromnetz) und intuitive Bedienkonzepte, aber es müssen auch die Lichtbedürfnisse besser verstanden werden. »Lichtplanung« wurde

bisher eher auf kommerzielle Gebäude beschränkt. Zukünftig sollte die »Lichtplanung für jedermann« selbstverständlich werden.

All dies erfordert die Integration von Sensoren und entsprechender Ansteuermöglichkeiten in die Lichtquelle selbst oder in die Leuchte. Der Sensorik kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, da Farbe, Helligkeit, Wärme und Alterung überwacht werden müssen. Heute fehlt es an einheitlichen Schnittstellen, Protokollen und auch einfachen Bedienoberflächen.

Weitere Möglichkeiten, neue Funktionalitäten zu realisieren, entstehen durch die Zusammenführung von Kommunikation und Beleuchtung. Licht kann per Internet gesteuert werden, was vereinzelt schon heute im Straßenverkehr genutzt wird. Des Weiteren kann Licht zur digitalen Datenübertragung genutzt werden. Auch könnten mit ein und demselben Modul sowohl klassische Lichtverteilungen, als auch statische oder bewegte Bilder auf Wände projiziert werden. Hier sind allerdings sowohl leistungsstarke als auch miniaturisierte Quellen notwendig, die sich von den in heutigen Digitalprojektoren verwendeten deutlich absetzen. Eine Besonderheit von Halbleiterlichtquellen liegt in den vielfältigen Designmöglichkeiten. Medienfassaden können heutzutage bespielt werden – das ist auch im kleineren Maßstab denkbar. Flächige Lichtquellen, die sogar transparent und flexibel sein können, kombiniert mit den Punktlichtquellen werden im Design neue Maßstäbe setzen.

Die Vision reicht von flächigen Lichtquellen bis hin zu leuchtenden Tapeten. So könnten transparente Lichtfolien auf Basis von LEDs und OLEDs künftig in Glasscheiben eingesetzt werden. Durch Kombination mit Photovoltaik werden energieautarke Lichtquellen zur Realität. Auch eine Kombination mit der organischen Photovoltaik ist denkbar: tagsüber Fenster und Solarzelle, abends Lichtquelle. Ist es heute noch ein wenig beachteter Gebrauchsgegenstand, so wird das Licht dadurch in Zukunft einen hohen und sehr bewussten Stellenwert in der Nutzung erreichen.

Fazit – Intelligente Lichtmanagementsysteme in Verbindung mit Halbleiterlicht sollten im Mittelpunkt der Forschung zur Ausnutzung der spezifischen Möglichkeiten der LED stehen, mit folgenden Zielen:

- Vernetzung des Lichts
- Mehr Sicherheit auf den Straßen
- Neue Beleuchtungslösungen für die alternde Bevölkerung
- Hoch funktionalisierte Lichtquellen für individuelle Bedürfnisse
- Nachhaltige Lichtplanung mit hohem Potenzial zur Energieeinsparung

Aufgaben – Um diese Ziele zu erreichen, bedarf es gemeinsamer Anstrengung und einer engen Kooperation zwischen Wissenschaft, LED-/Lampen- und Leuchtenindustrie und Beleuchtungsplanern bis hin zu den Gebäudeplanern:

- Intelligente Lichtlösungen durch Verknüpfung mit Sensorik und Steuerung
- Interdisziplinäre Forschung an Lichtlösungen
- Individualisierung des Lichts – Lichtplanung für jedermann
- Neue Funktionalitäten schaffen durch die Verknüpfung von Kommunikation und Beleuchtung

Im Speziellen sind folgende Themen relevant:

- Flächiges Licht und Beispielbarkeit, z. B. beispielbare Lichttapeten
- Transparente, flache Lichtsysteme
- Flexible Lichtkörper
- Digitale Informationsübertragung durch die Beleuchtung
- Fernsteuerung und Fernwartung durch Webservices

- Verbesserte, kostengünstige Sensoren (Präsenz, Bewegung, Tageslicht)
- Integration von Sensoren auf Leuchten- oder Komponentenebene
- Ansteuersysteme und Softwareentwicklung
- Einfache intuitive Bedienoberflächen
- Selbstkonfigurierende Beleuchtungsinstallationen
- Energieeffizienz steigern durch Steuerung der Beleuchtung nach Tageslicht und Präsenz (Integration in Gebäudetechnik)
- Standardisierte Schnittstellen
- Signalverarbeitung
- Akzeptanz erforschen (Wahrnehmungspsychologie, Raumwirkung etc.)

»Gutes« Licht – Wirkung und Möglichkeiten erforschen und ins Bewusstsein bringen

Mit dem schrittweisen Verbot der Glühlampen durch die Europäische Kommission ist eine Diskussion über die Qualität von Licht entfacht. Die Qualitätsmerkmale Farbkonstanz, Farbwiedergabe und -homogenität werden als entscheidende Kaufkriterien herangezogen, aber auch die Lichtfarbe. Plasmalichtquellen bieten heute sehr hohe Lichtqualitäten. Die heute erhältlichen LED-Lichtquellen weisen z.T. noch unzureichende Lichtqualität auf, was in erster Linie an mangelnder Farbwiedergabe liegt, aber auch daran, dass bevorzugt effizienzoptimierte kaltweiße LED eingesetzt werden, die der Consumer-Bereich nur bedingt akzeptiert. SSL (Solid State Lighting) bietet aber das Potenzial höchste Lichtqualitäten zu erreichen. Für SSL-Lichtquellen ist der heute definierte Farbwiedergabeindex CRI (Color Rendering Index) nicht geeignet, um die Güte der Farbwiedergabe festzulegen. Vielmehr muss grundlegend erforscht werden, welches Spektrum vom Verbraucher abhängig von der Applikation bevorzugt wird. Die NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) schlägt mit Hilfe der CIE (Commission internationale de l'éclairage,

Internationale Beleuchtungskommission) bereits die Definition einer Color Quality Scale (CQS) vor, weitere Studien sind aber notwendig.

Die Kenntnisse beim Verbraucher über Qualitätsmerkmale sind heute sehr gering bis nicht vorhanden. Gütesiegel sollten Lichtqualitätsparameter in verständlicher Art ausweisen.

Den Begriff Lichtqualität muss man klar abgrenzen vom Themengebiet »Licht und Lebensqualität«, welches die Erkenntnisse über die biologischen und psychologischen Wirkungen des Lichtes einschließt. Künstliches Licht ist aus der heutigen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Der Mensch entfernt sich aber dabei heute immer mehr von seinem natürlichen Rhythmus. Viele Menschen arbeiten im Schichtbetrieb, tagsüber in fensterlosen Gebäuden oder nutzen die Abendstunden für die Freizeitgestaltung. Licht hat in erster Linie die Aufgabe, das Sehen zu ermöglichen, aber Licht unterstützt auch die biologischen Prozesse im Körper und synchronisiert den Organismus mit seiner Umwelt. Die komplexe biologische Wirkung des Lichtes sollte daher so gut wie möglich verstanden werden, um auch das künstliche Licht in seiner spektralen Verteilung, Intensität und Leuchtdichteverteilung den Bedürfnissen des Menschen bestmöglich anzupassen. Damit kann die Arbeit sicherer und effizienter, der Wach-/Schlafzyklus des Menschen unterstützt und das Wohlbefinden gesteigert werden. Auch lichttherapeutische Anwendungen gewinnen an Bedeutung, setzen aber die detaillierte Kenntnis der medizinischen Lichtwirkungen voraus.

»Licht zum Wohlfühlen, Licht zum Entspannen, Licht zum Aktivieren« sind heute aber dennoch eher Slogans, die auf unzureichendem wissenschaftlichen Hintergrund basieren. Bis auf den Einfluss auf den Melatoninhaushalt und auf den circadianen Rhythmus sind die physiologischen Wirkungen des Lichtes nicht systematisch untersucht. Zur Bestimmung der Auswirkung von Licht auf die Lebensqualität müssen Langzeitstudien in verschiedenen Bereichen durchgeführt werden wie z. B. in der Arbeitsumgebung (Büros, Kaufhäuser), im Wohnbereich und in der Altenpflege.

Forschung über die Wirkung von Licht muss intensiviert und praxisnahe chronobiologische Untersuchungen müssen durchgeführt werden.

Ein detaillierter Vergleich der Qualität aller bestehenden Lichtquellen einschließlich Plasmalichtquellen und Energiesparlampen und auch Untersuchungen ihres jeweiligen Einflusses auf die Lebensqualität sind dringend erforderlich.

Fundierte wissenschaftliche Erkenntnisse sind die Voraussetzung, aber essentiell ist, diese auch erfolgreich in das Bewusstsein des Verbrauchers zu bringen. Das sollte auf mehreren Ebenen stattfinden. Verbraucher müssen sensibilisiert und auch unterrichtet werden. Das kann durch entsprechend gezielte Marketingkampagnen über Verbraucherverbände, Aufklärungsmaßnahmen in Kindergarten, Schule und Universität oder durch Ausbildung von Lichtplanern erreicht werden.

Aufgaben – Zusammengefasst ergeben sich damit folgende Handlungsfelder:

- Die Lichtqualität der SSL-Lichtquellen erforschen und neue Qualitätsstandards setzen
- Das Potenzial biologisch wirksamer Beleuchtung erschließen; von medizinischen Studien bis hin zu Anforderungen und Normen für Beleuchtungssysteme
- Kenntnis und Bewusstsein für »gutes« Licht beim Verbraucher schaffen, z. B. durch entsprechende Marketing- und Schulungskampagnen

Rahmenbedingungen – den Sprung von FuE in den Markt erleichtern

Die Steigerung der Performance und die Reduktion der Kosten, die durch grundlegende Forschung und applikationsnahe Entwicklungen vorangetrieben werden können, sind notwendig für den Markteintritt und die schnelle Verbreitung der Halbleiterlichtquellen und -systeme, aber nicht ausreichend.

Mit dem Wechsel zum Halbleiterlicht wird sich der Beleuchtungsmarkt grundlegend verändern. Daher sind

unterstützende Maßnahmen erforderlich, um Innovationsbarrieren zu beseitigen:

- Zuverlässigkeit gewährleisten, Versorgungssicherheit bieten
- Wechselkompatibilität garantieren, Upgrade-Fähigkeit ermöglichen
- Mehr herstellernerneutrale Informationen zur Verfügung stellen
- Vertrauen in Qualität und Energieeinsparung der neuen Lösungen erreichen (Gütesiegel)
- Garantiemodelle entwickeln
- Wahrnehmung beim Kunden erhöhen, Belege für wirtschaftliche Vorteile aufzeigen
- Nutzerfreundliche Planung, Installation und Wartung ermöglichen
- Neue Finanzkonzepte und Investitionsmodelle erstellen (Contracting etc.)
- LED- und Elektronik-Know-how unter die traditionellen Leuchtenhersteller bringen
- Architekten, Lichtplaner stärker einbeziehen

Es wird erwartet, dass auch in den kommenden Jahren Halbleiterlichtlösungen deutlich höhere Anschaffungskosten aufweisen werden als traditionelle Lichtquellen; allerdings gleichzeitig auch bei sehr hoher Lebensdauer und geringerem Energieverbrauch und somit geringeren TCO. Hier müssen zur Reduzierung der Markteintrittsbarrieren neue Finanzierungslösungen erarbeitet werden wie z. B. Leasingmodelle für Licht. Zur Absicherung der Marktposition und Sicherung des Marktvorteils werden zudem weitere unterstützende Maßnahmen benötigt, z. B. steuerliche Vergünstigungen, flexible Innovationsmodelle für Innovatoren oder Start-up Hilfen.

Kooperationen über die Wertschöpfungskette hinweg sind entscheidend, um den Entwicklungsvorsprung zu halten und auszubauen. Da die Schnelligkeit in der Ent-

wicklung zunehmend zum marktbestimmenden Kriterium wird, muss auch hier die Politik reagieren und in der Forschungsförderung möglichst schnelle und sehr flexible Möglichkeiten zur Verfügung stellen. Durch weitere von der Politik unterstützte Instrumente wie die umweltfreundliche Beschaffung oder Anreizprogramme könnte es gelingen, den Markteintritt neuer Lichtlösungen deutlich zu beschleunigen. Um die Kernkompetenzen optimal zu nutzen und auch Nachwuchskräfte zu gewinnen, sollten Kompetenzzentren gegründet und gefördert werden.

Gleichzeitig müssen dem Verbraucher und dem Kunden mehr herstellernerneutrale Informationen zu den Leistungsparametern und Möglichkeiten von LED-Lösungen geboten werden. Im Privatbereich wird die Wahl der Lichtquellen heute in erster Linie nach der äquivalenten Wattleistung von Glühlampen getroffen. Hier muss mit der Einführung von LEDs ein Umdenken erreicht werden.

In wenigen Jahren wird auch die OLED einen Reifegrad erreicht haben, um in den Massenmarkt der Allgemeinbeleuchtung eintreten zu können. Auch für die OLED werden diese Barrieren für den Markteintritt erwartet, die ähnliche Maßnahmen erfordern.

Aufgaben – Zusammengefasst ergibt sich damit der folgende Handlungsbedarf, um günstige Rahmenbedingungen zu schaffen:

- Barrieren zur breiten Markteinführung reduzieren (Garantiemodelle entwickeln, Wechselkompatibilität ermöglichen, Kompetenzzentren für LED-Lösungen schaffen)
- LED-Leitmarktinitiative weiterführen (u. a. weitere Demonstrationsprojekte, die wirtschaftliche Vorteile aufzeigen; Wahrnehmungskampagnen)
- Anreizprogramme aufsetzen
- Öffentliche Vergabe einsetzen
- Finanzierungskonzepte erarbeiten

- Normen und Vorschriften überarbeiten und an die LED anpassen

Wenn es gelingt, die spezifischen Möglichkeiten des Halbleiterlichts zu nutzen, das Gesamtsystem von der LED bis zur Leuchte zu optimieren und günstige Rahmenbedingungen für den Sprung in den Markt zu schaffen, kann der Siegeszug von LED und OLED maßgeblich in Deutschland und Europa stattfinden.

3.4.2

Solartechnik – Licht als Energieträger

Die Nutzung Erneuerbarer Energien ist bereits heute ein wesentlicher Bestandteil der Energieerzeugung, auf den wir nicht mehr verzichten können. Erneuerbare Energien bieten die Chance, aktiv die großen Herausforderungen des Klimawandels und der Ressourcenknappheit anzugehen und dabei das Wirtschaftswachstum zu stärken und neue Arbeitsplätze zu schaffen. Einen zentralen Stellenwert für den zukünftigen Strom-Mix in Deutschland wird die Photovoltaik einnehmen. Solarstrom wird bis zum Jahr 2030 rund 20 % des deutschen Strombedarfs decken können und somit im gleichen Zeitraum fast 500 Millionen Tonnen CO₂ einsparen. Durch die dezentrale Solarstromerzeugung werden zudem die Stromnetze entlastet und eine unabhängige und klimafreundliche Stromversorgung möglich.

Die deutsche Photovoltaik- und Solarthermie-Industrie steht international mit an der Spitze. Künftig gilt es, diese Position auch gegen die wachsende Konkurrenz aus Asien zu behaupten. Dafür muss die Solarwirtschaft ihre Anstrengungen weiter verstärken, die besten Produkte anzubieten und die Fertigungskosten kontinuierlich zu senken. Die Herausforderung dabei besteht darin, auch in Zukunft immer mindestens einen Schritt schneller zu sein als die Wettbewerber – Forschung und Entwicklung sind hierfür die entscheidende Grundlage.

3.4.2.1

Strom aus Licht – Der Wandel zur nachhaltigen Energieversorgung

In allen Energieszenarien für die Zukunft spielen Erneuerbare Energien (EE) die zentrale Rolle. Die Begrenztheit der Ressourcen Öl, Gas und Uran sowie die ungelösten Probleme zur Endlagerung des nuklearen Abfalls erzwingen ein Umdenken für die künftige Energieversorgung in Deutschland und weltweit. Der rasante Anstieg des CO₂-Anteils in der Atmosphäre unterstützt einen schnellen Wandel des Energiemarktes. Dies verdeutlicht eine Prognose des Bundesverbands Erneuerbare Energien (Abbildung 5). Demnach werden in 2020 mit 278 Terawattstunden (TWh) ca. 47 % des Strombedarfs in Deutschland durch Erneuerbare Energien erzeugt. Photovoltaik (PV) trägt in diesem Szenario 40 TWh bei. Dazu muss die installierte PV-Leistung von 12 bis 13 GWp (Gigawatt-Peak; erwarteter Stand Ende 2010) auf ca. 42 GWp ansteigen.

Der Europäische Photovoltaik-Industrieverband EPIA (European Photovoltaics Industry Association) geht sogar davon aus, dass bis zum Jahr 2020 in Europa 12 %

des Strombedarfs mit PV gedeckt werden können. Deutschland besitzt dabei eine Vorreiterrolle. EPIA erwartet, dass der deutsche Photovoltaikmarkt (3,8 GWp in 2009) weiter anwächst und im Jahr 2014 zwischen 4 GWp und 5,5 GWp betragen wird (EPIA, Global Market Outlook for Photovoltaics until 2014). Voraussetzung hierfür ist eine weitere Senkung der Kosten der PV und eine nachhaltige Unterstützung durch die Politik, um Investitionen in Deutschland voranzutreiben.

Die Schlüssel zur Kostenreduktion in der Photovoltaik sind einerseits Forschung und Entwicklung zur Steigerung der Effizienz und des Durchsatzes und andererseits eine erhöhte Produktionskapazität. Beides hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass die Preise für PV-Module drastisch reduziert werden konnten. Dies zeigt die empirische Preis-Erfahrungskurve für Silizium-PV-Module (Abbildung 6). Demnach reduzierten sich die Modulpreise im langjährigen Mittel um 22 %, wenn die kumulierte Produktion verdoppelt wurde. Ähnliche Kurven können auch für Dünnschichtmodule und für die Konzentrator-Photovoltaik (CPV) erstellt werden. Bei diesen »jungen« Technologien ist der vorhandene Datensatz noch nicht umfangreich genug, aber es wird in diesen Fällen eine leicht höhere Lernrate diskutiert.

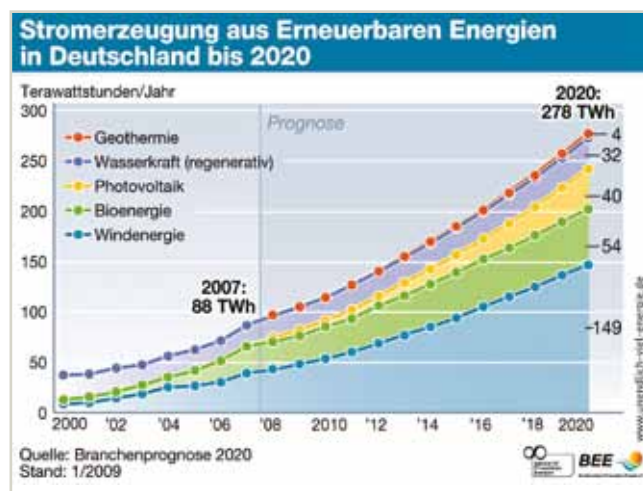


Abbildung 5: Erwartete Entwicklung der Stromproduktion in Deutschland bis 2020 (Quelle: Bundesverband Erneuerbare Energien)

3.4.2.2

Marktüberblick

Gemäß einer Studie des Marktanalysten Solarbuzz betrug die neu installierte PV-Leistung im Jahr 2009 weltweit 7,5 GWp. Dies entspricht einem Anstieg von ca. 20 % im Vergleich zu 2008. Europas Anteil betrug 5,6 GWp. Damit wurden in Europa etwa drei Viertel der weltweiten Kapazitäten errichtet. Der drittgrößte Markt nach Deutschland und Italien waren die USA. Hier betrug das Wachstum 36 % auf 485 MWp.

Weltweit stiegen im Jahr 2009 die Produktionskapazitäten im Bereich Solarzellen auf 9,34 GW (2008: 6,85 GW). China und Taiwan lieferten

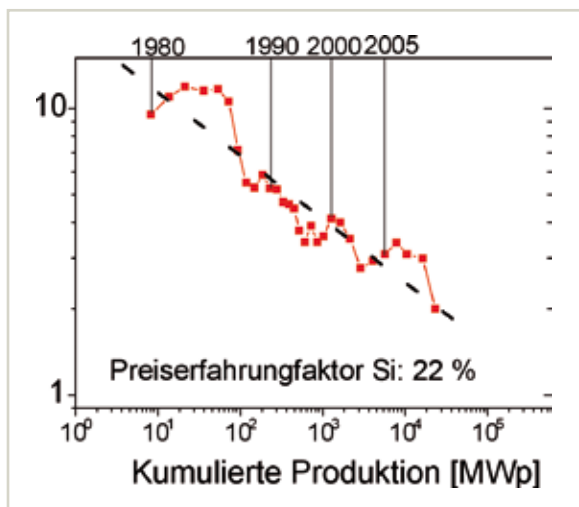


Abbildung 6: Empirische Preis-Erfahrungskurve für Silizium-basierte Photovoltaik-Module – aufgetragen ist der Modulpreis über der kumulierten Produktion

49 % des weltweiten Bedarfs. Europa musste ca. 74 % seines Bedarfs importieren.

Der weltweite Umsatz der PV-Unternehmen im Jahr 2009 betrug gemäß Solarbuzz 38,5 Mrd. USD. Der Analyst erwartet, dass der Markt bis 2014 um den Faktor 2,5 wachsen und ca. 100 Mrd. USD Umsatz erreichen wird.

3.4.2.3

Die deutsche Position

Das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) hat einen wirtschaftlichen Boom der Photovoltaik in Deutschland ermöglicht. In nur wenigen Jahren hat sich eine weltweit führende Industrie mit mehr als 100 produzierenden Unternehmen (Zellen, Module und Komponenten) am Standort Deutschland etabliert (Abbildung 7). Der Marktanteil deutscher Unternehmen liegt im Durchschnitt aller Wertschöpfungsstufen bei ca. 20 %, der deutsche Solar-Maschinenbau hat Marktanteile bis über 50 %.

Heute beschäftigt die PV-Branche etwa 63.000 Menschen in Deutschland, davon rund 55 % bei Industrie und Zulieferern und 45 % bei Handwerk und Großhandel. Die Preise für Solarstromanlagen konnten durch massive Investitionen der Branchenunternehmen in Technologieentwicklung und Produktionsausbau seit dem Jahr 2000 mehr als halbiert werden.

Eine wichtige Basis für den Erfolg der deutschen PV-Branche ist eine Vielfalt weltweit beachteter Forschungsaktivitäten. Die Spitzenstellung deutscher Forschungseinrichtungen zeigt sich beispielsweise im Bereich der Rekorde bei Wirkungsgraden von Solarzellen. Es gilt nun, den nächsten Schritt zu machen, neue Zell- und Modulkonzepte in die industrielle Anwendung zu überführen und die weltweit führende Position des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus zu nutzen, um das Potenzial innovativer Fertigungsverfahren zu erschließen.

3.4.2.4

Herausforderungen

Die positive Entwicklung der Photovoltaik wird weitergehen – so wird in Deutschland der durch PV erzeugte Anteil des Stroms weiter steigen. Der PV-Markt entwickelt sich aber nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Entsprechend entstehen in Europa, den USA und vor allem in China, Taiwan und Korea neue PV-Fertigungskapazitäten, und Deutschland wird sich dem zunehmenden Wettbewerb stellen müssen. Es gilt die bisherige technologische Spitzenstellung zu erhalten, durch Innovationen bei den PV-Herstellern und auch im PV-Maschinenbau, der eine effiziente Fertigung erst ermöglicht.

Entsprechende Anstrengungen in FuE vorausgesetzt, kann in Deutschland schon 2012 bis 2013 die erste Netzparität erreicht werden. Diese bezeichnet den Punkt, an dem elektrische Energie aus einer PV-Anlage zum gleichen Preis wie der Endverbraucherstrompreis angeboten werden kann. Sicherlich ist dann auch weiterhin eine staatliche Förderung in Deutschland und anderen

Ländern notwendig, um weitere Kostensenkungen zu ermöglichen, z. B. durch die Einspeisevergütung, die im EEG geregelt ist. Die Förderquote im EEG wird allerdings stark reduziert sein.

Für die Entwicklung und den weiteren Ausbau der Photovoltaik, auch nach 2020, sind Konzepte wie DESERTEC und die Entwicklungen bei der Elektromobilität von großer Bedeutung. Im DESERTEC-Konsortium haben sich Industrie und Institute zusammengeschlossen, um Konzepte zu entwickeln, mit denen langfristig (in den Jahren 2030 und danach) und nachhaltig Solarstrom in Afrika und Fernost generiert und nach Europa transportiert werden kann. Auch im Bereich der Elektromobilität wird die Photovoltaik eine wichtige Rolle spielen. Elektromobilität geht nur mit einer Reduzierung von CO₂ einher, wenn die elektrische Energie durch Erneuerbare

Energieproduktion bereitgestellt wird. Hier ist die Photovoltaik besonders geeignet, da sie die Energie dezentral bereitstellen kann. Umgekehrt kann die Elektromobilität als Speicher für die PV-erzeugte Energie dienen, so dass hier besondere Symbiosen zu erwarten sind.

Die Photovoltaik wird in den kommenden Jahren weiter wachsen, die Marktperspektiven sind hervorragend. Dabei stehen verschiedene Technologien im Wettbewerb: Flachmodule aus Silizium hatten in 2009 einen Marktanteil von ca. 80 %, Dünnschichttechnologien konnten den Marktanteil in 2009 auf ca. 20 % steigern. Daneben wurden in 2009 erste konzentrierende PV-Anlagen kommerziell (im Megawatt-Bereich) installiert. Organische und Farbstoff-basierende Solarzellen befinden sich in der Entwicklung.

PV-Marktdaten Deutschland 2009	
Neu installiert	3,8 GWp
Gesamt installiert Ende 2009	9,8 GWp
Investitionen in Neuanlagen	10 Mrd Euro
Anzahl Mitarbeiter	63.000
Anzahl Komponentenhersteller	> 100
Durchschnittliches jährliches Marktwachstum 2000 – 2009	62%
PV Systempreis < 100 kWp Ende 2009 pro kWp	3.135 Euro
Solarstromproduktion	6,2 TWh
Solaranteil am Stromverbrauch	1,1 %
Produktion Solarzellen 2009	2,5 GWp
Produktion Solarmodule 2009	2,1 GWp

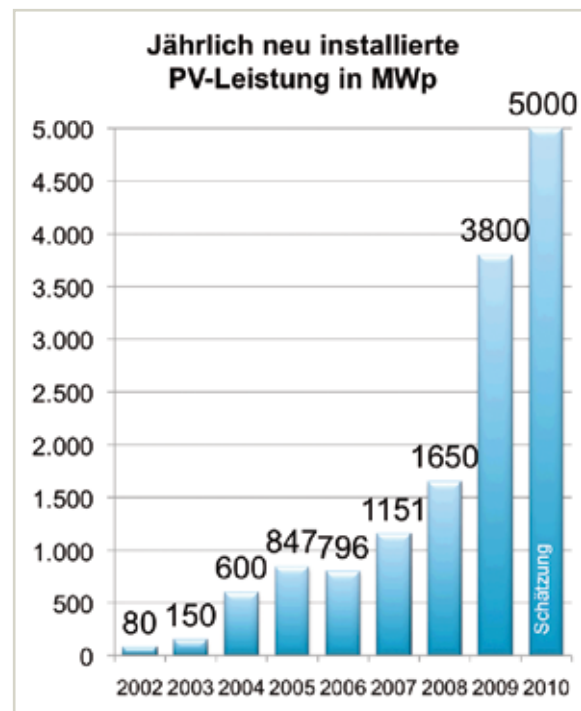


Abbildung 7: Entwicklung der PV-Marktdaten in Deutschland. Links: Kennzahlen für den PV-Markt 2009; Rechts: Jährliche PV-Installationen in Deutschland von 2002 bis 2010 (Quelle: Bundesnetzagentur, BSW-Solar)



Jede Technologie hat spezifische Vorteile und wird in bestimmten Bereichen zum Einsatz kommen. Für Flachmodule aus Silizium und Dünnschicht sind der Hausdachmarkt und die Freiflächenanwendung von Bedeutung, für die konzentrierende Photovoltaik ist der Kraftwerksmarkt in sonnenreichen Gegenden mit einem hohen Anteil direkten Sonnenlichts (siehe DESERTEC) besonders interessant. Gebäudeintegrierte PV (building integrated PV – BIPV) ist für die Silizium- und Dünnschichtflachmodule sowie Farbstoff-basierende Module ein wichtiger Markt. Die organische PV, die auf flexiblen Substraten hergestellt werden kann, wird als erstes in Consumer-Produkten Anwendung finden.

Um die Potenziale der Photovoltaik zu erschließen, sind umfangreiche Investitionen in Forschung und Entwicklung erforderlich. Diese sollen insbesondere die nötigen Kostenreduktionen ermöglichen, damit PV in 2020 einen substantiellen Beitrag zur Energiebereitstellung in Deutschland aber auch weltweit leisten kann.

Die verschiedenen PV-Technologien besitzen z. T. sehr unterschiedliche Reifegrade und bringen für die weitere Entwicklung bis 2020 unterschiedliche Herausforderungen mit sich.

PV-Module auf der Basis kristallinen Siliziums

Mit ca. 80 % Marktanteil in 2009 sind Module mit kristallinen Si-Solarzellen (c-Si) die führende PV-Technologie, auch wenn Cadmium-Tellurid und andere Dünnschichtmodule bedeutende Marktanteile hinzugewinnen konnten. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau einer heutigen typischen industriellen c-Si-Solarzelle, sowie ein Beispiel einer Hocheffizienzstruktur, wie sie heute bereits im Labor realisiert wurde. Die Zelle besteht aus (von oben nach unten) einer Antirefleksions (AR)-Schicht auf einer texturierten Oberfläche mit einem Metallkontakt-Gitter, dem n- (oder p-) diffundierten Emitter, dem p- (oder n-) dotierten Volumen (bulk) der Zelle mit p+ (n+)-dotierter Rückseitschicht und Rückseitenmetallisierung. Der Wirkungsgrad liegt je nach Materialqualität und Technologie zwischen 14 und 20 %.

*Foto oben: Der Sonne nachgeführte Konzentrator-Photovoltaikmodule
© Concentrix Solar GmbH*

Foto Mitte: Photovoltaikmodule – die Energiequelle der nächsten Generation © SCHOTT Solar AG

*Foto rechts: Fertigung von Konzentrator-Photovoltaikmodulen
© Concentrix Solar GmbH*

Zu diesem Grundschemata gibt es eine Fülle von Variationen sowohl im Aufbau der Zelle als auch in ihrer Prozessierung, die alle zum Zweck haben, entweder die Kosten zu reduzieren oder den Wirkungsgrad zu erhöhen. Einige Variationen werden bereits in der Fertigung eingesetzt, während sich andere noch in der Entwicklung befinden.

Die Hauptaufgaben der Entwicklung bis 2020 sind: Reduktion der Herstellungskosten von Wafer-Si, Materialersparnis durch dünnere und größere Wafer, Anpassung der Prozessschritte an Ausgangsmaterial verschiedener Qualitäten, Erhöhung des Automatisierungsgrades und Einführung neuer Produktionstechniken. Damit verbundene FuE-Aufgaben im Bereich der Photonik sind im Abschnitt Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland aufgelistet.

Dünnschicht-PV-Module

Die drei wichtigsten PV-Dünnschicht-Technologien sind Cadmium-Tellurid (CdTe), amorphes bzw. mikrokristallines Si (a-Si bzw. μ -Si) und Kupfer-Indium(Gallium)-Diselenid (CI(G)S). Ihr Anteil am Weltmarkt in 2009 betrug ca. 20 %, wobei vor allem CdTe-Solarzellen der Firma First Solar in den letzten Jahren einen großen Zuwachs verzeichnen konnten (2009: CdTe 9,0 %, a-Si/ μ -Si 6,1 %, CI(G)S 1,7 %). Den schematischen Aufbau der Module zeigt Abbildung 9. Vorteile dieser Technologien liegen in der materialeffizienten, großflächigen Schichtabscheidung, der integrierten Modulfertigung sowie in geringem Materialverbrauch durch Schichten von wenigen Mikrometern Stärke. Das kann zu Lernkurven führen, die steiler sind, d.h. eine größere Kostenreduktion aufweisen, als bei Si-Modulen.

Nachteile sind die noch zu geringen Wirkungsgrade (zwischen 8 % und 13 %) und die z. T. zu hohen Fertigungskosten, die durch hohe Investitions- und teilweise auch Materialkosten bedingt sind. Die Hauptaufgaben der Entwicklung bis 2020 sind demnach: Erhöhung des Wirkungsgrades, Reduktion der Herstellungskosten von Dünnschicht-PV-Modulen. Damit verbundene FuE-Aufgaben im Bereich der Photonik sind im Abschnitt Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland aufgelistet.

Hocheffiziente Mehrfach-Solarzellen für die Konzentrator-PV

Solarzellen mit mehreren pn-Übergängen, die das Sonnenlicht besser ausnutzen, basieren derzeit hauptsächlich auf III-V-Halbleitern. Für Satellitenanwendungen wird heute eine Tripelsolarzelle aus GaInP/GaInAs/Ge mit Wirkungsgraden um 30 % (unter dem extraterrestrischen Spektrum AM0) eingesetzt. Für terrestrische Anwendungen in Flachmodulen sind diese Zellen zu teuer, sie sind aber ideal für Konzentrator-Systeme mit hohen Konzentrationen ($100 < C < 1000$). Der Vorteil dieser Systeme liegt in ihren hohen Wirkungsgraden und einer steileren täglichen Erntekurve, d. h. einer wesentlich größeren Sonnenausbeute, ein Nachteil ist die Notwendigkeit der Nachführung, da nur das direkte Sonnenlicht ausgenutzt werden kann. Dies erfordert eine technolo-

gische und ökonomische Optimierung des Gesamtsystems aus Zelle, Optik und Nachführeinheit.

Die Fotos rechts zeigen exemplarisch zwei Systemansätze, die beide hocheffiziente GaInP/GaInAs/Ge Dreifach-solarzellen mit industriellen Wirkungsgraden um 37 % nutzen. Zur Konzentration des Lichts werden Fresnel-Linsen bzw. Parabolspiegel verwendet.

Die Anwendung der Konzentrator-PV wird im Kraftwerksbereich in Größen von 1 bis 100 MWp gesehen. Die Verringerung der Kosten aller Systemelemente ist hier die Hauptaufgabe der Entwicklung bis 2020. Die Photonik kann dazu den wichtigsten Beitrag leisten. Damit verbundene FuE-Aufgaben sind im Abschnitt Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland aufgelistet.

Organische Solarzellen

Organische Solarzellen (OSZ) sind ein relativ junges Forschungs- und Entwicklungsgebiet. Die Wirkungsweise einer OSZ unterscheidet sich prinzipiell von derjenigen einer Halbleiter-pn-Solarzelle: Die benötigten Schichtdicken sind wegen der hohen Absorption sehr dünn (etwa 100 nm), so dass nur wenig Material benötigt wird. Allerdings ist die Ladungsträgerbeweglichkeit gering und die Ladungsträger sind nach der Absorption stark exzitonic gebunden. Im Gegensatz zu den klassischen Technologien erfolgt die Ladungstrennung nicht durch

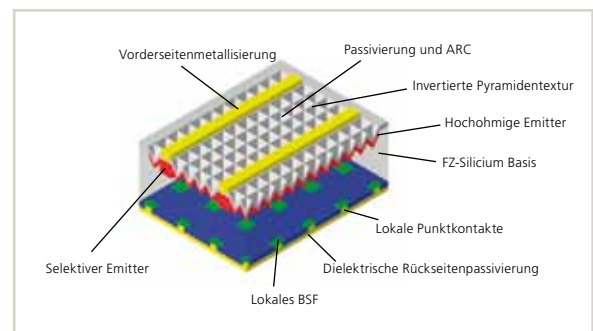
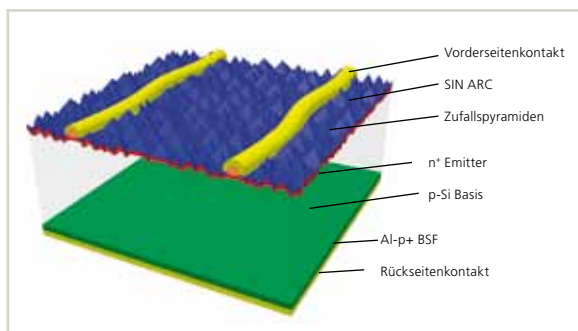


Abbildung 8: Links: schematische Darstellung einer typischen industriellen c-Si-Solarzelle; Rechts: schematische Darstellung einer Si-Hocheffizienzzelle (Quelle: Fraunhofer-ISE)



Dotierung, sondern durch materialabhängige interne Spannungen. Um den Ladungstransport innerhalb der Zellarchitektur sicherzustellen, sind dabei komplexe Mischsysteme mit angepassten geometrischen und elektronischen Strukturen erforderlich. Abbildung 10 zeigt einen schematischen Querschnitt durch eine OSZ. Ein Vorteil der OSZ-Technologie liegt in den potenziell einfachen Herstellungsverfahren für große Flächen, die aber bisher noch zu kleine Wirkungsgrade zeigen. Auf kleinen Flächen ($1\text{--}2\text{ cm}^2$) wurden Wirkungsgrade bis knapp 8 % erreicht.

Oberstes Ziel der FuE auf diesem Gebiet bis 2020 sind die Entwicklung der großflächigen Auftragung der organischen Schichten auf das Elektrodenmaterial sowie die Erhöhung der Langzeitstabilität und des Wirkungsgrades. Hierfür müssen auch neue organische Materialien und Materialkombinationen erprobt werden – Aufgaben, die im Bereich der Photonik und der organischen Elektronik liegen (siehe den Abschnitt Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland).

3.4.2.5

Handlungs- und Forschungsbedarf in Deutschland

Um die deutsche Technologie- und Marktführerschaft zu behaupten, werden Kosten senkende, hoch innovative Herstellungsverfahren über die gesamte Wertschöpfungskette und Produkte höchster Qualität und Leistung benötigt. Dies erfordert

- Hocheffiziente Bearbeitungsprozesse und Fertigungsverfahren mit dem Ziel einer höheren Produktivität und/oder geringerer Herstellkosten
- Neue Materialsysteme und neuartige Zell- und Modulkonzepte für höhere Effizienzen
- Optimal abgestimmte Solarzellen-, Modul- und Systemtechnologien für wirtschaftliche Fertigungsprozesse

Foto links: Konzentratormodul mit Fresnel-Linsen © Fraunhofer ISE

Foto rechts: Konzentratorsystem mit Parabolspiegeln © Zenith Solar

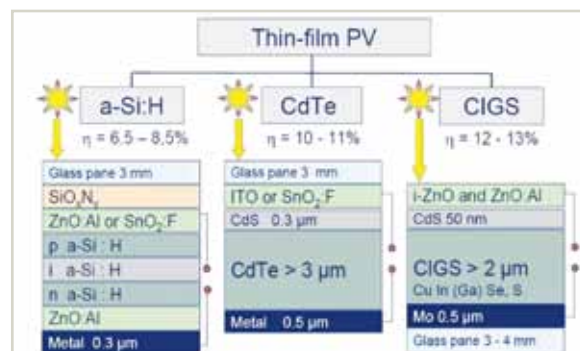


Abbildung 9: Schematischer Aufbau der drei wichtigsten Dünnschicht-Solarzellen: a-Si, CdTe und CIGS (Quelle: VON ARDENNE Anlagen-technik GmbH)

- Intelligente Solarstromsysteme, insbesondere mit integriertem Speicher

Wesentliche Herausforderungen in Forschung und Entwicklung betreffen neue Materialien, Photonenmanagement und Herstellungsprozesse. Fortschritte in diesen Bereichen entfalten eine große Hebelwirkung auf die PV-Technologie insgesamt und wirken über weite Bereiche der Zell- und Modulkonzepte. Photonische Technologien bieten hier zahlreiche Lösungsansätze, die entscheidend dazu beitragen können, dass volle Potenzial der Photovoltaik, aber zunehmend auch der Photothermie sowie neuer Felder wie der Photokatalyse und Photosynthese, in der nächsten Dekade zu erschließen. Der Forschungsbedarf in der Photovoltaik ist im Folgenden zusammengestellt.

Neue Materialien

- Nanostrukturen und Quantum-Dot-Schichten für Si-Tandemzellen
- Materialien und Dotierungen für Heterojunction-Si-PV-Zellen

- Kostengünstige transparente und leitfähige Schichten
- Materialien für Dünnschicht-Mehrfachzellen
- Materialien für alternative Fertigungstechniken (z. B. Drucktechnologien)
- Materialien für optische Spiegel, Konzentratoren und Sekundär-Konzentratoren (»secondaries«) für CPV-Anwendungen
- Neue Verbindungshalbleitermaterialien auf II-VI und III-V-Basis
- Neue organische Halbleiter und Halbleiter-Kombinationen mit verbesserter Ladungsträger-Extraktion sowie Schichten mit verbesserter Langzeitstabilität unter Lichteinwirkung
- Materialien für Fluoreszenz-Kollektoren, Rückseiten-Bragg-Reflektoren sowie Up- und Down-Konversion von Photonen

Photonenmanagement

- Neuartige Texturierungen für kristalline Si-Solarzellen und Dünnschichtsolarzellen
- Rückseiten-Beugungsgitter (»ultra light trapping«), insbesondere für dünne Si-Wafer
- Einsatz dielektrischer Oberflächenpassivierung
- Monolithische Mehrfach-Solarzellen auf Basis kristallinen Siliziums
- Si-Konzentrator-Solarzellen für niedrige Konzentration ($C < 100$)
- Spektral selektive Zwischenreflektoren für Dünnschicht-Tandem-Solarzellen (z. B. Bragg-Reflektoren oder Opalstrukturen)
- Verbesserung der Lichtausnutzung und Lichtstreuung z. B. durch Nanopartikel (Nanoplasmonik) sowie Strukturen zur Entkopplung von Front- und Rückkontakt-Lichtstreuung

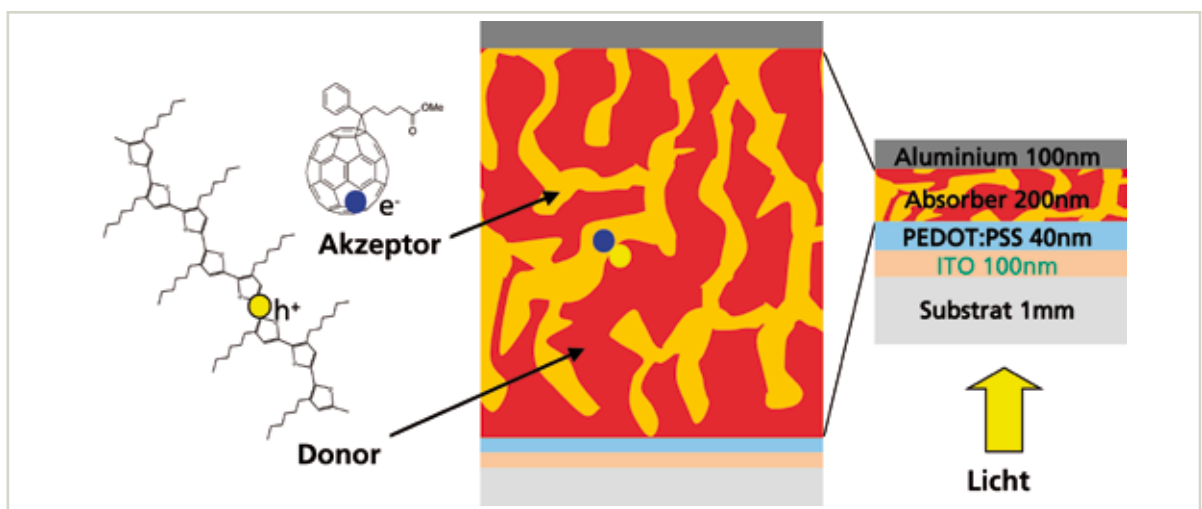


Abbildung 10: Schema einer organischen Solarzelle (OSZ) mit einem Netzwerk miteinander vermischter Donor- und Akzeptor-Phasen und den Wegen der Elektronen (blau) und Löcher (gelb) (Quelle: Fraunhofer-ISE)

- Entwicklung semitransparenter, organischer und Dünnschicht-Solarzellen
- Optimierung von Fresnel- und anderen optischen Konzentratoren und Entwicklung neuartiger Sekundär-Konzentratoren (»secondaries«) für CPV-Systeme
- Entwicklung von III-V Mehrfachsolarzellen (3-6-fach) mit Wirkungsgraden zwischen 40 und 50 %
- Solarzellen mit Fluoreszenz-Kollektoren (»spectral shaping«)
- Einsatz photonischer Kristalle, winkelselektiver Filter und Plasmonik-Technologie für den Lichteinfang
- Weiterentwicklung von »spectral splitting«-Systemen
- Optimierung der Zellstrukturen organischer Solarzellen zur Erreichung höherer Wirkungsgrade auf größeren Flächen

Herstellungsprozesse

- Einsatz von Laser-Techniken in der Fertigung, z. B. Laser Fired Contacts, Laser Doping, Hole drilling by Laser, Laser-Ablation für Frontkontakte und Laser-Dicing
- Inline-Monitoring in der Produktion mit optischen, elektrischen und Röntgen-Verfahren
- Optimierung großflächiger Plasma- und Vakuum-prozesstechnologien zur Reinigung, zum Ätzen, zur Dotierung und zur Schichtabscheidung von Antireflex-/Passivierungsschichten, Front- und Rückkontakten sowie Heterojunction-Materialien
- Entwicklung alternativer, großflächiger Herstellverfahren (z. B. Drucktechnologien, »Rolle-zu-Rolle«-Verfahren), insb. für organische Schichten und Doppelschichten
- Einsatz und Optimierung der Laser- und Elektronenstrahl-Kristallisation

- Optimierung der Produktionsverfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und optischen Elementen für CPV-Systeme mit höherem Durchsatz und besserer Ausbeute bei geringeren Kosten
- Entwicklung großflächiger Verkapselungstechnologien

3.4.2.6

Rahmenbedingungen

Die Photovoltaik in Deutschland wird die ehrgeizigen Wachstumsziele nur erreichen, wenn Forschung, Industrie und Politik eng zusammenarbeiten. Eine konjunkturbereinigte industrielle Wachstumsrate von 20 bis 30 % über zwei Jahrzehnte aufrecht zu erhalten, erfordert von der Industrie bedeutende investive Anstrengungen. Diese lassen sich nur durch entsprechende Renditen rechtfertigen. Im vergangenen Jahrzehnt war die politische Unterstützung z. B. im Rahmen des EEG eine Grundlage dafür. Dadurch konnte ein schnelles Wachstum der PV-Industrie erreicht werden, die Kosten für PV-generierten Strom konnten nachhaltig gesenkt werden. Im Sinne einer mittel- bis langfristigen Umstellung der Energiebereitstellung auf Erneuerbare Energien muss dieses Wachstum auch bis 2020 und darüber hinaus erhalten bleiben. Dies bedeutet konkret:

- Die Industrie muss auch weiterhin hohe Summen in den Ausbau der Fertigungskapazitäten investieren und gleichzeitig die Forschungsintensität deutlich erhöhen. Nur so kann eine weitere Kostendegression erwartet werden.
- Die Politik muss die günstigen Rahmenbedingungen für den Ausbau der Erneuerbaren Energien und insbesondere der Photovoltaik fortsetzen. Dazu zählen der Erhalt des EEGs, aber auch die Unterstützung neuer Initiativen wie DESERTEC oder der Elektromobilität.

■ Die Forschungseinrichtungen müssen ihre Anstrengungen verstärken und dabei industrietaugliche Konzepte in den Mittelpunkt stellen, damit Deutschland im internationalen Wettbewerb, hier insbesondere mit China, die technologische Spitzenposition behält. Dies sichert auch den Industriestandort Deutschland. Hierzu müssen die Forschungsmittel im Bereich der PV seitens der öffentlichen Hand (Bund, Land, Europa) sowie seitens der Industrie aufgestockt werden. Dabei ist eine enge Kooperation der Forschungseinrichtungen mit den Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Zell- und Modultechnologie bis zur Produktionstechnik anzustreben. Eine frühzeitige Berücksichtigung von Fragen zum Schutz des geistigen Eigentums ist erforderlich.

Die öffentliche Förderung für die PV wird noch einige Zeit notwendig sein, bis die Wirtschaftlichkeit auf dem Energiemarkt erreicht ist. Wichtig dabei ist Kontinuität, die eine Planbarkeit der Vorhaben für alle Akteure ermöglicht. Hier gab es in der Vergangenheit politisch bedingte Brüche, die zu »Reibungsverlusten« in der FuE-Landschaft führten. Dies sollte künftig vermieden werden. Es wäre wünschenswert, die Verantwortung für die Förderung der PV-Technologien in einem Ministerium zu bündeln, um eine konzertierte Förderung aller entlang der Wertschöpfungskette agierenden Unternehmen und Institute zu gewährleisten.

Die Photovoltaik hat in Deutschland inzwischen eine solche Größe erreicht, dass zunehmend auch die Integration und das Zusammenspiel aller Elektrizitätserzeuger in den Blick genommen werden muss. Wichtige Erfordernisse sind hier:

- Eine kontinuierliche Abstimmung zwischen den erneuerbaren und den konventionellen Energieerzeugern, insbesondere im Hinblick auf CO₂-Reduktionsstrategien
- Dazu nötig sind internationale Programme und Absprachen insbesondere im Rahmen der EU.

■ Weiterhin ist es notwendig, die nationalen und internationalen Stromnetze auszubauen und an die Erfordernisse der erneuerbaren Energieträger (z. B. dezentrale Erzeugung) anzupassen.

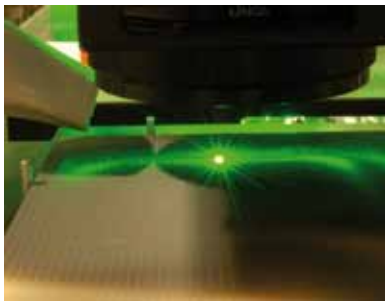
Mit entschlossenem Handeln bei Forschung und Entwicklung und günstigen Rahmenbedingungen für industrielle Investitionen kann die hervorragende Position Deutschlands in der Photovoltaik erhalten und weiter ausgebaut werden, um Wertschöpfung und Arbeitsplätze in Deutschland zu sichern und eine nachhaltige Energieversorgung zu gewährleisten.

3.4.2.7

Dezentrale Energiespeicherung und alternative Energieerzeugung

Neben der weiteren Erforschung und Optimierung der direkten Umwandlung von Sonnenstrahlung in Strom bildet die effektive Speicherung von Sonnenenergie eine zentrale Herausforderung der kommenden Dekaden. Dabei geht es weniger um die Fragestellung, wie der erzeugte Strom besser in Akkumulatoren gespeichert wird, sondern wie die einfallende Strahlung möglichst effizient in ein speicherfähiges Medium überführt werden kann.

Das bekannteste und größte Vorhaben hierzu ist das DESERTEC-Projekt. In diesem Konzept wird gebündeltes Sonnenlicht zur Erwärmung bzw. Verdampfung eines Trägermediums eingesetzt. Anschließend erfolgt die Energieerzeugung durch eine Dampfturbine oder die Speicherung in einem Wärmereservoir zur Stromerzeugung während der Nacht. Aufgrund der hohen Sonnenintensitäten und der herausfordernden Umweltbedingungen in den geeigneten Regionen werden insbesondere an die optischen Komponenten zur Fokussierung und Weiterleitung des Lichtes extreme Anforderungen gestellt. Die weitere Verbesserung der optischen Eigenschaften und Stabilität gegenüber äußeren Einflüssen stellt damit einen wesentlichen Bestandteil des Ausbaus dieser Technologie dar.



Ein weiterer vielversprechender Ansatz zur Speicherung der Sonnenenergie ist die Gewinnung von Wasserstoff, Methan, Biogas oder andere Stoffen mit Hilfe der einfallenden Strahlung – »solar-to-fuel energy conversion«. Insbesondere die Erzeugung von Wasserstoff und Methan als Brennstoffmaterial von Brennstoffzellen gehört angesichts des stetig steigenden Bedarfs an Mobilität und Energie sowie der Verknappung fossiler Brennstoffe zu den zentralen Forschungsthemen der nächsten Jahrzehnte. Die bisherigen Konzepte zur Erzeugung der Brennstoffmaterialien basieren vor allem auf photokatalytischen oder photosynthetischen Konzepten, wobei sich die Forschungsaktivitäten derzeit auf einzelne Vorhaben begrenzen. Ein Baustein für die weitere Wirkungsgradsteigerung ist die Implementierung photonischer Konzepte. Hier gilt es insbesondere Materialentwicklungen zu fördern und Skalierungskonzepte zu entwickeln. Vor dem Hintergrund der bislang getrennten Betrachtung beider Themen stellt die Förderung interdisziplinärer Teams ein wichtiges Instrument für die Entwicklung innovativer Prozesse und Technologien dar.

*Foto links: Laserprozesse steigern die Effizienz von Solarzellen
© IPE, Universität Stuttgart*

*Foto Mitte: In eine Dachverglasung integrierte Solarmodule
© SCHOTT AG*

Foto rechts: Solarzellenproduktion © SCHOTT AG

3.4.3

Zusammenfassung

Beleuchtung – Halbleiterlichtquellen wie LED und organische LED (OLED) 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 völlig neue Designmöglichkeiten. Knapp 20 % des weltweiten Stromverbrauchs wird für die Beleuchtung eingesetzt. Mit den künftigen LED-Lichtquellen in Kombination mit intelligenten Lichtmanagementsystemen könnten bis zu zwei Drittel dieser Energie eingespart und CO₂-Emissionen reduziert werden.

Im Jahre 2008 betrug der Weltmarkt für Lampen und LEDs etwa 20 Mrd. €. Deutschland hält daran einen Anteil von 12 %. Weitere Wertschöpfung entsteht bei den zahlreichen zumeist kleinen und mittelständischen Leuchtenherstellern. Deutschland startet damit aus einer führenden Position in das Rennen um die künftigen Märkte in der Beleuchtung. Hier bieten sich Chancen, aber auch Herausforderungen: Halbleiter- und Elektronikhersteller drängen in den Beleuchtungsmarkt und üben Druck auf die Hersteller traditioneller Lichtquellen und Beleuchtungssysteme aus.

LED und OLED werden die Verbreitung intelligenter Lichtsteuerungssysteme vorantreiben. Adaptive und individuelle Lichtlösungen werden an Bedeutung gewinnen. Halbleiterlichtquellen werden in Zukunft höhere Funktionalitäten bieten, die Helligkeitsvariationen und Farbwechsel einschließen, physiologische und biologische Aspekte des Lichts nutzen und durch intelligente Ansteuerung unser tägliches Leben begleiten. Für Deutschland und Europa spielt dabei die Verbindung von Technik, Design und intelligenter Funktion eine besondere Rolle. Im Gegensatz zur

konventionellen Mikroelektronik wird es im Beleuchtungsmarkt der Zukunft eben nicht nur auf kostengünstige Massenproduktion ankommen.

Um den Siegeszug der LED in der Allgemeinbeleuchtung für Deutschland erfolgreich zu gestalten, müssen wir uns in der nächsten Dekade den Herausforderungen von der Forschung bis hin zum Markteintritt stellen:

- Wir müssen Lichtausbeute und Helligkeit weiter steigern: Ziele für 2020 sind kaltweiße LEDs mit einer Effizienz von 240 lm/W und warmweiße LEDs mit 230 lm/W. Gleichzeitig müssen die Kosten bis 2020 um den Faktor zehn reduziert werden. Dies erfordert neue Aufbau- und Verbindungstechniken und neue, automatisierte Prozesstechnologien.
- Wir müssen die Systemeffizienz insgesamt verbessern, von der LED über massentaugliche Light Engines bis zur Leuchte unter Einbeziehung von Materialien, LED-Chip, Multichip-Gehäuse, Elektronik, thermischem Management und Optik.
- Wir müssen LED-Lichtlösungen schaffen, die die Möglichkeiten zur Steuerung von Helligkeit, Lichtfarbe und Lichtrichtung nutzen. Dazu gilt es, die Integration von Sensoren und Ansteuerungen, intuitive Bedienkonzepte und das Zusammenführen von Beleuchtung und Kommunikation zu erforschen.
- Und wir müssen das Potenzial physiologisch wirksamer Beleuchtung erschließen; von medizinischen Studien bis hin zu Anforderungen und Normen für Beleuchtungssysteme.

Mit den OLEDs werden wir noch einen Schritt weiter gehen: Transparente Lichtfolien könnten in Glasscheiben eingesetzt werden, eine Kombination mit der organischen Photovoltaik ist möglich. Ein Fernziel ist die Verschmelzung von Beleuchtung und Energieversorgung.

Um den Wechsel zum intelligenten Lichtmanagement auf der Basis des Halbleiterlichts voranzutreiben, müssen wir Innovationsbarrieren beseitigen. Es gilt, Versorgungssicherheit zu bieten, Vertrauen in Qualität und Energieeinsparung der neuen Lösungen zu erreichen und Garantiemodelle zu entwickeln. Darüber hinaus sind neue Finanzkonzepte und Investitionsmodelle (Contracting etc.) erforderlich. Die Politik muss die Forschungsförderung schnell und flexibel gestalten. Zudem könnten von der Politik unterstützte Instrumente wie die umweltfreundliche Beschaffung oder Anreizprogramme den Markteintritt neuer Lichtlösungen deutlich beschleunigen.

Wir haben es in der Hand: Wenn wir Forschung und Entwicklung weiter vorantreiben und günstige Rahmenbedingungen für den Sprung in den Markt schaffen, kann der Siegeszug von LED und OLED in der nächsten Dekade maßgeblich in Deutschland und Europa stattfinden.

Energie – Einen zentralen Stellenwert für den zukünftigen Strom-Mix in Deutschland kann die Photovoltaik (PV) einnehmen. Solarstrom wird bis zum Jahr 2030 rund 20 % des deutschen Strombedarfs decken können und somit im gleichen Zeitraum fast 500 Millionen Tonnen CO₂ einsparen.

Der weltweite Umsatz der PV-Unternehmen im Jahr 2009 betrug 38,5 Mrd. USD. Bis 2014 wird ein Anstieg des Marktvolumens auf 100 Mrd. USD erwartet. Der Marktanteil deutscher Unternehmen liegt im Durchschnitt aller Wertschöpfungsstufen bei ca. 20 %, der deutsche Solar-Maschinenbau hat Marktanteile bis über 50 %.

Die deutsche Photovoltaik-Industrie steht international mit an der Spitze. Künftig gilt es, diese Position auch gegen die wachsende Konkurrenz aus Asien zu behaupten. Dafür werden Kosten senkende, hoch innovative Herstellungsverfahren über die gesamte Wertschöpfungskette und Produkte höchster Qualität und Leistung benötigt. Dies erfordert:

- Hocheffiziente Bearbeitungsprozesse und Fertigungsverfahren mit dem Ziel einer höheren Produktivität und/oder geringerer Herstellkosten
- Neue Materialsysteme und neuartige Zell- und Modulkonzepte für höhere Effizienzen
- Optimal abgestimmte Solarzellen-, Modul- und Systemtechnologien für wirtschaftliche Fertigungsprozesse
- Intelligente Solarstromsysteme, insbesondere mit integriertem Speicher

Mit ca. 80 % Marktanteil in 2009 sind Module mit kristallinen Si-Solarzellen die führende PV-Technologie. Der Wirkungsgrad liegt je nach Materialqualität und Technologie zwischen 14 und 20 %. Die Hauptaufgaben der Entwicklung bis 2020 sind: Reduktion der Herstellungskosten von Wafer-Si, Materialersparnis durch dünnere und größere Wafer, Anpassung der Prozessschritte an Ausgangsmaterial verschiedener Qualitäten, Erhöhung des Automatisierungsgrades und Einführung neuer Produktionstechniken. Laserverfahren gewinnen hier zunehmend an Bedeutung.

Die drei wichtigsten PV-Dünnschicht-Technologien sind Cadmium-Tellurid, amorphes bzw. mikrokristallines Silizium und Kupfer-Indium(Gallium)-Diselenid. Ihr Anteil am Weltmarkt in 2009 betrug ca. 20 %. Nachteile sind die noch zu geringen Wirkungsgrade (zwischen 8 % und 13 %) und die z. T. zu hohen Fertigungskosten. Die Hauptaufgaben bis 2020 sind demnach: Erhöhung des Wirkungsgrades und Reduktion der Herstellungskosten von Dünnschicht-PV-Modulen.

Mehrfach-Solarzellen für die konzentrierende Photovoltaik basieren auf III-V-Halbleitern. Der Vorteil der Konzentrator-Systeme liegt in ihren hohen Wirkungsgraden und einer steileren täglichen Erntekurve; ein Nachteil ist die Notwendigkeit der Nachführung. Dies erfordert eine technologische und ökonomische Optimierung des Gesamtsystems aus Zelle, Optik und Nachführeinheit. Die Verbesserung der Leistungsbeständigkeit bei hohen Konzentrationen sowie die Verringerung der Kosten aller Systemelemente sind hier die Hauptaufgaben.

Die organische Photovoltaik (OPV) ist ein relativ junges Forschungs- und Entwicklungsgebiet. Ein Vorteil der OPV-Technologie liegt in den potenziell einfachen Herstellungsverfahren für große Flächen, die aber bisher noch zu kleine Wirkungsgrade zeigen. Auf kleinen Flächen wurden Wirkungsgrade bis etwa 8 % erreicht. Oberste Ziele bis 2020 sind die Entwicklung der großflächigen Auftragung der organischen Schichten auf das Elektrodenmaterial sowie die Erhöhung der Langzeitstabilität und des Wirkungsgrades. Hierfür müssen auch neue organische Materialien und Materialkombinationen erforscht werden.

Wesentliche Herausforderungen in Forschung und Entwicklung betreffen neue Materialien, Photonenmanagement und Herstellungsprozesse. Photonische Technologien bieten hier zahlreiche Lösungsansätze, die entscheidend dazu beitragen können, dass volle Potenzial der Photovoltaik in der nächsten Dekade zu erschließen.

Dabei müssen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik eng zusammenarbeiten:

- Die Industrie muss in den Ausbau der Fertigungskapazitäten investieren und gleichzeitig die Forschungsintensität deutlich erhöhen.
- Die Politik muss die günstigen Rahmenbedingungen für den Ausbau der Erneuerbaren Energien und insbesondere der Photovoltaik fortsetzen.
- Die Forschungseinrichtungen müssen ihre Anstrengungen weiter verstärken und dabei industrietaugliche Konzepte in den Mittelpunkt stellen.

Hierzu müssen die Forschungsmittel von öffentlicher Hand und Industrie aufgestockt werden. Dabei ist eine enge Kooperation entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Zell- und Modultechnologie bis zur Produktionstechnik anzustreben. Die Verantwortung für die Förderung der PV-Technologien sollte auf Bundesebene in einem Ministerium gebündelt werden.

Gezielte Investitionen in FuE und neue Produktionskapazitäten werden die nötigen Kostenreduktionen ermöglichen, damit die Photovoltaik in 2020 einen substanziellen Beitrag zur Energiebereitstellung in Deutschland aber auch weltweit leisten kann.

3.5

ORGANISCHE ELEKTRONIK

Die Deutsche Position

Die Anwendungen der organischen Elektronik werden unseren Alltag nachhaltig verändern. Organische Leuchtdioden, organische Solarzellen und organische Sensoren werden schon bald die Märkte erobern. Die Umsatzerwartungen für die organische Elektronik belaufen sich auf etwa 50 bis 60 Milliarden USD bis 2020. Langfristig wird ein Marktvolumen von mehreren hundert Milliarden Euro prognostiziert. Das Rennen um diese Märkte hat begonnen, und unser Land ist dabei in einer führenden Position.

In der Grundlagenforschung ist Deutschland, mit den Clustern in Dresden und Heidelberg, international an der Spitze. Bei den Basistechnologien – Chemie, Materialsysteme, Verfahrens- und Drucktechnik – ist die deutsche Industrie hervorragend aufgestellt. In den Zielmärkten haben deutsche Unternehmen starke Positionen, allem voran bei Beleuchtung und Photovoltaik. Key-Player wie BASF, Merck, OSRAM und Philips stehen aktuell vor dem Markteintritt. Die Vernetzung mit weiteren Anwendungsbranchen und die Entwicklung von Leitmärkten sind unsere nächsten Aufgaben.

In den kommenden Jahren werden die Weichen für die Märkte der organischen Elektronik gestellt. Deutschland hat alle Chancen, aus dem Wettstreit um Ideen und Innovationen als Sieger hervorzugehen. Entschlossenes Handeln in Forschung und Entwicklung und gezielte Investitionen sind der Schlüssel dazu.



Gedruckte Elektronik eröffnet neue Möglichkeiten © KD Busch

Die organische und großflächige Elektronik (OLAE – Organic and Large Area Electronics) ist eine der Zukunftstechnologien unserer Zeit. Sie zielt auf Anwendungen, in denen elektronische Bauteile auf der Basis leitender und halbleitender Kunststoffe gefertigt werden, und bietet Antworten für viele, zentrale Fragestellungen der heutigen Gesellschaft: OLAE sichert einen effektiven und verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen und Energie, ermöglicht mobile und flexible Produkte für eine vollständig vernetzte Welt und stellt kostengünstige Lösungen für die medizinische Versorgung einer alternden Gesellschaft zur Verfügung.

Die wirtschaftliche Bedeutung von OLAE ist immens. Langfristig wird ein globales Marktvolumen von mehreren hundert Milliarden Euro prognostiziert (IDTechEx, Printed, Organic & Flexible Electronics Forecasts, Players & Opportunities), womit die organische und großflächige Elektronik künftig einen wirtschaftlichen Stellenwert vergleichbar dem heutigen der konventionellen, siliziumbasierten Elektronik einnehmen wird. Deutschland startet im Wettkampf um diesen Multi-Milliarden Euro Markt aus einer weltweit führenden Position. Gelingt es, die herausragenden Forschungsergebnisse deutscher Unternehmen und Institute erfolgreich umzusetzen, kann die deutsche Industrie in allen entscheidenden Bereichen der Wertschöpfungskette eine Schlüsselrolle einnehmen und die zentralen OLAE-Märkte besetzen.

OLAE umfasst fünf wichtige Themenschwerpunkte, die alle auf derselben, innovativen Technologie beruhen:

- Beleuchtung
- Organische Photovoltaik
- Displays
- Elektronik
- Integrierte Intelligente Systeme

Auf dem Sprung in den Massenmarkt befinden sich zur Zeit vor allem Anwendungen in der Photonik, vertreten durch organische Leuchtdioden und die organische Photovoltaik. Hier verspricht die organische Elektronik völlig neue Möglichkeiten:

Organische Leuchtdioden (OLEDs)

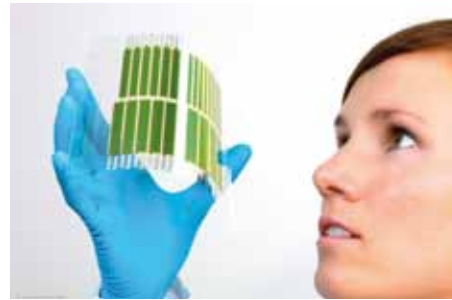
Die Lichterzeugung erfolgt hier analog zu klassischen LEDs. Da im Gegensatz zu bisherigen Halbleitermaterialien die Bandlücke in polymeren Halbleitern über einen großen Bereich frei einstellbar ist, können leicht OLEDs beliebiger Farben erzeugt werden. Durch Mischen oder Stapeln verschiedener Emitter lässt sich prinzipiell jede beliebige Farbtemperatur einstellen. Da OLEDs »flächig« emittieren und im abgeschalteten Zustand sogar transparent sein können, lassen sich viele neue Anwendungen realisieren. Besonders vielversprechend ist der Markt der Allgemeinbeleuchtung. Erste Studien der großen Lampenhersteller sind seit 2009 auf dem Markt.

Organische Photovoltaik (OPV)

Organische Solarzellen lassen sich vor allem als sogenannte »Dünnschichtsolarzellen« realisieren, in Analogie zu siliziumbasierten Solarzellen und auf Basis verschiedener Farbstoffe. Die erreichten Wirkungsgrade sind hier noch gering und liegen im Bereich von 5 bis 8 %. Der Vorteil liegt vor allem in der Möglichkeit, in der Zukunft kostengünstige Solarzellen auf flexiblen Substraten zu produzieren und die Zellen damit in verschiedene Produkte integrieren zu können. Denkbar sind z.B. transparente Solarzellen zur Integration in Fenster und Fassaden.

Hohes Innovationspotenzial besitzt die organische Elektronik auch hinsichtlich des angestrebten Produktionsverfahrens, der Drucktechnologie. Diese Herstellungsmethode ist einfach, kostengünstig und umweltschonend und ermöglicht somit eine ökologische und ökonomisch rentable Massenproduktion elektronischer Bauteile.

Auch auf weitere große Märkte wird OLAE einen wichtigen Einfluss haben, wie zum Beispiel die Bereiche Druck, Logistik und Verpackung, das Gesundheitswesen und



die Chemiebranche. Um die Anwendungsgebiete und Wirtschaftsbranchen der OLAE optimal adressieren zu können, müssen die Ressourcen von Wirtschaft und Wissenschaft auf der deutschen – und auch auf der europäischen – Ebene gebündelt und ausgerichtet werden. Dies erfordert eine gemeinsame Roadmap. Aus diesem Grund haben sich im Rahmen einer industriegeführten Initiative führende Unternehmen und Institute zur Erstellung der ersten deutschen OLAE-Agenda, die parallel zu einem vergleichbaren Prozess auf europäischer Ebene ausgearbeitet wurde, zusammengefunden.

Im Dezember 2009 legten die Partner der deutschen OLAE-Initiative dem Bundesministerium für Bildung und Forschung die **»Strategische Forschungsagenda für Organische und Großflächige Elektronik – Für Grüne Elektronik aus Deutschland«** vor. Im Rahmen des Strategieprozesses zur Photonik bringen die OLAE-Partner diese Agenda nun ein, um den Weg der strategischen Fokussierung, der durch die Übernahme der Federführung der Aktivitäten im BMBF durch ein Referat begonnen wurde, weiter voranzutreiben.

Die Strategische Forschungsagenda für Organische und Großflächige Elektronik wird in diesem Kontext als integraler Bestandteil der »Agenda Photonik 2020« verstanden. Im Folgenden werden daher lediglich die Grundpositionen und Handlungsempfehlungen zusammengefasst. Bezüglich der Aufgabenstellungen und Forschungsprioritäten zu den einzelnen Themenschwerpunkten wird auf das Originaldokument verwiesen (siehe z. B. optischetechnologien.de).

Welche Position auf dem Gebiet der OLAE kann und sollte Deutschland in den Jahren 2015 bis 2020 erreicht haben?

- Deutsche Unternehmen sind weltweit führend in wichtigen OLAE-Märkten mit Marktanteilen von über 50 %.
- Deutschland ist führend bei Forschung und Entwicklung (FuE) und Innovationen auf dem Gebiet der OLAE.

Foto links: Organische Leuchtdioden (OLEDs) © Novaled AG

Foto rechts: Flexible organische Solarzelle © heliatek GmbH

- Ein wesentlicher Teil der Wirtschaftsleistung entlang der Wertschöpfungskette wird in Deutschland erzeugt – angefangen bei Werkstoffen, Anlagen, Bauteilen und Produkten bis hin zu Medien und Inhalten.
- Gemeinsam mit seinen europäischen Partnern spielt Deutschland eine tragende Rolle bei der Standardisierung.

Der bisherige Erfolg der deutschen FuE-Anstrengungen ist vor allem das Resultat einer engen Partnerschaft zwischen Unternehmen, Forschungsinstituten und den öffentlichen Fördergebern. Das Potenzial von OLAE wurde im BMBF frühzeitig erkannt, und die OLAE-Technologie ist sowohl in der Hightech-Strategie als auch in unterschiedlichen Förderprogrammen des BMBF verankert. Um den bestehenden Wettbewerbsvorteil aufrecht zu halten und die Vision der deutschen Marktführerschaft im Bereich der OLAE zu realisieren, ist eine kontinuierliche Fortführung und Intensivierung dieses Engagements unverzichtbar. Existierende Förderschwerpunkte sollten fokussiert, ausgebaut und im Rahmen einer koordinierten und koordinierenden Forschungsstrategie zusammengezogen werden.

Was muss getan werden, um die Vision einer deutschen OLAE-Marktführerschaft zu verwirklichen?

- Etablieren einer starken und fokussierten nationalen Strategie für OLAE, die aktiv mit denjenigen Bundes- und EU-Programmen vernetzt wird, die mögliche Anwendungsgebiete für diese Technologie darstellen.
- Einführung spezifischer Maßnahmen, um die Lücke zwischen FuE und Produktentwicklung zu schließen, z. B. Pilotproduktionszentren

- Aufstockung des Finanzierungsvolumens proportional zur Größe der erwarteten Marktchancen und Schaffen neuer Zugangswege zu Venture Capital
- Maßnahmen zur frühzeitigen Etablierung von Standards für neue Produkte
- Einführung neuer Qualifizierungskonzepte, die der Interdisziplinarität der OLAE gerecht werden – von der Grundlagenforschung über das Ingenieurwesen bis zu Unternehmensgründungsaktivitäten

Handlungsempfehlungen:

Cluster-Ansatz mit Pilotproduktionszentren, um die Lücke zwischen FuE und marktfähigen Produkten zu schließen

Etablieren von Pilotproduktionszentren, in denen FuE-Institutionen und Firmen ihre Technologien testen können und frühzeitig Testmärkte finden. Dabei sollte die CMOS-Welt Vorbild sein. Dort konnten viele kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) nur deshalb die Fertigung spezieller, maßgeschneiderter Mikroelektronikprodukte aufnehmen, weil sie Pilotproduktionszentren nutzen konnten, die mit staatlicher Hilfe eingerichtet worden waren.

Etablieren anwendungsorientierter Transferprojekte, die mit geringem bürokratischem Aufwand dann genutzt werden können, wenn erfolgreiche FuE-Projekte erwarten lassen, dass eine Technologie für die Umsetzung in erste Produkte reif ist. Solche Transferprojekte sollten zu Demonstrationsobjekten in beschränkter Auflage führen. Die Realisierung dieser Demonstrationsobjekte sollte in vollem Maße förderfähig sein.

Es ist wichtig, nicht nur Technologien anzubieten, sondern einen ganzheitlichen Blick auf die Lage zu werfen: Investoren, Designer und Geschäftsleute müssen zusammengebracht werden. Dafür werden spezielle Fördermittel benötigt. Da viele Innovationen von KMUs stammen, ist es wichtig die Gründung neuer Firmen zu fördern. Es wird daher ein Instrument für die Seed- und

Frühphasenfinanzierung (drei bis fünf Jahre) für neugegründete Start-Ups vorgeschlagen.

Förderung der Entstehung einer deutschen OLAE-Industrie, beispielsweise durch neue Ansätze zur Schaffung von Leitmärkten

Bei vielen neuen Produkten ist es schwer, diese auf den Markt zu bringen und Erfahrung damit zu sammeln, wenn man keine »Einführungskunden« hat, die Risiken eingehen und anfängliche Nachteile wie auch höhere Kosten in Kauf nehmen. Staatliche Unterstützung für die Einführung neuer Produkte wäre dabei sehr hilfreich. Ein Hebel für diese Zwecke könnte bei den Beschaffungsvorgängen der öffentlichen Hand ansetzen. Beispielsweise könnte eine Behörde oder Regierung, die ein größeres Neubauvorhaben plant, als Anforderung aufnehmen, dass neue Technologien wie z.B. OLED-Beleuchtung mit geringem Energieverbrauch eingesetzt werden. Das hätte einen gesellschaftlichen Nutzen; zudem wären europäische Firmen dann aufgerufen, die entsprechenden Produkte anzubieten. Nach der Nutzung staatlicher Einstiegsmärkte könnten dann weitere Märkte erschlossen werden.

Ein weiterer Ansatz liegt darin, die Barrieren für eine frühe Akzeptanz der Produkte zu verringern und speziell Anwendungen zu fördern und zu unterstützen, welche »die ersten ihrer Art« sind. Anwendungsprojekte mit Pilotkunden und Anbieter neuer Technologie sollten durch die Übernahme eines Teils des Frühphasenrisikos unterstützt werden. Die Erfahrung damit und die erfolgreiche Anwendung der neuen Technologie könnte später dazu genutzt werden, den Massenmarkt selbständig anzusprechen. Zu guter Letzt ist es gleichermaßen wichtig, lähmende regulatorische Hürden für die Vermarktung von OLAE-Produkten aus dem Weg zu räumen, beispielsweise durch eine Erörterung der Richtlinie zu Batterien, Akkumulatoren und Entsorgung von Altbatterien 2006/66/EC, die gedruckte und ökologisch ausgelegte Energiequellen verhindert.

Begleitende Maßnahmen

Schnelle Implementierung der Roadmap-Ergebnisse in den Förderprogrammen und Bekanntmachungen. Die OLAE-Community hat Bedarf an Fördermaßnahmen, die eine ausgewogene Mischung aus großen (auf einen Zuwachs an geistigem Eigentum abzielenden) und kleineren und kürzer angelegten Projekten unterstützen.

Implementierung neuer Förderinstrumente, um enge Kontakte zwischen Hochschule und Industrie zu unterstützen. Die Maßnahme sollte vor allem dazu dienen, die bestehenden Exzellenzzentren in Dresden und Heidelberg weiter zu stärken und die Kooperationen der beiden Cluster weiter zu forcieren.

Es ist wichtig, dass nationale Vernetzungsaktivitäten in konstruktiver Verbindung mit ähnlichen Bestrebungen innerhalb der Europäischen Gemeinschaft und anderen relevanten Weltregionen stehen. Erste Schritte dazu werden von den größtenteils industriegetriebenen Verbänden, so von der Organic Electronics Association (OE-A) im Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau VDMA, unternommen. Dennoch ist es wichtig, dass solche Verbindungen auch für eher grundlagenorientierte FuE-Einrichtungen etabliert werden. Dies stellt sicher, dass die öffentlich finanzierte Grundlagen-FuE auf weltweit herausragendem Niveau erfolgt.

Ein Aspekt, der bei der Verzahnung nationaler und europäischer FuE-Förderfinanzierung beachtet werden sollte, ist die zeitliche Staffelung der Programme: Es wäre eine große Verbesserung, wenn Projektanträge jederzeit und zu beliebigen Fachthemen aus dem Gebiet der OLAE eingereicht werden könnten (bzw. auf wesentlich häufigere Bekanntmachungen hin). Das hohe Fortschritts-tempo in einem so neuen Gebiet wie dem der OLAE würde einen Abgleich erschweren, wenn die Bekanntmachungen seltener erfolgten und nur ausgewählte Teilbereiche des erzielten Fortschritts adressierten.

Maßnahmen zur frühzeitigen Standardisierung im Umfeld der neuen Produkte. Eine weitere große Hürde für die Herstellung von OLAE-Produkten ist der Mangel an Standards, was ein typisches Phänomen bei neu entstehenden Technologiefeldern ist. Es ist daher wichtig, dass Standardisierungsbemühungen alle wichtigen Beteiligten mit einbeziehen und von zentraler Stelle angestoßen und koordiniert werden.

Etablieren neuer Ausbildungsprogramme, die zu der interdisziplinären Natur des OLAE-Themengebiets passen. Das OLAE-Themenfeld ist das perfekte Beispiel für ein hochgradig interdisziplinäres Fachgebiet: Es hat Aspekte der Grundlagenforschung ebenso wie technologische und reicht von Chemie und Physik bis zur Ingenieurwissenschaft. Um qualifizierte Arbeitskräfte für dieses Gebiet auszubilden, müssen die Grenzen zwischen den Einzelthemen überwunden und neue Qualifizierungsprogramme aufgelegt werden, damit die breitangelegten Qualifikationen ausgebildet werden können, die benötigt werden, um erfolgreich auf diesem Gebiet zu arbeiten. Ein erster Schritt läge darin, die Entwicklung neuer Studiengänge an einzelnen Universitäten zu unterstützen. Ein wahrscheinlich noch besserer Ansatz wäre es jedoch, diese Maßnahmen der jeweiligen Hochschulpartner untereinander zu koordinieren. Forschungsinstitute und Industrie können in ein Angebot an praxisnahen Trainingsmodulen mit einbezogen werden.

Werden diese Handlungsempfehlungen in gemeinsamer Anstrengung von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zielgerichtet umgesetzt, so wird Deutschland in den Wachstumsmärkten der organischen Elektronik weltweit eine führende Position einnehmen können.

3.6

EMERGING TECHNOLOGIES – DAS FRÜHBEET DER PHOTONIK



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

Die Deutsche Position

In der Photonik ist Deutschland heute weltweit führend. Das muss auch künftig so bleiben – nicht nur morgen, sondern auch übermorgen. Es gilt daher, weit vorzuschauen, neue optische Wirkprinzipien zu erforschen und ihr Anwendungspotenzial zu erschließen.

Gerade jetzt zeigt die Photonik Ansätze einer disruptiven Technologieentwicklung: Quantentechnologien schaffen völlig neue Möglichkeiten in der Kommunikation, photonische Materialien werden maßgeschneidert, neuartige hoch integrierte Lösungen ersetzen Manufaktur und aufwändige Systemjustage. Diese Umbrüche bieten Chancen für deutsche Unternehmen. Um sie zu ergreifen, müssen wir die Exzellenz in der Forschung stärken, Netzwerke schaffen und die Industrie an die neuen Themen heranzuführen. Wirtschaft und Wissenschaft müssen gemeinsam den Blick nach vorn richten.

Neues entsteht nicht allein durch das Verbessern bestehender Technologien. Vielfach sind neue Konzepte außerhalb der bisherigen Paradigmen technischer Systeme und Fertigungsverfahren erforderlich. Neue, teils exotisch anmutende Anwendungen können entstehen, wenn unbekannte Wege beschritten und Grenzen überwunden werden. Kreative Lösungsansätze, innovatives Denken und mutige Projektideen sind hierfür notwendig.

Die Themen der Quantenoptik und der maßgeschneiderten photonischen Materialien umfassen zwei Gebiete, auf denen solch kreative und mutige Forschung vorangetrieben werden muss. Sie versprechen die Beherrschung des Lichts in all seinen Facetten und ermöglichen neue Anwendungen wie sichere Datenübertragung oder ultrapräzise Sensoren für die Umweltanalytik. Aber auch Visionen wie Quantencomputer, eine perfekte Linse, mit der sich die Abbesche Beugungsgrenze umgehen lässt, oder optische Tarnkappen, die einen Gegenstand unsichtbar machen, erscheinen langfristig möglich – erste Ansätze wurden bereits verwirklicht.

Im Folgenden werden Technologien wie Quantensensoren und Metamaterialien beschrieben, deren Anwendungspotenziale identifiziert und die für die Umsetzung notwendigen Forschungsarbeiten skizziert. In der Grundlagenforschung besitzt Deutschland hier eine herausragende Exzellenz. Diese müssen wir ausbauen und die Umsetzung der Ideen vorantreiben; denn die Ideen von heute sind die Trends von morgen und die Produkte von übermorgen. Es gilt, rechtzeitig zu sähen, um auch über die nächste Dekade hinaus noch zu ernten: Emerging Technologies – das Frühbeet der Photonik.

3.6.1

Quantenoptik

Die faszinierende Welt der Quantenoptik ermöglicht schon heute technische Verfahren, die im Bereich der sicheren Kommunikation nicht mehr wegzudenken sind.

Grundlegende Arbeiten zur Natur des Lichts und seiner Wechselwirkung mit Materie haben unser Verständnis tiefgreifend verändert und öffnen die Tür zu neuen, noch ambitionierteren Anwendungen. Im Folgenden werden zukünftig mögliche Applikationen und der Forschungsbedarf für die dafür notwendigen Technologien und Methoden beschrieben.

3.6.1.1

Einführung

Die Quantenphysik hat unser Verständnis der Materie und letzten Endes das Verständnis unserer Welt revolutioniert. Die reine Kenntnis der quantenphysikalischen Grundlagen ist aber nur ein Aspekt. Die gezielte und kontrollierte Nutzung der Quantenphysik, die Anstrengungen auf verschiedensten Ebenen erfordert, ist eine andere und neue Herausforderung an die Wissenschaft.

Seit gut einem Jahrzehnt ist klar, dass die Ergebnisse der Grundlagenforschung auf dem Gebiet gekoppelter Mehr-Teilchen-Quantensysteme den Weg zu einer optischen Quantentechnologie bereiten können – mit vielversprechenden Anwendungen in der Telekommunikation, Kryptographie sowie Präzisions-Mess- und Schaltungstechnik. Wenn es gelingt, die benötigten Quantenzustände in ausreichender Qualität in kommerzialisierbaren Aufbauten zu erzeugen, zu stabilisieren und zu manipulieren sowie störende Dekohärenzeffekte zu beherrschen, werden wir die Tür zu einer völlig neuartigen Technologie mit erheblichen Auswirkungen auf Forschung, Industrie und Wirtschaft aufstoßen. Die am Horizont aufscheinende Vision eines Quantencomputers markiert derzeit weltweit in der Informationstechnologie die größte Herausforderung auf diesem Gebiet, verbunden mit der Frage, ob und inwieweit exponentiell schnelle Quantenrechner technisch realisierbar sind.

Die Entwicklung eines Quantencomputers in einer Form, die eine direkte Nutzung in der Informatik erlaubt, sprengt jede mittelfristige Planung. Es gibt aber »Spin-offs« dieser Entwicklung, insbesondere in den Bereichen

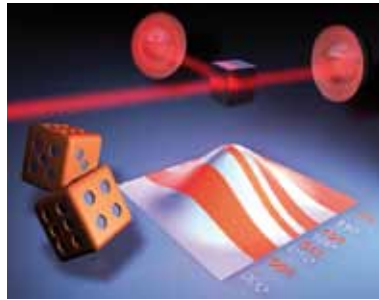
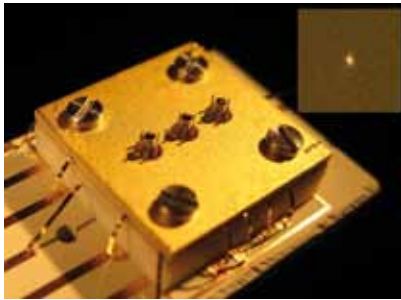


Foto links: Ionenfalle © Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

Foto Mitte: Ein Generator für echte Zufallszahlen nutzt die Zufälligkeit quantenmechanischer Prozesse © Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

Foto rechts: Erzeugung von Attosekundenpulsen in einem Gasjet © Thorsten Naeser/Max-Planck-Institut für Quantenoptik

optischer Datenübertragung und Sensorik, die schon mittelfristig realisierbar sind und in die zu investieren vielversprechend ist. Daneben sind in jüngster Zeit dank neuester Laserkühlmethoden für Atome dramatische Durchbrüche auch auf der »Materienseite« gelungen. Hierdurch könnten – ähnlich dem Erfolg des Lasers in der Optik – laserstrahlartige Materiewellen und atomare Ensembles hergestellt werden, die eine Basis für völlig neue atomare Quantensensoren bilden.

Insgesamt ermöglicht dieser Bereich, der sich mit dem englischen Begriff »Quantum Engineering« gut beschreiben lässt, die völlige Kontrolle von Licht und Materie auf Quantenniveau sowie die darauf basierende Entwicklung neuartiger, innovativer Quantentechnologien. Zudem würden solche Investitionen eine Technologie- und Industriebasis schaffen, die auch schon genutzt werden kann, bevor die längerfristige Realisierung eines Quantencomputers gelungen sein wird.

3.6.1.2

Anwendungspotenziale

Anwendungen der Quantenoptik werden zukünftig u. a. in den Bereichen der ultrasensitiven Sensorik und der Informationstechnologie liegen. Diese eröffnen mittel- bis langfristig große Marktchancen, wie nachfolgend beschrieben wird.

Ultrapräzise Sensorik

Quantensysteme reagieren sehr empfindlich auf kleinste Störungen. Dieser vielfach unerwünschte Effekt kann umgekehrt jedoch benutzt werden, um minimale Änderungen in der Umgebung des jeweiligen Quantensystems zu messen. Die so gewonnene Information lässt

Rückschlüsse auf die Umgebung zu, so dass Quantensysteme aufgrund ihrer extremen Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen zu idealen ultrapräzisen Sensoren werden.

Zukünftig wären für folgende Anwendungen neuartige Quantensensoren denkbar: **Sensoren auf der Basis verschränkter Zustände** mit Anwendungen im Bereich der Fernerkundung; **Atominterferometer**, z.B. zur ultrapräzisen Messung der Gravitation in der Geologie und zur Erschließung von Bodenschätzen; **optische Atomuhren** zur Satellitennavigation und ebenfalls zur Gravitationsmessung; **mikromechanische Systeme** am Quantenlimit zur Messung kleinster Kräfte; lokale **Quanten-Nanoprobe**n für biologische, chemische und physikalische Anwendungen. Die praktische Realisierung dieser Konzepte setzt aber bei quantenbasierten Sensoren eine detaillierte Kenntnis und sehr genaue Kontrolle des Quantentestsystems sowie ein tiefes Verständnis des qualitativen Zusammenhangs zwischen der äußeren Umgebung und den auftretenden Dekohärenzprozessen voraus.

Erste Demonstrationsexperimente auf dem Gebiet der Quantenmetrologie zeigen deutliche Vorteile verschränkungsbasierter Sensoren und Messtechniken gegenüber den klassischen Technologien. Verschränkte Zustände können so erzeugt werden, dass sie robust und immun gegenüber bestimmten Störquellen sind, aber gleichzeitig eine hohe Empfindlichkeit für die gewünschte Messgröße aufweisen. Diese Empfindlichkeit kann klassische Grenzen überschreiten und zu neuen Entwicklungen in Gebieten wie der hochpräzisen Spektroskopie, Positionsensorik, Uhrensynchronisation, Interferometrie, Zeitstandardisierung, Magnetometrie, Kraftsensorik, Kalibrierung von Detektoren, Ellipsometrie und vielen anderen führen. Anwendungen reichen von präziseren Messinstrumenten über medizinische Diagnostik hin zu Umweltuntersuchung und Exploration von Bodenschätzen.

Zu den zukünftigen Herausforderungen im Bereich optisch basierter Quantentechnologien zählen die Identifi-

zierung von Bauelementen und Komponenten und ihre Weiterentwicklung hinsichtlich Effizienzsteigerung und Verbesserung der Zuverlässigkeit. Letztlich bedarf es der Bereitstellung einer leistungsfähigen und hoch effizienten Messtechnik insbesondere auch für die metrologische Charakterisierung der Komponenten selbst. All dies fehlt derzeit noch. Vor einer erfolgreichen Implementierung und Markteinführung dieser neuen Technologien aber muss die Basistechnologie bereit stehen.

Quanteninformati onstechnologie

Die Quanteninformati onstechnologie benutzt Konzepte der Quantenphysik, wie z.B. Superposition und Verschränkung, um völlig neuartige Anwendungen zu erschließen. Die einzelnen, speziellen Quanteninformati onstechniken haben dabei ein sehr unterschiedliches Reifestadium erlangt, das von der Grundlagenforschung bis zur kommerziellen Anwendung reicht. Einige Anwendungsbereiche seien hier exemplarisch genannt.

Die **Quantenkommunikation** umfasst Methoden, mittels derer entweder herkömmliche Information effizienter und sicherer oder gleich die Quanteninformati on selbst übertragen werden kann. Hier hat sich besonders die Quantenschlüsselverteilung für die Kryptographie zur absolut sicheren Übertragung von Daten etabliert.

Optische Kommunikationssysteme, die auf Quantenschlüsselverteilung basieren, haben dabei den ersten Schritt hin zu kommerziellen Anwendungen bewältigt.

Die zukünftigen Entwicklungen zur weiteren Etablierung in alltagstauglichen Systemen müssen auf eine Erhöhung der möglichen Reichweite bei gleichzeitig steigenden Raten des Schlüsselaustauschs abzielen. Dies bedingt entscheidende Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der Detektoren, der Lichtquellen sowie der Quantenspeicher und der entsprechenden Schnittstellen im Hinblick auf Skalierbarkeit, Reichweite, Zuverlässigkeit und Robustheit. Für quantenkryptographische Systeme kann ein beachtliches Marktpotenzial erwartet werden. Weiterhin findet die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Quantennetzwerke (quantum

repeaters, high security quantum channels) zusehends Beachtung auch bei kommerziellen Anbietern von Telekommunikationsnetzwerken, wodurch eine mittelfristige Umsetzung am Markt zu erwarten ist.

Derzeit begrenzen Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von **Quanten-Zufallszahlengeneratoren** mit entsprechend hoher Erzeugungsrate die Rate der Quantenschlüsselerstellung. Diese Quellen für absolut zufällige Zahlenfolgen sind in der klassischen Kryptographie von ebenso großem Interesse, z. B. zur Erzeugung von PIN oder TAN Nummern sowie für die Verschlüsselung von Transaktionen. Zur Realisierung von Zufallszahlengeneratoren eignen sich optische Quantensysteme in ganz besonderem Maß, da der Messprozess in der Quantenphysik inhärent zufällig ist. Auch bei dieser Anwendung sind erste Systeme kommerziell erhältlich. Weitere Entwicklungen müssen auf eine erhöhte Erzeugungsrate von Zufallszahlen abzielen.

Die Verschränkung räumlicher Freiheitsgrade einer Lichtquelle eröffnet Anwendungen in der **Quantenbildgebung**, bei der Quanteneffekte ausgenutzt werden, um die Codierung, die Verarbeitung und das Auslesen von Information in einem optischen Feld zu verbessern. Auch hier kann die Empfindlichkeit von Messungen über das klassische Limit hinaus erhöht werden, z. B. kann die optische Auflösung verbessert und Bilder können »teleportiert« werden. Neuartige Anwendungen ergeben sich in Mikroskopie, Bilderkennung und optischer Datenspeicherung.

Langfristig kann die Entwicklung von **Quantenrechnern** und **Quantensimulatoren** auf der Basis von Atomwellen ebenfalls eine Reihe neuartiger Anwendungen erschließen. Quantensimulatoren eignen sich besonders für die Modellierung eines physikalischen Systems, dessen Berechnung auf einem herkömmlichen Computer so aufwändig wäre, dass diese praktisch unmöglich wird. Durch die Implementierung von Quantenalgorithmen in einem kontrollierbaren und manipulierbaren physikalischen Modellsystem können z. B.

Systeme der Festkörperphysik, chemische Verbindungen und Reaktionen effizient berechnet werden. Solche Simulationen könnten u. a. zur Entwicklung, zum Test und zur Produktion neuer pharmazeutischer Wirkstoffe und neuartiger Materialien eingesetzt werden. Quantenrechner mit ihrer massiven Parallelität könnten das Verständnis der Dynamik komplexer Systeme erleichtern, wie z. B. biophysikalischer Systeme.

3.6.1.3

Trends und Herausforderungen

Die oben skizzierten zukünftigen Anwendungen der Quantenoptik können nur durch gezielte Ausnutzung der physikalischen Eigenschaften von Licht- und Materiewellen sowie der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie realisiert werden.

Lichtwellen

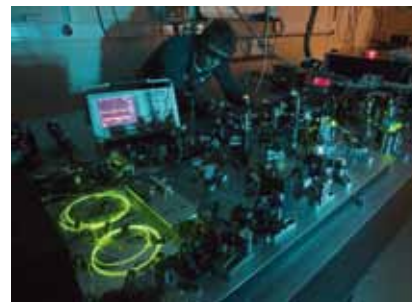
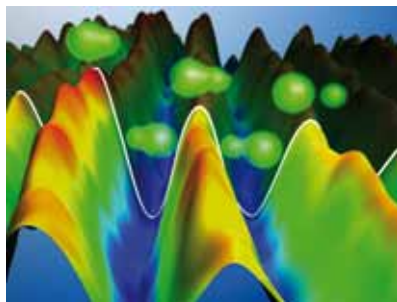
Die rasante Entwicklung der Lasertechnologien brachte in den letzten zwei Jahrzehnten enorme Fortschritte bei den Anwendungen der unterschiedlichsten Lasertypen. Zusammen mit der Entwicklung des Frequenzkamms steht hier ein großes Reservoir an Systemen zur Verfügung, wie sie in den unterschiedlichsten Bereichen der Quanten- und Atomoptik sowie der Quanteninformation eingesetzt werden. Ermöglicht wurde dieser Fortschritt durch verbesserte Produktionstechnologien der Halbleiterlaser und -verstärker und durch die Neuentwicklung und rasche Kommerzialisierung dotierter Fasern für Verstärker und faserbasierte Laser insbesondere im Bereich der Telekommunikationswellenlängen. Diese Entwicklungen ermöglichten bahnbrechende Experimente, wie die mittlerweile routinemäßige Erzeugung ultrakalter Atome im Bose-Einstein-Kondensat und zahlreichen anderen neuen Phasenzuständen, die Erzeugung verschränkter Zustände von Atomen und Ionen für die Quanteninformation und Metrologie, sowie den Bau höchstpräziser Atominterferometer. Schnellen Einzug in die experimentelle Forschung fanden auch integrierte Optik sowie Wellenleiter und strukturierte Fasern für einfache aber effiziente Komponenten der nichtlinearen

Optik. An neueren Technologien sind hier insbesondere zu nennen:

- Höchsteffiziente Frequenzkonversion und Erzeugung (verschränkter) Mehrphotonenzustände mittels periodisch gepolter Kristalle und Wellenleiter
- Strukturierte Fasern mit maßgeschneiderter Dispersionsabhängigkeit für die Erzeugung gequetschter Lichtzustände und Photonenpaare
- Erste integriert-optische Schaltungen für die Quantenkryptographie und Quanteninformation

Auf der Detektorseite lösen Halbleiterdetektoren vermehrt andere Verfahren auch im Bereich der Quantenoptik ab. So konnten extrem rauscharme und effiziente Systeme zur Vermessung des Lichtfeldes entwickelt werden. Einzelphotonendetektoren stehen derzeit in unterschiedlichen Varianten zur Verfügung, teils mit sehr hoher Effizienz, teils mit sehr guter Zeitauflösung und hohen Zählraten. Neuere Entwicklungen führen über Bauelemente, die einfacher in der Handhabung und Skalierbarkeit sind bis hin zur Bilderfassung mit Einzelphotonenempfindlichkeit, allerdings noch mit geringer Effizienz bei eingeschränktem Wellenlängenbereich. Die derzeitigen Entwicklungen bei supraleitenden Detektoren bieten vielversprechende Perspektiven für Anwendungen der Quantenoptik bei Telekom- und Infrarotwellenlängen.

Trotz all dieser sehr beachtlichen Neuerungen, gerade bei Halbleiterlasern und dotierten Fasersystemen, sind diese Strahlungsquellen in der Regel entweder auf das Nah-Infrarot beschränkt oder aber für viele Anwendungen noch zu leistungsschwach. Daher werden weiterhin erhebliche Anstrengungen erforderlich sein, um die Verfügbarkeit schmalbandiger und hinreichend leistungsstarker Systeme besonders im Ultraviolett-Bereich unterhalb von 400 nm zu verbessern. Dies kann durch gezielte Entwicklungen einerseits neuer Lasermedien und andererseits effizienterer nichtlinearer Kristalle erfolgen. Ähnliche Anforderungen ergeben sich auch im infraroten Bereich oberhalb von zwei Mikrometern, der



zum Beispiel bei Laser-Radar-Untersuchungen in der Atmosphäre von Bedeutung ist.

Gegenseitige Manipulation: Licht – Materie

Seit der Erfindung des Lasers verfügen wir über Möglichkeiten, atomare und molekulare Ensembles in ihren inneren Freiheitsgraden vollständig zu manipulieren, limitiert nur durch quantenmechanische Grenzen. Dies schließt die Erzeugung nicht-klassischer atomarer Zustände ein. Neben der Manipulation innerer Freiheitsgrade verfügen wir inzwischen aber auch über die volle quantenmechanische Kontrolle der äußeren Freiheitsgrade atomarer Ensembles, ebenfalls bis an die quantenmechanischen Grenzen. Damit gelingt es, die Temperatur der Ensembles bis in den piko-Kelvin-Bereich zu reduzieren, so dass der Wellencharakter der »Teilchenensembles« dominant wird. Dies gestattet die Erzeugung sogenannter Bose-Einstein-Kondensate, von kohärenten Materiewellen bis hin zu Materiewellen mit laseranalogen Eigenschaften.

In diesem Regime können Licht und Materie praktisch ihre Rollen vertauschen: Lichtwellen geeigneter Frequenz und Polarisation können Materiewellen teilen, ablenken oder auch zur Interferenz d. h. zur Überlagerung bringen. Damit lassen sich dann Atominterferometer realisieren, bei denen drei entsprechend präparierte Laserstrahlen die Materiewellen auf geschlossene Bahnen bringen. Man kann Atome auch in Lichtfeldern kohärenzerhaltend führen und so Wellenleiter für Atome oder geführte Atominterferometer bauen. Darüber hinaus lassen sich Atome in speziellen optischen Stehwellenkonfigurationen – »optischen Gittern« – kohärenzerhaltend führen und speichern. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit für eine komplette »optische Toolbox« für atomoptische Anwendungen, die weiter unten erläutert werden.

All diese Manipulationsmöglichkeiten zwischen Licht und Materie sind konzeptionell eng verwandt mit Konzepten und Methoden der Quanteninformation. Damit lassen sich auch quantenmechanische Verschränkungen zwischen Lichtfeldern, zwischen Lichtfeld und

Foto links: Ein Blick ins Innere von Molekülen

© Christian Hackenberger/Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Foto Mitte: Freistrahübertragung eines Quantenschlüssels für die Quantenkryptographie © Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

Foto rechts: Kompakter Er:Faserlaser zur Erzeugung ultrabreitbandiger Spektren und einzelner Lichtschwingungen im Telekom-Frequenzbereich © Centrum für Angewandte Photonik, Universität Konstanz

Materiewelle oder zwischen Materiewellen herstellen, vermittelt über das Licht oder über direkte atomare Wechselwirkungen, z.B. zwischen den Teilarmen eines Atominterferometers. Diese auf den ersten Blick esoterisch anmutenden Wechselwirkungen von Licht- und Materiewellenfeldern bilden das Herzstück innovativer atomarer Sensoren und Uhren unerreichter Empfindlichkeit, wie sie im Folgenden beschrieben werden.

Atomwellen

In den letzten Jahrzehnten hat sich das Forschungsfeld der Interferometrie mit kalten Atomen rasant zu einem der entscheidenden Schwerpunkte in der Atom- und Quantenphysik entwickelt. Nach den ersten Erfolgen von Laborexperimenten in der Grundlagenforschung wurde der Fokus in den letzten Jahren vor allem auf die Anwendungen atombasierter Interferometer gesetzt. Durch intensive Forschungsarbeit stehen wir gegenwärtig an der Schwelle, Interferometer der ersten Generation in vielen unterschiedlichen Applikationen und Anwendungsgebieten einzusetzen und die Messgenauigkeit solcher Systeme durch fortwährende Entwicklungen bis an die physikalischen Grenzen zu erweitern. Die kohärente Manipulation von de Broglie-Materiewellen wird in Atominterferometern ausgenutzt, um Inertialsensoren zu konzipieren, die in einer Vielzahl an Experimenten die zu Grunde liegenden externen Kräfte bestimmen können. Dazu zählen Gravimeter für die Messung der Erdbeschleunigung sowie Gyroskope für die allgemeine Detektion von Rotationen.

Atominterferometer können in naher Zukunft ihren Einsatz auch als hochpräzises Messgerät in den geophysikalischen Wissenschaften finden. Neben Einsätzen in

der Hydrologie kann durch die höchst präzise Vermessung der lokalen Erdbeschleunigung auf den Aufbau der erdnahen Schichten und damit auch auf das Vorkommen von Rohstoffen rückgeschlossen werden. Eine genaue Kenntnis der Verschiebung von Kontinentalplatten aus atominterferometrischen Messungen unterstützt die Wissenschaftler in ihren Theorien, genauso wie eine detaillierte Kenntnis von vulkanologischen Prozessen von Vorteil wäre. Dieser Einsatz in schwer zugänglichem Gelände oder beispielsweise auch auf einer Raumstation zur Satellitennavigation erfordert ein hochgradig zuverlässiges sowie stabiles und ultrakompaktes Design. Beschleunigungssensoren, Gravimeter und Gyroskope befinden sich gegenwärtig in einem fortgeschrittenen Optimierungsstadium hinsichtlich Verbesserungen ihrer Stabilität und der Untersuchung systematischer Fehler. Neuartige kohärente Quellen wie »Atomlaser« im Speziellen und degenerierte Quantengase im Allgemeinen erweitern die Möglichkeiten der Interferometertopologien und befinden sich im aktuellen Forschungsfokus, genauso wie die Entwicklung ultrastabiler und portabler Lasersysteme. Letztere sind vor allem entscheidend für die Durchführung von Experimenten im Weltraum, bei denen eine drastisch erhöhte Beobachtungszeit und die Entkopplung von der Umwelt erhöhte Präzision erwarten lassen.

3.6.1.4

Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Deutschland

Die Entwicklungen der letzten Jahrzehnte brachten große Fortschritte auf zahlreichen Gebieten, aber die zukünftigen Anwendungen der Quanten- und Atomoptik in der Metrologie und der Quanteninformation stellen noch große Herausforderungen dar, die besondere Anstrengungen bei gezielten Weiterentwicklungen erfordern. Der Bedarf geht hier vor allem in Richtung verbesserter Integration und Miniaturisierung der Systeme und macht eine Kombination der bisherigen Fortschritte notwendig, das heißt, er erfordert die Entwicklung von La-

sersystemen, die sowohl kompakt und zuverlässig arbeiten, als auch eine flexible Durchstimmbarkeit über einen großen Wellenlängenbereich ermöglichen, bei gleichzeitig hoher Frequenzstabilität. Die Weiterentwicklung der Frequenzkammmethoden ist in diesem Zusammenhang sehr wichtig, ebenso wie die Entwicklung von Systemen basierend auf integrierter Optik und mikrooptischen Komponenten.

Um schnellstmöglichen Fortschritt zu erzielen, sollten in allen Bereichen Funktionsbausteine in Form von »Werkzeugkisten« (engl.: Toolbox) mit bedarfsgerecht entwickelten Technologien bereitgestellt werden. Dies ermöglicht dann bei der eigentlichen Implementierung von Instrumenten die Fokussierung auf die bestmögliche Anpassung an die praktische Anwendung, ohne jeweils erheblichen materiellen und personellen Aufwand für die sonst teilweise redundante Bereitstellung der Subsysteme aufwenden zu müssen. Die gut koordinierte Entwicklung einer »Toolbox« sollte es darüber hinaus ermöglichen, einen sehr viel höheren Reifegrad der erhaltenen Technologien zu erzielen und somit auch den Schritt hin zur kommerziellen Umsetzung zu beschleunigen und die Anwendung in anspruchsvolleren Umgebungen zu ermöglichen, z. B. im Außeneinsatz, stationär oder auf mobilen Plattformen, in Luft- und Raumfahrt, bei der Schifffahrt sowie in Bohrlöchern und Bergwerken.

Das Ziel der Entwicklung von Quantentechnologien ist die Bereitstellung experimenteller Methoden, die es erlauben, Materie auf dem Niveau einzelner Quantenobjekte systematisch in geordneten Strukturen aufzubauen, um diese dann quantenkohärent zu präparieren, zu manipulieren und zu messen. Die theoretische Forschung unterstützt und treibt diese Entwicklung auf allen Niveaus. Die Herausforderungen reichen dabei von implementierungsorientierten bis hin zu mathematischen und numerischen Problemen, die mit Mitteln der theoretischen Physik, Informatik und Mathematik behandelt werden müssen. Um ihnen effizient zu begegnen, ist auch eine Theorie-Toolbox erforderlich.

Atomwellen-Toolbox

Die kontinuierliche Entwicklung der Atominterferometer von interessanten Demonstrationen der Quantenmechanik im Jahre 1991 hin zu praktisch anwendbaren Sensoren und Instrumenten ging stets Hand in Hand mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung der für die Implementierung notwendigen Technologien. Momentan allerdings ist in diesem Prozess ein Punkt erreicht, an dem viele an der Schwelle zur erfolgreichen Anwendung stehende Konzepte an der Umsetzung gehindert werden durch den Mangel an wirklich für diesen Einsatzzweck optimierten Komponenten und Subsystemen. Dies gilt insbesondere für die Entwicklung ultrakompakter und mobiler Sensoren. Die weitere Entwicklung des Gebiets würde von einer Toolbox daher sehr profitieren. Fortgeschrittene Optische Technologien bilden einen zentralen und umfangreichen Teil der Toolbox. Diese beinhaltet dabei einerseits umfangreiche Subsysteme, wie zum Beispiel Lasersysteme mit maßgeschneiderten Präzisionseigenschaften, die gleichzeitig kompakt und robust sind, andererseits aber auch einzelne Komponenten und Methoden, an die besonders hohe oder ungewöhnliche Ansprüche gestellt werden:

Um eine effiziente Manipulation von Atomen mit Laserlicht zu ermöglichen, müssen Laserstrahlen bezüglich Phasen- und Frequenzstabilität, Strahlprofil, Wellenfrontqualität, Intensität, Polarisation und gegebenenfalls Pulsdauer am Ort der Vakuumzelle im Kern der experimentellen Aufbauten extrem gut kontrollierbar sein. Von zentraler Bedeutung sind hierbei zunächst Lasersysteme, die Licht bei einer Vielzahl verschiedener Wellenlängen mit schmaler Linienbreite und hoher Intensität bei großem Durchstimbereich zuverlässig und gut kontrollierbar liefern können. Hier besteht großes Potenzial bei der Entwicklung integrierter oder hybrid-integrierter Systeme, welche eine Vielzahl verschiedener miniaturisierter Komponenten unterschiedlichster Funktionalität auf kleinstem Volumen zusammenbringen. Um bei diesen aber die größte Leistungsfähigkeit erreichen zu können, ist insbesondere auch die weitere

Entwicklung von auf Präzisionsanwendungen hin optimierten Halbleiterlasern, räumlichen Lichtmodulatoren, optischen Verstärkern oder Frequenzreferenzen bei verschiedenen Wellenlängen essentiell.

Für die Aufbereitung des Laserlichts werden generell eine Reihe weiterer Komponenten und Methoden benötigt, zum Beispiel für das schnelle Schalten der Laserstrahlen mit hohem Kontrast und gleichzeitiger präziser Kontrolle von Intensität und Polarisation. Insbesondere im Hinblick auf die notwendige Miniaturisierung besteht hier noch hoher Entwicklungsbedarf. Ultimativ wünschenswert wäre der Einsatz voll integrierter Optiksyste-me in Wellenleiter-Technologie (z. B. Quarzglas auf Silizium, GaAs und GaN) kombiniert mit mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS), wie sie heutzutage – wenn überhaupt – nur für wenige Laserwellenlängen im Telekombereich zur Verfügung stehen. Nicht zu unterschätzen ist auch die Notwendigkeit der Entwicklung geeigneter elektronischer Systeme hoher Kompaktheit für die notwendige, hochkomplexe Ansteuerung der optischen Komponente und letztendlich des gesamten Atominterferometers.

Neben den »Licht-optischen« Komponenten sollte die Toolbox auch solche Teile umfassen, die für die Erzeugung und die Handhabung von Materiewellen notwendig sind. Für die Implementierung der kompaktesten aller möglichen Varianten von atominterferometrischen Sensoren zählen dazu speziell »Atomchips« und alle für ihre Herstellung und ihren Einsatz notwendigen Technologien (z. B. miniaturisierte Vakuumzellen mit Optiken höchster Güte, vakuumtaugliche Bonding- und Klebetechniken, effiziente Abschirmung von Magnetfeldern und metallische Beschichtungen für den Einsatz höchster Ströme). Viele dieser Technologien sind zudem in gleicher oder leicht abgewandelter Form auch für den Bau anderer Varianten von Atominterferometern unabdingbar, so dass hier ein wichtiger Schwerpunkt zukünftiger Entwicklungsaktivitäten liegen sollte. Darüber hinaus gilt es, angepasste atomoptische Konzepte für solche extrem kompakten und robusten Atomchip-basierten

Atominterferometer zu entwerfen und zu evaluieren; hierzu zählen sowohl geeignete Quellen für Atomwellen, wie z.B. sogenannte Atomlaser, oder geeignete Feldkonfigurationen für geführte Atomwellen, oder auch Strategien zur Minimierung der technisch oder quantenmechanisch bedingten Rauschanteile.

Der Vorteil einer solchen Toolbox ist ihre Einsatzflexibilität für eine ganze Klasse innovativer hochempfindlicher Inertialsensoren, Schweremesser, Gradiometer oder auch Atomuhren und ähnlicher Geräte, die neben der Beantwortung fundamentaler Fragestellungen vor allem auch in der Präzisionsmetrologie ganz neue Applikationen ermöglichen.

Lichtwellen-Toolbox

Aus dem Gebiet der Quantenmetrologie kommen Ansätze für vielversprechende Anwendungen. Voraussetzung für ihre Umsetzung ist eine weitreichende Entwicklung neuer Materialien für die Sensorik und die Entwicklung verbesserter Quellen und Detektionssysteme. Hervorzuheben sind hier neue Sensoren basierend auf plasmonischer Verstärkung, auf kontrollierter Propagation in Metamaterialien und photonischen Kristallstrukturen, effizienten, integrierten Quellen nichtklassischen Lichts und über große Wellenlängenbereiche rauscharme Detektoren. Wie bei den Lasern ist auch hier eine Kombination von Integration und Zuverlässigkeit unabdingbar.

Die für die Quantenmetrologie entwickelten Systeme bilden auch einen wichtigen Ausgangspunkt für neue Komponenten zur effizienten Quantenkryptographie und Quanteninformation. Von größter Bedeutung ist hier die hochpräzise Präparation und Manipulation einzelner Photonen sowie deren effiziente Detektion mit hoher Photonenauflösung. Es ist unabdingbar, Einzelphotonen- und photonenzahlauflösende Detektoren für die zu benutzenden Wellenlängen in Hinblick auf Effizienz, Rate, Zeitauflösung und Signal-/Rauschverhältnis zu optimieren. Besonders wichtig sind hier die Telekomwellenlängen für langreichweitige Übertragungen und der nahe Infrarot-Bereich aufgrund wichtiger atomarer Übergänge.

Neben integrierten Quellen hochqualitativen nichtklassischen Lichts werden in Zukunft neuartige Komponenten benötigt, die die Wellenlängenkonversion, Modenkonzersion und Speicherung optischer Quantenzustände mit hoher Effizienz ermöglichen. Dies schließt auch die Übertragung von Quanteninformationen zwischen unterschiedlichen Informationsträgern ein, etwa Lichtzustände zur Übertragung und atomare Zustände zur Speicherung. Zur systematischen Entwicklung der Technologie wird es in Zukunft auch wichtig sein, kompaktere Ultrakurzpulslaser mit extremer Rauschfreiheit oder kostengünstige, maßgeschneiderte nichtlineare optische Kristalle zur Frequenzkonversion und Quantenzustandserzeugung zur Verfügung zu stellen.

Zusätzlich zu den technischen Komponenten ist ebenso eine Toolbox neuer Analysemethoden zu entwickeln, die die Evaluierung der Komponenten in Hinblick auf Effizienz, Präzision, Qualität der Verschränkung und des Quetschungsgrades ermöglichen. Als wesentlicher Unterschied zu klassischen Informationssystemen kommt hier die unabdingbare Notwendigkeit der Erhaltung der Quantennatur des Lichts hinzu. Hierzu ist die Entwicklung von Methoden zur Charakterisierung der Kohärenz erforderlich, sowie die Optimierung aller Komponenten bezüglich maximaler Kohärenzzeiten und minimaler Verluste. Im Falle der Quantenquellen z.B. ist eine vollständige Zustandsstomographie in Bezug auf die Rekonstruktion und die Bestimmung der Reinheit der Zustände notwendig. Dazu gehört auch die Charakterisierung von Einzelphotonendetektoren (Photon Avalanche Dioden) auf Einzelphotonenniveau und sogenannter photonenzahlauflösender Detektoren (supraleitende Transition Edge Sensoren). Mit all diesen Entwicklungen kann mittel- bis langfristig die Grundlage für »Quanten-Repeater« oder kleine optisch basierte Quantenrechner für Spezialanwendungen aufgebaut werden.

Theoretische Methoden-Toolbox

Die theoretische Forschung stellt Methoden zur Beschreibung der statischen und dynamischen Eigenschaften zusammengesetzter, in Wechselwirkung mit Umgebungen stehender Quantensysteme zur Verfügung und

erforscht die Prinzipien, die diesen Dynamiken zugrunde liegen. Sie untersucht auch die grundlegenden Eigenschaften der Quanteninformation und stellt dabei den Kontakt zwischen der Atom-, Quanten-, festkörperphysikalischen und sogar biophysikalischen Forschung auf der einen Seite und den abstrakten theoretischen Modellen der Quanteninformation auf der anderen Seite her. Entwickelt werden auch darauf aufbauende Methoden zu Kontrolle, Optimierung und Schutz quantenkohärenter und verschränkter Zustände, insbesondere auch zur Beschreibung und Bekämpfung von Dekohärenz. Damit werden die Voraussetzungen geschaffen, neuentwickelte Quantenalgorithmen und Anwendungen mit Hilfe von Quantentechnologien auszuführen.

Charakterisierung und Verifizierung: Es ist ein grundlegendes Problem, dass die Anzahl der Parameter, die zur Beschreibung eines Systems mit N Komponenten benötigt werden, exponentiell mit N anwächst. Dies begründet die hohe Leistungsfähigkeit von Quantensimulatoren oder Quantenrechnern, birgt aber auch die Herausforderung, Zustände und Dynamik von Quantensystemen und damit Quantentechnologien, die in der experimentellen Forschung konstruiert werden, effizient zu charakterisieren und zu verifizieren. Hier gibt es noch viel Forschungsbedarf. Neue Lösungsansätze sind gekennzeichnet durch eine Verbindung von Methoden aus verschiedenen Forschungsfeldern, die an die speziellen Bedürfnisse der Quantentechnologien angepasst werden müssen. Beispiele sind Methoden und Konzepte aus der Optimierungstheorie, der klassischen Signalverarbeitung sowie aus der Physik der stark korrelierten Systeme. Neue Ansätze müssen gefunden und entwickelt werden und erfordern interdisziplinäre Forschung, z. B. zwischen Physik, Mathematik, Informationstheorie und Signalverarbeitung.

Dynamik: Für die theoretische Unterstützung der experimentellen Forschung sind neuentwickelte effiziente Methoden zur Beschreibung der Dynamik multikomponentiger Quantensysteme von großer Bedeutung. Die Dynamik und unter Umständen auch das Auffinden

von Grund- und thermischen Zuständen in solchen Systemen ist komplex und ihre Simulation auf klassischen Computern im Prinzip durch exponentielles Wachstum der dafür notwendigen Ressourcen gekennzeichnet. Auf der Basis von Tensornetzwerkstrukturen entwickelte Methoden spielen hier eine zunehmende und vielversprechende Rolle. Ihre Weiterentwicklung ist nicht nur für Quanteninformationstechnologien von Bedeutung sondern auch für Anwendungen in Biophysik, Chemie, Quantenfeldtheorie oder Dekohärenztheorie.

Dekohärenz: Quantensysteme stehen unvermeidlich in Wechselwirkung mit ihrer Umgebung, was zum Verlust von Quantenkohärenz und Verschränkung führen kann. Dies stellt für Anwendungen wie Quantenkommunikation, Quantenmetrologie, Quantenalgorithmen und Quantensimulatoren ein grundsätzliches Problem dar und erfordert die weitere Entwicklung von Methoden zur Stabilisierung von Quantensystemen und zur Korrektur ihrer Quantenzustände. Dazu gehören beispielsweise Verschränkungsdistillation, Quantenfehlerkorrektur sowie passive Maßnahmen wie dekohärenzfreie Unter-räume, die im Kontext realer Implementierungen weiterentwickeln und zu optimieren sind.

Auch festkörperphysikalische Quantentechnologien, die für spätere Marktprodukte besonders vielversprechend sind, stehen oft in relativ starker Wechselwirkung mit einer strukturierten Umgebung, die zu räumlichen und zeitlichen Korrelationen führt. Diese Dynamik kann nicht akkurat durch Mastergleichungen beschrieben werden und erfordert die Entwicklung neuer, nicht-störungstheoretischer Methoden, die es erlauben, die Eigenschaften dieser Umgebungen effizient zu charakterisieren sowie die Zeitentwicklung von System und Umgebung zu beschreiben. Bekämpfung, Ausnutzung und Beschreibung von Dekohärenz ist weiterhin ein wichtiges Betätigungsfeld.

Anwendungen: Die Ausnutzung von Quantentechnologien erfordert die Entwicklung von Anwendungen, die Quanteneigenschaften, wie z.B. Verschränkung,

ausnutzen. Bei den Hauptanwendungsgebieten gibt es drei Kernbereiche: Metrologie, Simulation sowie Informationsverarbeitung und Kommunikation. Jeder dieser drei Teilbereiche erfordert seine eigenen physikalischen Systeme sowie quantenmechanischen Ressourcen und theoretischen Methoden. In der Metrologie z. B. werden verschränkte photonische oder atomare Zustände verwendet. Für reale Systeme ist aber die optimale Gestaltung dieser Quantenzustände noch immer nicht vollständig geklärt und zudem von den Kosten der eingesetzten physikalischen Ressource abhängig. Methoden der Optimierungstheorie müssen hier zur Anwendung gebracht werden, um die gewählten Zustände sowie deren Präparation und die Informationsextraktion im realen System zu optimieren. Im Bereich der Quantensimulation sind ultrakalte Atome in optischen Gittern von großer Bedeutung, wobei aber auch neu entwickelte Vorschläge photonischer Systeme in gekoppelten Ketten von optischen Kavitäten an Bedeutung gewinnen. In der Quanteninformationsverarbeitung herrscht noch immer ein Mangel an Algorithmen, die sowohl praktisch relevant sind als auch bereits mit einer moderaten Anzahl von Quantenbits durchgeführt werden können. In der Quantenkommunikation wird es wichtig, die abstrakten Sicherheitsbeweise für Quantenkryptographie auf realistische Situationen zu übertragen. Dies ist eine komplexe Aufgabe, die es aber erlauben wird, diese Geräte mit zertifizierten Sicherheitsprädikaten zu versehen und damit die kommerzielle Entwicklung zu unterstützen.

3.6.1.5

Handlungsempfehlungen

In den letzten Jahrzehnten wurden an den Universitäten und Forschungsinstituten in Deutschland maßgebliche Beiträge in der Grundlagenforschung zu den Themen optischer und atomoptischer Quantentechnologien geleistet, die international viel beachtet werden. Leider konnte jedoch aus Sicht von Wirtschaft und Industrie noch nicht das vollständige Potenzial dieser Arbeiten genutzt werden. Dies ist durch mehrere Faktoren bedingt.

Zum einen verlangt das Konzept der Quantentechnologien ein neuartiges Verständnis physikalischer Systeme und Gesetzmäßigkeiten, so dass in diesem Bereich besondere Anstrengungen für die Übertragung des »Know-Hows« von Wissenschaft zu Industrie notwendig sind. Des Weiteren sind generell die Anforderungen an die Umsetzung von Quantentechnologien vergleichsweise hoch, und verschiedene Spezifikationen sind tatsächlich nur mit modernsten Bauelementen erreichbar.

Eine systemstische Ausrichtung auf die Untersuchung und Manipulation von Quanteneigenschaften, das »Quantum Engineering«, ist hierbei bislang meist nur im universitären Umfeld vorangetrieben worden, wobei wissenschaftliche und eben nicht technische bzw. kommerzielle Interessen im Vordergrund standen. Ein kommerzieller Erfolg der Quantentechnologien in Deutschland wird letztendlich davon abhängen, inwieweit es gelingt, eine bessere Brücke zwischen Wissenschaft und Industrie zu etablieren, wobei die Entwicklung neuer »Quantenkomponenten« auch in Form versatiler »Tool-Boxen« wiederum neue Anwendungsfelder in der Industrie, z. B. auch in der Telekommunikation, erschließen wird.

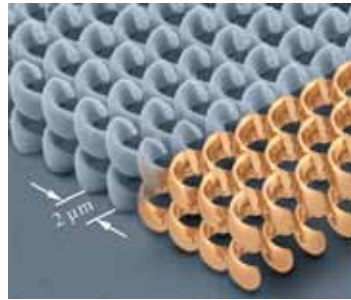
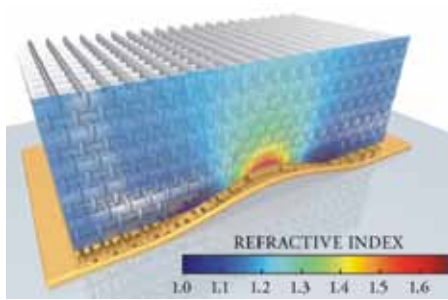
Erforderliche Maßnahmen sind daher:

- Fortbildungsprogramme für Wirtschaft und Industrie im Bereich der Quantentechnologien
- Förderinitiativen zur Erforschung und Entwicklung von Toolboxes in Theorie und Experiment

3.6.2

Maßgeschneiderte photonische Materialien

Photonische Mikro- und Nanomaterialien werden die Optik und Photonik revolutionieren: Sie ermöglichen es, die Licht-Materie-Wechselwirkung, und damit die Eigenschaften des Lichts, weitgehend unabhängig von den Ei-



genschaften natürlicher Materie einzustellen. Durch die Kontrolle und gezielte Manipulation des Lichts werden photonische Bauelemente greifbar, die verbesserte oder ganz neue Funktionalitäten und ein Höchstmaß an Integration und Miniaturisierung erlauben. Beispiele sind ultraschnelle Schalter für die Kommunikationstechnologien oder neuartige Abbildungsoptiken mit drastisch verbesserten Auflösungseigenschaften, die mit klassischen Methoden nicht erreichbar sind.

Im Folgenden wird diese Technologie näher beschrieben und es werden Herausforderungen und Handlungsfelder identifiziert.

3.6.2.1 Einführung

Die Megathemen Gesundheit, Information und Kommunikation, Grüne Energie, Sicherheit und Mess- und Fertigungstechnik stellen die Optik in den nächsten zehn Jahren vor neue Herausforderungen, für die sich maßgeschneiderte photonische Materialien als geeignete Lösungsansätze anbieten.

Bei diesen »Tailored Materials« handelt es sich um mikro- und nanostrukturierte optische Materialien, die aus Dielektrika, Metallen, Polymeren und aus Kombinationen von Materialien bestehen können. Allen maßgeschneiderten photonischen Materialien ist gemeinsam, dass sie auf einer Skala strukturiert sind, die im Bereich der Wellenlänge des Lichts oder darunter liegt. Photonische Kristalle wie auch Metamaterialien sind typische Vertreter solcher maßgeschneiderten Materialien.

Generell ist festzustellen, dass optische und photonische Materialien bisher zumeist dreidimensionale Volumenmaterialien waren. Dazu kamen zweidimensionale Wellenleiter, Dünnschichtsysteme, wie auch eindimensionale Strukturen wie optische Fasern. Typischerweise nutzte man bisher bei optischen Materialien den linearen Anteil des Brechungsindex aus. Nichtlineare Materialien wie zum Beispiel Kristalle für die Frequenzkonversion waren typischerweise dreidimensional oder als Schichtstruktur

*Foto links: Schema einer 3D optischen Tarnkappe
© Karlsruher Institut für Technologie*

*Foto Mitte: Photonische Metamaterialien aus Gold-Helizes können als breitbandiger und kompakter optischer Zirkularpolarisator dienen
© Karlsruher Institut für Technologie*

Foto rechts: Kommerzieller Quantenzufallsgenerator © qutools GmbH

(wie zum Beispiel periodisch gepoltes Lithiumniobat) aufgebaut.

Künftig hingegen wird der Trend zu Designermaterialien führen, bei denen der lineare Anteil des Brechungsindex wie auch dessen nichtlineare Anteile in allen drei Dimensionen variabel sind. Man spricht davon, dass man die Suszeptibilitätsfunktion des Materials in allen drei Dimensionen nach Wunsch modifiziert. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist das nichtlineare Material Lithiumniobat, das als photonischer Kristall nanostrukturiert wird. Ein weiteres Beispiel kann eine photonische Kristallfaser sein, in die nichtlineare Flüssigkeiten in einem Muster eingebracht werden.

Strukturiert man die neuartigen photonischen Materialien auf einer Skala weit unterhalb der Wellenlänge, so spricht man von Metamaterialien. Diese Materialien haben Eigenschaften, die jenseits derer liegen, die in der Natur vorzufinden sind. Solche Metamaterialien können zum Beispiel nanoskopische Metallstrukturen beinhalten, die ihnen magnetische Permeabilität im optischen Spektralbereich verleihen. Dies kann etwa zu einem negativen Brechungsindex für Licht führen, der in der Natur nicht vorkommt.

3.6.2.2 Anwendungspotenziale

Durch das Maßschneidern photonischer Materialien gewinnt man zusätzliche Flexibilität und Freiheitsgrade in bisher unbekanntem Maße. Indem sämtliche Raumrichtungen berücksichtigt werden, ist es möglich, sowohl die komplette dreidimensionale räumliche wie auch die zeitliche Dispersion (also das Auseinanderlaufen einer Lichtwelle) zu kontrollieren. Das kann zum Beispiel

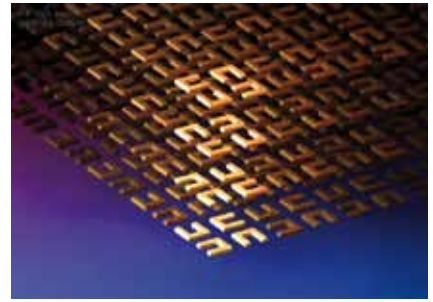
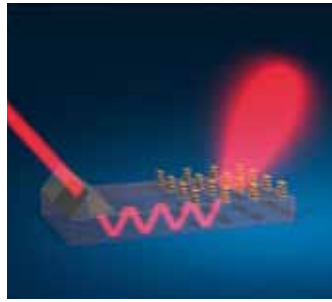
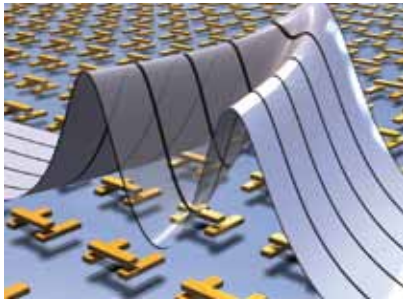


Foto links: Gold-Nanostrukturen als Grundlage neuartiger Sensoren, die auch kleinste Flüssigkeitsmengen oder gar einzelne Moleküle detektieren können © 4. Phys. Institut, Universität Stuttgart

Foto Mitte: Nanoantennen-Array mit Lichtleiter © 4. Phys. Institut, Universität Stuttgart

Foto rechts: Darstellung eines 3D-Metamaterials aus Split-Ring-Resonatoren © 4. Phys. Institut, Universität Stuttgart

dazu führen, dass man raumzeitliche Solitonen in einer photonischen Kristallfaser auf extrem kurzer Strecke erzeugen kann. Dies wäre dazu geeignet, neue, kompakte Buntlicht- oder Weißlichtlaser zu bauen.

Metalle sind bisher zum Großteil als Spiegel und Beschichtungen im Einsatz. In maßgeschneiderten photonischen Materialien können solche nanostrukturierten Metalle jedoch als plasmonische Elemente kurze Strecken im Mikrometerbereich mit extrem hoher Bandbreite überbrücken. Vor allem on-board Kommunikation auf Hochgeschwindigkeits-Chips könnte in Zukunft mit solchen Strukturen ausgeführt werden.

Plasmonische Nanostrukturen sind aber auch in den Bereichen Solarzellen, Lichtmanagement in Photodetektoren, Leuchtdioden, Halbleiterlaser und neuartige Nanosensoren in den Fokus gerückt. Hybridsysteme, bei denen Moleküle oder Halbleiter-Exzitonen an metallische Nanoantennen angekoppelt werden, sorgen für die Impedanzanpassung bei der Emission oder Detektion von Strahlung. Nanolaser auf plasmonischer Basis sind die kleinsten Laser der Welt und könnten u. a. dafür verwendet werden, in der Biologie lokal subzelluläre Strukturen für neuartige Mikroskopieverfahren zu beleuchten.

Gerade im Bereich Gas- und Flüssigkeitssensorik für Sicherheitstechnologie und für die Medizintechnik, im Healthcare-Bereich und in der Biologie sorgen neuartige plasmonische Strukturen für große Sprünge im Hinblick auf Sensitivität und Selektivität.

Maßgeschneiderte photonische Materialien können aber auch in der Mess- und Abbildungstechnik eingesetzt werden, da zum Beispiel Super- und Hyperlinsen aus Metamaterialien dünne Linsensysteme in Aussicht stellen, die auf ganz neue Art Aberrationen vermeiden und bekämpfen können. Zu den bisherigen Permittivitäten, die die Linsendesigner zur Verfügung hatten, kommen jetzt auch noch Permeabilitäten hinzu. Dies erweitert den Raum der Möglichkeiten gewaltig. Schafft man es auch noch, die bisherigen Verluste zu überwinden und geeignete Herstellungsverfahren zu finden, so sind sogar Tarnkappen im optischen Bereich für makroskopische Gegenstände denkbar.

Da das Thema »maßgeschneiderte photonische Materialien« sehr nah an der Grundlagenforschung liegt, aus der erste Anwendungen erwachsen, ist kein klassischer Markt wie z. B. die Märkte für Beleuchtung oder Analytik vorhanden. Es ist eher zu erwarten, dass Technologiesprünge und disruptive Techniken von diesem Feld ausgehen. Ein Beispiel sind Metamaterialien und die damit einhergehenden neuen Technologien, an die im Jahre 2000 noch fast niemand gedacht hat. Es war damals nicht absehbar, dass sich im Jahre 2010 faustgroße Objekte im Mikrowellenbereich mehr oder weniger perfekt tarnen lassen und im optischen Bereich bereits dreidimensionale Tarnkappen immerhin im Mikrometerbereich möglich sind. Die wesentliche Wertschöpfung in diesem Bereich findet momentan bei der kommerziellen Geräteentwicklung von Nanolithographiesystemen statt. Chirale Metamaterialien haben bereits eine Nische gefunden, nämlich breitbandige Wellenleiterplatten im Infraroten. Dort gibt es keine Alternative, und die Herausforderung besteht darin, solche Strukturen im Zentimetermaßstab herzustellen.

Ebensowenig war die rasante Entwicklung bei photonischen Kristallfasern vor zehn Jahren absehbar. Sie haben ganz neue Produkte wie zum Beispiel Weißlichtlaser mit kontinuierlichen Spektren und mit mehreren Watt Ausgangsleistung möglich gemacht.

Eher abschätzbar ist der große Bedarf im Bereich der Nanobeschichtungen, bei der nichtlinearen Optik und Frequenzkonversion, bei LED und Lasertechnologie, bei Photodetektoren und somit bei Nanoantennen, bei der on-Chip-Kommunikation, und vor allem auch bei der höchstempfindlichen Nanoanalytik und bei der kostengünstigen aber spezifischen Healthcare-Diagnostik. Dort unterstützen bereits jetzt nanophotonische und plasmonische maßgeschneiderte Materialien die Technik der Wahl.

Selbst bei der Krebstherapie könnten maßgeschneiderte plasmonische Materialien Anwendung finden. Ein Beispiel hierfür sind Metall-Nanoshells, die funktionalisiert werden und mit Hilfe externer Laserstrahlung in Tumorgewebe aufgeheizt werden können. Sie machen Gebrauch von der Einstellbarkeit der optischen Resonanzen vom sichtbaren bis zum infraroten Bereich, sowie von großen Effekten bei der molekularen Fluoreszenzerhöhung und der Oberflächen-erhöhten Ramanstreuung. Diese Methoden sind zum Teil bereits in der klinischen Erprobung und haben im Erfolgsfalle ein sehr großes Marktpotenzial.

3.6.2.3

Weltweite Aktivitäten und deutsche Position

Die Bereiche der maßgeschneiderten photonischen Materialien, die sich an der Schnittstelle zwischen Optischen Technologien und Nanowissenschaften befinden, zählen weltweit zu den am besten und kompetitivsten geförderten Programmen. In den USA werden zum Beispiel die Programme der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) im Bereich 3D-Metamaterialien, Plasmonik und Solarzellen mit photonischen Nanostrukturen, um nur wenige Beispiele zu nennen, mit mehreren hundert Millionen USD gefördert. Allein für die Erforschung der Metamaterialien hat die DARPA bislang über 70 Mio. USD bereitgestellt. China hat ebenfalls die Optik und die Nanotechnologie zu Schlüsseltechnologien erklärt, und in der Zeitschrift Applied

Physics Letters stellen die Chinesen bereits das Land mit den meisten Publikationen.

In England sind Programme im Bereich der Plasmonik, der Metamaterialien und der maßgeschneiderten photonischen Materialien aufgelegt worden, die mit zweistelligen Millionenbeträgen gefördert werden. Leuchttürme sind dabei in Southampton und am Imperial College in London zu finden. Auch EU-weit sind zahlreiche Programme im Bereich der maßgeschneiderten photonischen Nanomaterialien aufgelegt worden. Spanien (im Bereich der Plasmonik) und Holland (im Bereich der Metamaterialien, Plasmonik und photonischen Kristalle) sind hier stark vertreten.

Deutschland ist bei den maßgeschneiderten photonischen Materialien ebenfalls hervorragend positioniert; zahlreiche international viel beachtete Publikationen bezeugen die wissenschaftliche Exzellenz deutscher Forschergruppen in diesem Themenfeld. Stellvertretend für deutsche Programme seien das DFG-Forschungszentrum für Funktionale Nanostrukturen in Karlsruhe und die BMBF-Initiative »Novel Optics – Neuartige Wirkprinzipien« genannt, die jeweils mit zweistelligen Millionenbeträgen gefördert werden und der Forschung in Deutschland zusätzliche Dynamik verleihen.

Angeichts der starken internationalen Aktivitäten sollten jedoch die Anstrengungen künftig weiter verstärkt und gebündelt werden. Hierzu sollten besonders vielversprechende Ansätze konzertiert – auch im Zusammenspiel der Förderinstitutionen – in enger Kooperation aller beteiligten Forschungseinrichtungen verfolgt werden.

3.6.2.4

Herausforderungen

Die Herausforderungen bei maßgeschneiderten photonischen Materialien liegen im Bereich des Designs und der Herstellungsmethoden für neue Strukturen und neue Funktionalitäten, im Bereich der Verbesserung bestehender Designs, aber auch ganz wesentlich in der Übertragung der Ergebnisse aus dem Labor in einen re-

produzierbaren und später großtechnisch realisierbaren Herstellungsprozess. Es muss zudem geklärt werden, ob maßgeschneiderte photonische Materialien in puncto Lebensdauer, Robustheit, Standzeiten etc. mit herkömmlichen Materialien vergleichbar sind.

Schließlich ist zu erwarten, dass die Miniaturisierung nicht halt macht und bei wenigen zehn Nanometern, die momentan erreicht sind, enden wird. Top-down Strukturierungstechnologien werden durch Bottom-up Techniken wie DNA-Origamis und DNA-Gerüste komplementiert werden. Diese werden wiederum mit Hilfe chemischer und biologischer Methoden funktionalisiert werden, so dass Selbstorganisation zu dreidimensionalen Strukturen möglich wird. Auch diese neuen Wege müssen im Rahmen der Erforschung neuartiger maßgeschneiderter photonischer Materialien untersucht werden.

3.6.2.5

Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Deutschland

Dringender Forschungsbedarf ergibt sich zunächst im Bereich der Grundlagen, wo es gilt, neue, ganz unvorhergesehene Effekte zu finden, oder auch Lösungen für Probleme, die man momentan als extrem schwer oder gar als unlösbar betrachtet. Beispiele dafür sind die bereits erwähnten Tarnkappen oder auch das neue Feld der Transformations- oder Illusionsoptik ganz allgemein. Ganz neue Ansätze gibt es auch bei der Kombination von Hybridsystemen mit optischen Elementen. Nanoantennen, die direkt an Quantenpunkte angekoppelt sind, zählen hierzu.

Bisher unverstanden sind die Nichtlinearitäten im Bereich der Plasmonik und Metamaterialien, ebenso wie die Ankopplung von Quantenemittern an optische Antennen und die zugehörige Impedanzanpassung ans Fernfeld. Transformation vom Nah- ins Fernfeld und umgekehrt und vor allem die zugehörige Verlustbekämpfung bei Metamaterialien sind bisher ungeklärt. Ebenso ist zu klären, ob magnetische oder magnetooptische Materialien

zum Einsatz kommen können, entweder durch direkte Synthese oder Nanostrukturierung oder als Hybride mit photonischen Kristallen oder Metamaterialien.

Auch im Bereich der Herstellung müssen ganz neue Wege beschritten werden, um die Skalen um mindestens eine Größenordnung bis in den einstelligen Nanometerbereich weiter hinab zu treiben. Ein Ansatz sind Bottom-up Technologien wie DNA-Template oder Selbstorganisation, Kombinationen von Top-down und Bottom-up Techniken, aber auch neuartige Top-down Technologien wie die STED-Mehrphotonenlithographie (STED – Stimulated Emission Depletion).

Bei den Materialien ist die Frage, wie bestehende Materialien verbessert werden können, aber auch wie man ganz neue Metalle für den optischen Bereich entwickeln kann. Verspannte Metall-Multilagen, hoch dotiertes Indiumzinnoxid (ITO), oder Siliziumcarbid (SiC) für den Infrarot-Bereich sind einige Ansätze. »Schwarzes Silizium«, bei dem nadelförmige Oberflächenstrukturen, ähnlich dem Mottenaugeneffekt, eine erhöhte Absorption des einfallenden Lichts bewirken, ist ein weiteres maßgeschneidertes optisches Material für den Absorberbereich.

Des Weiteren müssen Mittel und Wege gefunden werden, wie bestehende Technologien, zum Beispiel photonische Kristallfasern, verbessert und weiterentwickelt werden können. Dazu zählen zum Beispiel die Verlustbekämpfung bei plasmonischen Strukturen und Metamaterialien, aber auch die Erhöhung der Breitbandigkeit und Widerstandsfähigkeit sowie die Verringerung von Verlusten in photonischen Kristallfasern bei hohen Durchschnittsleistungen. Ebenso gehören dazu lineare und nichtlineare Schaltelemente, wie z. B. photonische Kristall-Mikrokavitäten. Aber auch die Verbesserung bestehender Materialien mit neuartigen Technologien muss vorangetrieben werden, wie etwa das optische Reinigen von Lithiumniobat, als ein Beispiel für die evolutionäre Entwicklung maßgeschneiderter photonischer Materialien. Die Verbindung linearer und nichtlinearer Eigenschaften im Zusammenhang mit der dreidimensi-

onalen Strukturierung gehört ebenso in diesen Bereich. Dort sind die physikalischen Grundlagen bekannt, aber die Optimierung sowie die geeignete Herstellung sind wesentliche Herausforderungen.

Weiterhin müssen die Verfahren, die zur Herstellung maßgeschneiderter photonischer Materialien bisher im Labor benutzt werden, reproduzierbarer gemacht werden. Die Größe der nanoskopischen Proben muss vom Mikrometer-Maßstab in den Millimeter- und später sogar in den Zentimeter-Maßstab überführt werden. Stichworte wie großflächige mehrdimensionale Holographie, Nanoimprint-Lithographie, sowie Schattenmaskenevaporation sind hierbei zu nennen. Die großflächige Herstellung dreidimensionaler photonischer Kristalle und Metamaterialien ist eine weitere Herausforderung. Die Einbindung der Photonikfertigung in die Prozesse der Elektronikindustrie, zur Kopplung photonischer und elektronischer Eigenschaften für die Realisierung optoelektronischer Funktionen, ist ebenso anspruchsvoll. Hier sind Fragen der Anbindung von Nanoelementen an Mikro- und Makrosysteme zu beantworten. Eine Herausforderung ist auch die Verknüpfung lithographiebasierter mit chemisch-synthetischen Fertigungstechnologien.

Schließlich müssen die hergestellten Materialien auch im Hinblick auf ihre Reproduzierbarkeit, Dauerhaftigkeit, Robustheit und nicht zuletzt auch Toxizität hin untersucht und spezifiziert werden. Ein Beispiel hierfür sind plasmonische Nanostrukturen auf Solarzellen, die im Labor die Effizienz steigern können, jedoch im Dauereinsatz mindestens zehn Jahre auf einem Dach der Sonne und den Einflüssen des Wetters ausgesetzt sind.

Die umseitige Tabelle gibt einen Überblick über Lösungsansätze und Anwendungsperspektiven im Bereich der maßgeschneiderten photonischen Materialien.

3.6.2.6

Handlungsempfehlungen

Maßgeschneiderte photonische Materialien stellen ein junges und zugleich hoch kompetitives Forschungsfeld dar. Sie sind eine wichtige Basis für künftige, hoch integrierte photonische Bauelemente und können entscheidende Beiträge in zahlreichen Anwendungsbereichen Optischer Technologien liefern. Um die damit verbundenen Chancen in Deutschland zu erschließen, muss zum einen die Grundlagenforschung in diesem Bereich weiter ausgebaut werden. Zum anderen ist es wichtig, einen Austausch zwischen den Forschungseinrichtungen und der Industrie zu etablieren, sowohl um die Potenziale neuer photonischer Materialien aufzuzeigen, als auch um die Anforderungen der industriellen Praxis an Verfahren und Prozesstechnologien frühzeitig in die Forschungsarbeiten einfließen zu lassen.

Erforderliche Maßnahmen sind daher:

- Förderinitiativen zu grundlagenorientierten Themen wie z. B. photonischen Metamaterialien, die es den Forschungseinrichtungen in Deutschland ermöglichen, besonders vielversprechende Ansätze konzentriert zu untersuchen, um erste Anwendungen zu erschließen.
- Einrichtung geeigneter Plattformen für den Know-How Transfer von den Forschungseinrichtungen zu den Unternehmen, um Kooperationen z. B. im Hinblick auf industrietaugliche Fertigungsverfahren voranzutreiben.

	Gesundheit	Information und Kommunikation	Grüne Energie	Sicherheit	Optische Mess- und Fertigungstechnik
Photonische Kristalle	Biosensorik	Nichtklassische Lichtquellen Modulatoren Wellenleiter	Photon-Management in LEDs und Solarzellen	Gas-Sensorik	Kurzpuls-Optiken
Meta-materialien	Sensoren (z.B. Glucose) Dispersions-Management	Faraday-Isolatoren (Dünnschicht) Modulatoren Wellenleiter Nanoantennen Verbindungselemente Detektoren	AR-Beschichtungen Perfekte Absorber für Solarzellen	THz-Optik Sicherheitsmerkmale RFID	Dispersions-Management Perfekte Linse
Hybride	Integriert-optische Systeme Aufbau- und Verbindungstechnik Mini-Magnetometer EEG	Mini-Atomuhren; Lokales GPS Interchip-Plasmonik Kontrollierte Licht-Materie-Wechselwirkung Optische Antenne	Nanostrukturierte Solarzellen Nanoantennen	Gas-Flüssigkeits-Nanosensoren	Laser mit integrierter Funktionalität Nahfeldmikroskopie
Aktive photonische Materialien	Krebstherapie Fluidik Maßgeschneiderte UV-Quellen Pulslaser UV-MIR-THz	Plasmonische Nanolaser Switches		THz-Systeme	High-Power Anwendungen UV-HL-Laser Pulslaser Abbildung des WL-Spektrums

3.6.3

Zusammenfassung

Quantenoptik und maßgeschneiderte photonische Materialien – beides sind grundlegende Forschungsthemen mit vielversprechenden, teils visionär anmutenden Anwendungen. Die Beherrschung des Lichts in all seinen Facetten und die gezielte Ausnutzung extremer Materiezustände öffnen uns die Tür hin zu bislang fast undenkbar erscheinenden Produkten, z. B. in der Quantenkommunikation und der ultrapräzisen Sensorik.

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. 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 noch ambitionierteren Visionen wie dem Quantencomputer.

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. Neue kompakte Buntlicht- oder Weißlichtlaser, nanostrukturierte Metalle als plasmonische Elemente für die Analytik in den Lebenswissenschaften, für Solarzellen, LEDs oder Nanolaser sind denkbar. Superlinsen aus Metamaterialien und optische Tarnkappen für makroskopische Gegenstände sind weitere Anwendungsperspektiven maßgeschneiderter photonischer Materialien.

Für die Umsetzung der visionären 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. Um diese Ziele zu erreichen, müssen wir in der nächsten Dekade einen Satz grundlegender »Werkzeuge« erarbeiten, die flexibel für die unterschiedlichen Anwendungen einsetzbar sind.

Eine solche »Toolbox« für den Bereich der Lichtwellen sollte z. B. effiziente und integrierte Quellen nichtklassischen Lichts sowie Detektoren enthalten, die über weite Wellenlängenbereiche sehr rauscharm sind. Weiterhin benötigen wir neuartige, hocheffiziente Komponenten für die Wellenlängen- und Modenkonzersion sowie für die Speicherung optischer Quantenzustände. Dazu müssen wir die effiziente Übertragung von Quanteninformationen etwa vom Licht zur Übermittlung auf atomare Zustände entwickeln. Zudem benötigen wir Analysemethoden für die Evaluierung der Komponenten in Hinblick auf Effizienz, Präzision sowie Qualität der Verschränkung von Photonen. Die Erhaltung der Quantennatur des Lichts ist in der Quantenoptik eine unabdingbare Notwendigkeit. Dies erfordert Methoden zur effizienten Charakterisierung der Kohärenz.

Für den Bereich der Atomwellen brauchen wir eine »Toolbox« für die effiziente Manipulation von Atomen mit Laserlicht. 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, Polarisierung und Pulsdauer müssen wir extrem gut kontrollieren 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 wir neu entwickeln. Dazu gehören u. a. miniaturisierte Vakuumzellen mit Optiken höchster Güte, effiziente Abschirmungen von Magnetfeldern, so genannte Atomlaser sowie geeignete Feldkonfigurationen für geführte Atomwellen.

Die »Toolboxen« der Licht- und Atomwellen müssen wir ergänzen durch eine »Toolbox« für theoretische Methoden. Wir benötigen 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 unabdingbar. Ebenso sind wir aufgefordert, für die Praxis relevante Algorithmen für die Quanteninformationsverarbeitung zu erarbeiten. So müssen wir z. B. die abstrakten Sicherheitsbeweise für Quantenkryptographie auf realistische Situationen übertragen.

Geeignete Bauelemente und Komponenten zu identifizieren und ihre Effizienz und Zuverlässigkeit zu verbessern, sind unsere größten Herausforderungen in der Quantenoptik. Zudem bedarf es der Bereitstellung einer leistungsfähigen und hoch effizienten Messtechnik insbesondere auch für die metrologische Charakterisierung der Komponenten selbst. All dies fehlt derzeit noch. Vor einer erfolgreichen Implementierung und Markteinführung dieser neuen Technologien aber muss die Basistechnologie bereit stehen. Deshalb müssen wir die Zusammenstellung der »Toolboxen« vorantreiben.

Bei den maßgeschneiderten photonischen Materialien müssen wir zunächst die Grundlagen tiefer erforschen und neue Designs und Methoden der Herstellung für neue Funktionalitäten finden. Wir müssen grundlegende Fragen klären wie etwa die Nichtlinearitäten im Bereich der Plasmonik und der Metamaterialien und die Ankopplung von Quantenemittern an optische Antennen. Neue Wege im Bereich der Herstellung können die Skalen bis in den einstelligen Nanometerbereich hinab treiben. Hierzu zählen neuartige Bottom-up Techniken wie DNA-Template oder Selbstorganisation.

Die Weiterentwicklung verfügbarer und die Erforschung völlig neuer Materialien und Technologien sind ebenso große Herausforderungen. Hier seien beispielhaft hoch dotiertes Indiumzinnoxid (ITO), Siliziumcarbid (SiC), »Schwarzes Silizium«, photonische Kristallfasern und photonische Kristall-Mikrokavitäten genannt.

Wir müssen jetzt damit beginnen, die Laborverfahren auf reproduzierbare und industrietaugliche Fertigungsprozesse umzustellen und die Größe der Proben vom Mikrometer-Maßstab in den Millimeter- und Zentimeter-Maßstab zu überführen. Die damit einhergehende großflächige Herstellung dreidimensionaler photonischer Kristalle und Metamaterialien ist eine enorme Herausforderung, der wir uns stellen müssen. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Kopplung photonischer und elektronischer Eigenschaften für opto-elektronische Funktionen. Diese Einbindung der Photonikfertigung in die Elektronikindustrie verspricht neuartige, hoch effiziente Chipdesigns.

Die Umsetzung der visionären Möglichkeiten der Quantenoptik und der maßgeschneiderten photonischen Materialien stellt uns vor große Aufgaben in Forschung und Entwicklung. Die Weichen für den Erfolg können wir in der nächsten Dekade stellen. Hierzu sollten besonders vielversprechende Ansätze

konzertiert – auch im Zusammenspiel der Förderinstitutionen – in enger Kooperation der Forschungseinrichtungen verfolgt werden. Zudem müssen wir frühzeitig eine Brücke von der Wissenschaft zur Wirtschaft bauen.

Wesentliche Grundlagen müssen wir noch erarbeiten – bereits Erreichtes wollen wir perfektionieren und für die Anwendung fit machen. Gelingt uns dies, so eröffnen sich langfristig neue Marktchancen für deutsche Unternehmen in den unterschiedlichsten Bereichen von den Lebenswissenschaften bis zur Kommunikation.

4 ACHT DINGE, DIE WIR TUN MÜSSEN

Mit der vorliegenden Agenda vereinbart die deutsche Photonik-Community die Leitlinien der Forschung und Entwicklung für die nächsten zehn Jahre. Die Agenda zeigt auch, dass alle Handlungsfelder der Hightech-Strategie der Bundesregierung adressiert werden und dass Schlüsseltechnologien, wie die Photonik, das Erreichen der Ziele der Hightech-Strategie erst ermöglichen.

Die »Lösungen aus Licht« präsentieren die Chancen und die Herausforderungen und geben Handlungsempfehlungen entlang der Leitmärkte Produktion, Gesundheit, Kommunikation, Beleuchtung und Energie. Aus den Empfehlungen folgen zentrale Aufgaben für Wirtschaft und Verbände, Wissenschaft und Politik, die wir angehen müssen, um unsere Spitzenposition im globalen Innovationswettbewerb um die Photonik in der nächsten Dekade auszubauen. Es sind acht Dinge, die wir tun müssen:

In Forschung und Entwicklung investieren

Forschung und Entwicklung sind die Basis für den Erfolg der deutschen Photonik-Branche. Sie profitiert von Ihrer Innovationskraft und ihrer Bereitschaft, neue Technologien frühzeitig zu verfolgen und für den Markt zu erschließen. Der Paradigmenwechsel zum Halbleiterlicht, das junge Gebiet der organischen Elektronik, der Weg der Biophotonik in die Kliniken und die Plasmamedizin bieten gewaltige Chancen. Gleichzeitig erfordern sie unser entschlossenes Handeln im zunehmenden Wettbewerb. Deshalb sollte die deutsche Industrie künftig mindestens 10 % ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung investieren – und damit voraussichtlich knapp 30 Mrd. € in den nächsten zehn Jahren.

Wissenstransfer stärken

Die hohe Dynamik in den photonischen Technologien wird künftig einen noch schnelleren Transfer von den Forschungseinrichtungen in das industrielle Umfeld erfordern. Wir müssen interdisziplinäre Ansätze forcieren und neue Forschungsgebiete frühzeitig an die Anforderungen der industriellen Praxis heranzuführen. Besonders vielversprechend sind hier regionale Cluster und Campusmodelle, die Hochschulen und Forschungseinrichtungen mit den Unternehmen an einem Ort zusammenführen.

Verbundforschung vorantreiben

Forschung und Innovation bedingen hohe Investitionen und benötigen Förderung, um frühzeitig – weit im Vorfeld eines Marktes – neue Technologien zu erschließen. Die Projektförderung der Bundesregierung ist hier unverzichtbar. Sie ermöglicht ein konzertiertes Vorgehen der Partner aus Forschung und Industrie, stärkt Entwicklungsnetzwerke und ebnet den Weg hin zu neuen Leitmärkten. Dieser Weg muss fortgesetzt werden. Die Bundesregierung sollte ein Förderprogramm für die Photonik-Branche auflegen und hierfür in den nächsten zehn Jahren 1,5 Mrd. € an Fördermitteln bereitstellen.

Europäische Zusammenarbeit stärken

In einem Europa ohne Grenzen müssen wir Forschung und Entwicklung zunehmend auch gemeinschaftlich voranbringen. Nationale Anstrengungen zur Entwicklung neuer Leitmärkte, beispielsweise in der organischen Elektronik, müssen wir auf europäischer Ebene flankieren. Es gilt, den europäischen Strategieprozess in der Photonik weiter voranzutreiben – unter Berücksichtigung deutscher Positionen. Wir müssen die Photonik gegenüber der europäischen Kommission weiter stärken und das achte Rahmenprogramm für die Jahre 2014 bis 2020 mitgestalten.

Sichtbarkeit erhöhen

Die junge Photonik-Branche muss von Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft und von den Kapitalmärkten künftig noch stärker wahrgenommen werden. Dies erfordert ein abgestimmtes, verbandsübergreifendes Vorgehen der Community in Deutschland. Verbände und Forschungsorganisationen müssen geschlossen auftreten, eine »Corporate Identity« für die Photonik in Deutschland entwickeln.

Nachwuchs sichern

Innovation braucht Köpfe. Hoch qualifizierte junge Menschen sind ein Standortfaktor für die Photonik in Deutschland. Deshalb müssen wir die Photonik in die Breite der Gesellschaft hineinragen und den Nachwuchs für unsere Branche begeistern. Die Partner aus Forschung und Industrie müssen eine gezielte Recruiting-Strategie entwickeln. Wir müssen die Partnerschaften mit Schulen und Hochschulen sowie Forschungseinrichtungen intensivieren und neue Public-Private-Partnerships nach dem Vorbild der internationalen Masterstudiengänge ins Leben rufen.

Den Weg zum Markt ebnen

Um den Weg von der Forschung zum Markt zu ebnen, müssen wir geeignete Rahmenbedingungen schaffen. Hier ist ein vereinfachter Zugang zu Venture Capital in der Seedphase erforderlich, zum Beispiel durch einen Fonds im Rahmen einer Public-Private-Partnership. Zudem könnten von der Politik unterstützte Instrumente wie die umweltfreundliche Beschaffung oder Anreizprogramme den Markteintritt neuer Lichtlösungen deutlich beschleunigen und helfen, neue Leitmärkte zu erschließen.

Wachstum finanzieren

Die hohe Dynamik des Photonik-Marktes erfordert künftig umfangreiche Investitionen. Gleichzeitig ist die Eigenkapitalquote der zumeist mittelständischen Unternehmen in Deutschland traditionell gering. Daher ist der Zugang zu privatem Beteiligungskapital ein Schlüsselfaktor, um Innovation in Beschäftigung und Wirtschaftswachstum umzusetzen. Hier benötigen wir neue Finanzierungsinstrumente wie z.B. staatliche Kreditgarantien für Investitionsvorhaben forschungsintensiver Unternehmen.

ANHANG –

Teilnehmer des

Strategieprozesses Photonik 2020

Der Programmausschuss Optische Technologien bedankt sich bei allen Teilnehmern der Workshops am 23. März 2010 in Berlin sowie bei allen Mitstreitern, die in den vor- und nachbereitenden Arbeitstreffen dazu beigetragen haben, die »Agenda Photonik 2020« zusammenzustellen.

Workshop I – Produktion und Maschinenbau

Leitung: Peter Leibinger, TRUMPF GmbH + Co. KG

Verantwortliche für die Arbeitsgruppen:

- Lutz Aschke, LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH
- Heinrich Flegel, Daimler AG
- Tilmann Heil, Carl Zeiss SMT AG
- Reinhart Poprawe, Fraunhofer ILT
- Andreas Tünnermann, Fraunhofer IOF

Workshop II – Life Science und Gesundheit

Leitung: Markus Weber, Carl Zeiss AG

Verantwortliche für die Arbeitsgruppen:

- Carsten Philipp, Elisabeth Klinik Berlin
- Jürgen Popp, Institut für Photonische Technologien
- Markus Weber, Carl Zeiss AG

Workshop III – Kommunikation und Information

Leitung: Christoph Glingener, ADVA AG Optical Networking

Verantwortliche für die Arbeitsgruppen:

- Markus Ehbrecht, LINOS Photonics GmbH & Co. KG
- Jörg-Peter Elbers, ADVA AG Optical Networking
- Hans-Joachim Grallert, Fraunhofer HHI

Workshop IV – Beleuchtung und Energie

Leitung: Klaus Streubel, OSRAM GmbH

Verantwortliche für die Arbeitsgruppen:

- Andreas Bett, Fraunhofer ISE
- Berit Wessler, OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Workshop V – Emerging Technologies

Leitung: Wolfgang Sandner,

Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik

Verantwortliche für die Arbeitsgruppen:

- Harald Giessen, Universität Stuttgart
- Gerd Leuchs, Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts
- Wolfgang Sandner, Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik

Teilnehmer der Workshops am 23. März in Berlin:

Lothar Ackermann, FEE GmbH

Jörg Amelung, Ledon OLED Lighting GmbH & Co. KG

Gudrun Andrä, Institut für Photonische Technologien

Richard Auer, Bayerisches Zentrum für Angewandte
Energieforschung

Friedrich Bachmann, ROFIN-SINAR Laser GmbH

Gerhard Backhaus, HOCHTIEF Energy Management
GmbH

Hartmut Bartelt, Institut für Photonische Technologien

Christoph Becher, Universität des Saarlandes

Erik Beckert, Fraunhofer IOF

Klaus-Friedrich Beckstette, Carl Zeiss AG

Henner Befort-Riedl, Befort Wetzlar OHG

Andreas Bentler, Mahr GmbH

Jean Pierre Bergmann, Jenoptik Automatisierungs-
technik GmbH

Stephan Berlitz, Audi AG

Helmut Bernitzki, JENOPTIK Laser, Optik,
Systeme GmbH

Dietrich Bertram, Philips Technologie GmbH

Stefan Beyer, Berliner Glas KGaA Herbert Kubatz
GmbH & Co.

Hans-Martin Bitzer, Fresnel Optics GmbH

Benedikt Bläsi, Fraunhofer ISE

Winfried Blau, Europäische Forschungsgesellschaft
Dünne Schichten

Jan Blochwitz-Nimoth, NovaLED GmbH

Frank Blöhma, Sick AG

Kirsten Bobzin, RWTH Aachen

Raik Böckelmann, Revotar Biotech GmbH

Christine Boeffel, Fraunhofer IAP

Guido Bonati, Jenoptik Laserdiode GmbH

Bernd Bonnekoh, Universität Magdeburg,
Klinik für Dermatologie

Carola Brand, Kompetenznetz INPLAS e.V.

Thomas Brand, DILAS Diodenlaser GmbH

Günter Bräuer, Fraunhofer IST

Andreas Bräuer, Fraunhofer IOF

Claus Braxmaier, Fachhochschule Konstanz

Bernd Brenner, Fraunhofer IWS

Jochen Brill, BASF SE

Stefan Buziol, Roche Diagnostics GmbH

Boris Chichkov, Laser Zentrum Hannover

Matthias Dämmig, ZETT Optics GmbH

Norbert Danz, Fraunhofer IOF

Rüdiger Daub, TU München

Manfred Dick, Carl-Zeiss Meditec

Ramona Eberhardt, Fraunhofer IOF

Jörg Ehlbeck, INP Greifswald

André Ehrhardt, Karl Storz GmbH

Klaus Eimann, Braun GmbH

Thomas Engel, Carl Zeiss IMT GmbH

Götz Erbert, Ferdinand-Braun-Institut für
Höchstfrequenztechnik

Rainer Erdmann, PicoQuant GmbH

Uwe Ernst, Heidelberger Druckmaschinen AG

Wolfgang Ertmer, Universität Hannover	Volker Hagemann, SCHOTT AG
Fritz Falk, Institut für Photonische Technologien	Henning Hanebuth, Siemens AG
Thomas Fehn, JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH	Jens Hänel, 3D-Micromac AG
Torsten Feigl, Fraunhofer IOF	Volker Härle, OSRAM Opto Semiconductors GmbH
Peter Feulner, RICARDO Deutschland GmbH	Michael Härtl, Siteco Beleuchtungstechnik GmbH
Frank Fischer, Beiersdorf AG	Johann Härtl, KUKA Systems GmbH
Ulrich Fotheringham, SCHOTT AG	Christoph Heimerdinger, Premium Aerotec GmbH
Matthias Frentzen, Universitätsklinikum Bonn	Alexander Heisterkamp, Laser Zentrum Hannover
Andreas Frey, Forschungszentrum Borstel	Patric Henzi, Polytec GmbH
Kevin Füchsel, Fraunhofer IOF	Andreas Hermerschmidt, Holoeye Photonics AG
Adolf Giesen, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	Jochen Herms, Klinikum der Universität München
Arnold Gillner, Fraunhofer ILT	Andreas Hertwig, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Martin Gluch, Carl Zeiss Microlmaging GmbH	Günter Heß, LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH
Dietmar Gnass, Leica Microsystems CMS GmbH	Michael Heuken, AIXTRON AG
Andreas Gombert, Concentrix Solar GmbH	Raimund Hibst, Universität Ulm
Erich Gottwald, Nokia Siemens Networks GmbH	Hans-Dieter Hoffmann, Fraunhofer ILT
Thomas Graf, Universität Stuttgart	Sven Höfling, Universität Würzburg
Matthias Graudenz, AUDI AG	Achim Hofmann, Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG
Herbert Gross, Carl Zeiss AG	Michel Honlet, Carl Zeiss Optonics GmbH
Gernoth Grunst, Fraunhofer FIT	Ruth Houbertz, Fraunhofer ISC
Wolfgang Grupp, JDSU Deutschland GmbH	Günter Huber, Universität Hamburg
Volker Gühne, JENOPTIK Polymer Systems GmbH	Karl-Heinz Hübers, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Rolf Günther, ALTONABIOTEC AG	Gerd Illing, Laser- und Medizin-Technologie GmbH
Frank Guse, LINOS Photonics GmbH & Co. KG	Klemens Janiak, Fraunhofer HHI
Peter Haas, High Performance Computing Center Stuttgart (HLRS)	Sven Joosten, TRUMPF Laser Marking Systems AG
Harro Hagedorn, LEYBOLD OPTICS GmbH	Martin Kaatz, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Klinik für Dermatologie

Norbert Kaiser, Fraunhofer IOF	Johannes L'huillier, Photonik Zentrum Kaiserslautern
Ulrich Kallmann, Robert Bosch GmbH	Frank Lison, Till Photonics GmbH
Norbert Keil, Fraunhofer HHI	Klaus Löffler, TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
Michael Kempe, Carl Zeiss AG	Peter Loosen, RWTH Aachen
Rudolf Kessler, Hochschule Reutlingen	Wilfried Lövenich, H.C. Starck Clevios GmbH
Reinhard Kienberger, Max-Planck-Institut für Quantenoptik	Holger Lubatschowski, Rowiak GmbH
Sven R. Kiontke, asphericon GmbH	Stephan Lutgen, OSRAM Opto Semiconductors GmbH
Bernd Kleemann, Carl Zeiss AG	Bert Männig, heliatek GmbH
Ernst-Bernhard Kley, Friedrich-Schiller-Universität Jena	Karl Manz, Universität Karlsruhe (TH)
Rainer Kling, Laser Zentrum Hannover	Thomas Mayerhöfer, Institut für Photonische Technologien
Jens Kobelke, Institut für Photonische Technologien	Robert Möller, Institut für Photonische Technologien
Johannes Koeth, Nanoplus GmbH	Holger Mönch, Philips Technologie GmbH
Bernd Köhler, DILAS Diodenlaser GmbH	Christian Moormann, AMO GmbH
Thorsten Köhler, Continental Automotive GmbH	Uwe Morgner, Laser Zentrum Hannover
Mathias Kraas, OLYMPUS Winter & Ibe GmbH	Christoph Müller-Rees, Wacker Chemie AG
Volker Krause, Laserline GmbH	Achim Nebel, LUMERA LASER GmbH
Rainer Küchler, Heraeus Noblelight GmbH	André Noack, Befort Wetzlar OHG
Stefan Kück, Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Steffen Noehte, tesa scribos GmbH
Harald Küster, ALANOD GmbH & Co. KG	Heinrich Noll, Continental AG
Claudio Laloni, Siemens AG	Stefan Nolte, Friedrich-Schiller-Universität Jena
Bernd Lange, LPKF Laser & Electronics AG	Gunther Notni, Fraunhofer IOF
Klaus-Dieter Langer, Fraunhofer HHI	Bernd Oehme, SIRONA Dental Systems GmbH
Markus Lankers, rap.ID Particle Systems GmbH	Christian Oehr, Fraunhofer IGB
Hans Lauth, Fresnel Optics GmbH	Hermann Oppermann, Fraunhofer IZM
Falk Lederer, Friedrich-Schiller-Universität Jena	Wolfgang Osten, Universität Stuttgart
Andreas Lenk, Continental Automotive GmbH	Klaus Palme, Universität Freiburg
Martin Leonhard, Karl Storz GmbH	Anton Pawlakowitsch, Singulus Technologies AG

Thomas Pertsch, Friedrich-Schiller-Universität Jena	Clemens Scholz, W.O.M. WORLD OF MEDICINE AG
Klaus Petermann, TU Berlin	Karl-Heinz Schönborn, W.O.M. WORLD OF MEDICINE AG
Achim Peters, Humboldt-Universität Berlin	Walter Schott, SIOS Messtechnik GmbH
Tilman Pfau, Universität Stuttgart	Sigurd Schrader, Technische Fachhochschule Wildau
Michael Pfeffer, DGaO e.V.	Peter Schreiber, Fraunhofer IOF
Thomas Pfeiffer, Alcatel-Lucent Deutschland GmbH	Sven Schröder, Fraunhofer IOF
Martin Plenio, Universität Ulm	Henning Schröder, Fraunhofer HHI
Manfred Rahe, Sartorius Mechatronics GmbH	Manfred Schubach, POG Präzisionsoptik Gera GmbH
Rene Raudies, ELCON Systemtechnik GmbH	Peter Schubert, r-biopharm AG
Thomas Riedl, Bergische Universität Wuppertal	Rainer Schuhmann, Berliner Glas KGaA Herbert Kubatz GmbH & Co.
Detlev Ristau, Laser Zentrum Hannover	Klaus Schulz, VERTILAS GmbH
Siegfried Röhl, Infineon Technologies AG	Matthias Schulze, Coherent GmbH
Markus Röhner, Carl Baasel Lasertechnik GmbH & Co. KG	Jörg Schulze, Universität Stuttgart
Jürgen Röpcke, INP Greifswald	Stefan Schweizer, Fraunhofer IWM
Holger Rücker, IHP GmbH	Ingo Schwirtlich, SCHOTT Solar AG
Horst Rudolph, Trilux GmbH & Co. KG	Stefan Seidlein, JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH
Jens-Peter Ruske, JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH	Georg Sommerer, InnoLight GmbH
Peter Schäffer, Carl Zeiss MicroImaging GmbH	Heinrich Spieker, LaVision Biotec GmbH
Uwe Schallenberg, mso jena Mikroschichtoptik GmbH	Ronald Sroka, Ludwig-Maximilians-Universität München
Christoph Schierz, TU Ilmenau	Ulrich Steegmüller, OSRAM Opto Semiconductors GmbH
Stefan Schlörholz, ficonTEC Service GmbH	Ernst Stelzer, Universität Heidelberg
Dieter Schmid, Centrotherm Photovoltaics AG	Markus Sticker, Carl Zeiss MicroImaging GmbH
Michael Schmidt, Bayerisches Laserzentrum GmbH	Uwe Strauss, OSRAM Opto Semiconductors GmbH
Herbert Schneckenburger, Hochschule Aalen	Gerhard Strobl, AZUR SPACE Solar Power GmbH
Stefan Schneider, Universitätsklinikum Mannheim	Johannes Strümpfel, VON ARDENNE Anlagentechnik GmbH
Gerd Schneider, Helmholtz-Zentrum Berlin	

Thomas Thöniß, LINOS Photonics GmbH & Co. KG	Sven Warnck, m-u-t AG
Günther Tränkle, Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik	Joachim Wecker, Siemens AG
Marc Tremont, Carl Zeiss AG	Martin Wegener, Karlsruher Institut für Technologie
Clemens Tropp, Tropp Lighting Design GmbH	Klaus-Dieter Weltmann, INP Greifswald
Michael Trutzel, Carl Zeiss AG	Christian Wenzel, Fraunhofer IPT
Rainer Uhl, TILL Photonics GmbH	Markus Weyers, Ferdinand-Braun-Institut für Höchst- frequenztechnik
Dirk Uhrlandt, INP Greifswald	Stefan Wiechmann, Jenoptik AG
Gerhard Ulm, Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Bertram Wiedenmann, Charité
Günter Unterbörsch, u2t Photonics AG	Daniel Wildmann, Precitec KG
Ed van den Kienboom, Plastic Electronics Foundation	Frank Wippermann, Fraunhofer IOF
Wolfgang Viöl, Laser-Laboratorium Göttingen e.V.	Thomas Witolla, Meyer Werft GmbH
Klaus Vogler, Wavelight AG	Uli Würfel, Fraunhofer ISE
Raimund Volk, Hommel-Etamic GmbH	Christian Ziener, JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH
Reinhard Völkel, SUSS MicroOptics SA	Hagen Zimer, JT Optical Engine GmbH + Co KG
Gert von Bally, Universitätsklinikum Münster	
Christoph von Kopylow, BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik	
Thomas von Woedtke, INP Greifswald	
Marc Vrakking, Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik	
Andreas Waag, TU Braunschweig	
Christoph Wächter, Fraunhofer IOF	
Elmar Wagner, Fraunhofer IPM	
Joachim Wagner, Fraunhofer IPM	
Jürgen Waldorf, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik	
Godehard Walf, Fraunhofer HHI	
Klaus Wallmeroth, TRUMPF Laser GmbH + Co. KG	
Thomas Walther, TU Darmstadt	

3D-Micromac AG • ADVA AG Optical Networking • AIXTRON AG • ALANOD GmbH & Co. KG • Alcatel-Lucent Deutschland GmbH • ALTONABIOTEC AG • AMO GmbH • asphericon GmbH • AUDI AG • AZUR SPACE Solar Power GmbH • BASF SE • Bayerisches Laserzentrum GmbH • Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung • Befort Wetzlar OHG • Beiersdorf AG • Bergische Universität Wuppertal • Berliner Glas KGaA Herbert Kubatz GmbH & Co. • BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik • Braun GmbH • Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) • Carl Baasel Lasertechnik GmbH & Co. KG • Carl Zeiss AG • Carl Zeiss IMT GmbH • Carl Zeiss Microlmaging GmbH • Carl Zeiss Optronics GmbH • Carl Zeiss Meditec AG • Centrotherm Photovoltaics AG • Charité • Coherent GmbH • Concentrix Solar GmbH • Continental Automotive GmbH • Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) • DGaO • DILAS Diodenlaser GmbH • ELCON Systemtechnik GmbH • Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten • Fachhochschule Konstanz • FEE GmbH • Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik • ficonTEC Service GmbH • Forschungszentrum Borstel • Fraunhofer FIT • Fraunhofer HHI • Fraunhofer IAP • Fraunhofer IGB • Fraunhofer ILT • Fraunhofer IOF • Fraunhofer IPM • Fraunhofer IPT • Fraunhofer ISC • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IST • Fraunhofer IWM • Fraunhofer IWS • Fraunhofer IZM • Fresnel Optics GmbH • Friedrich-Schiller-Universität Jena • H.C.Starck Clevios GmbH • Heidelberger Druckmaschinen AG • Heliatek GmbH • Helmholtz-Zentrum Berlin • Heraeus Noblelight GmbH • Heraeus Quarzglas GmbH & Co. KG • High Performance Computing Center Stuttgart • Hochschule Aalen • Hochschule Reutlingen • HOCHTIEF Energy Management GmbH • Holoeye Photonics AG • Hommel-Etamic GmbH • Humboldt-Universität Berlin • IHP GmbH • Infineon Technologies AG • InnoLight GmbH • INP Greifswald • Institut für Photonische Technologien • JDSU Deutschland GmbH • Jenoptik AG • Jenoptik Automatisierungstechnik GmbH • JENOPTIK Laser, Optik, Systeme GmbH • Jenoptik Laserdiode GmbH • JENOPTIK Polymer Systems GmbH • JT Optical Engine GmbH + Co. KG • Karl Storz GmbH • Karlsruher Institut für Technologie • Klinikum der Universität München • Kompetenznetz INPLAS • KUKA Systems GmbH • Laser- und Medizin-Technologie GmbH • Laser Zentrum Hannover • Laser-Laboratorium Göttingen • Laserline GmbH • LaVision Biotec GmbH • Ledon OLED Lighting GmbH & Co. KG • Leica Microsystems CMS GmbH • LEYBOLD OPTICS GmbH • LIMO Lissotschenko Mikrooptik GmbH • LINOS Photonics GmbH & Co. KG • LPKF Laser & Electronics AG • Ludwig-Maximilians-Universität München • LUMERA LASER GmbH • Mahr GmbH • Max-Born-Institut (MBI) • Max-Planck-Institut für Quantenoptik • Meyer Werft GmbH • mso jena Mikroschichtoptik GmbH • m-u-t AG • Nanoplus GmbH • Nokia Siemens Networks GmbH • Novaled GmbH • OLYMPUS Winter & Ibe GmbH • OSRAM GmbH • OSRAM Opto Semiconductors GmbH • Philips Technologie GmbH • Photonik Zentrum Kaiserslautern • Physikalisch-Technische Bundesanstalt • PicoQuant GmbH • Plastic Electronics Foundation • POG Präzisionsoptik Gera GmbH • Polytec GmbH • Precitec KG • Premium Aerotec GmbH • rap.ID Particle Systems GmbH • r-biopharm AG • Revotar Biotech GmbH • RICARDO Deutschland GmbH • Robert Bosch GmbH • Roche Diagnostics GmbH • ROFIN-SINAR Laser GmbH • Rowiak GmbH • RWTH Aachen • Sartorius Mechatronics GmbH • SCHOTT AG • SCHOTT Solar AG • Sick AG • Siemens AG • Singulus Technologies AG • SIOS Messtechnik GmbH • SIRONA Dental Systems GmbH • Siteco Beleuchtungstechnik GmbH • SUSS MicroOptics SA • Technische Fachhochschule Wildau • tesa scribos GmbH • TILL Photonics GmbH • Trilux GmbH & Co. KG • Tropp Lighting Design GmbH • TRUMPF Laser GmbH & Co. KG • TRUMPF Laser Marking Systems AG • TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH • Technische Universität Berlin • Technische Universität Braunschweig • Technische Universität Darmstadt • Technische Universität Ilmenau • Technische Universität München • u2t Photonics AG • Universität Ulm • Universität des Saarlandes • Universität Freiburg • Universität Hamburg • Universität Hannover • Universität Heidelberg • Universität Karlsruhe • Universität Magdeburg • Universität Stuttgart • Universität Ulm • Universität Würzburg • Universitätsklinikum Bonn • Universitätsklinikum Mannheim • Universitätsklinikum Münster • VERTILAS GmbH • VON ARDENNE Anlagentechnik GmbH • W.O.M. WORLD OF MEDICINE AG • Wacker Chemie AG • Wavelight AG • World of Medicine AG • ZETT Optics GmbH • ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik