

TECHNOLOGIE ROADMAP

der Photonik in Österreich

2021–2027





HERAUSGEBER

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

Mit Unterstützung des Bundesministeriums für
Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

PROJEKTMANAGEMENT

Photonics Austria

Plattform zur Förderung der österreichischen Interessen im Bereich Photonik

Franz-Pichler-Straße 30 | 8160 Weiz | Österreich

Arno Grabher-Meyer, Michael Wurzinger, Maximilian Hartmann, Marlene Anzengruber

www.photonics-austria.at | office@photonics-austria.at

AUTOR*INNEN

Vorwort Verena Vescoli

Photonik als Schlüsseltechnologie Paul Hartmann, Anja Schinner

Sensorik und Metrologie Gernot Fasching, Robert Holzer

Produktion und Qualitätssicherung Paul Hartmann, Andreas Otto

Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt Rainer Hainberger

Informations- und Kommunikationstechnologien Bernhard Schrenk

Intelligente Beleuchtung für urbane und rurale Anwendungen Heinz Seyringer, Franz Wenzl

Vernetzte Mobilität, Transport und Sicherheit Marlene Anzengruber, Tia Maria Troch

Photonische Quanten-Technologien Gregor Weihs, Hannes Hübel

Bildung, Training und Grundlagenforschung Joachim Krenn

Long Term Vision Alfred Felder

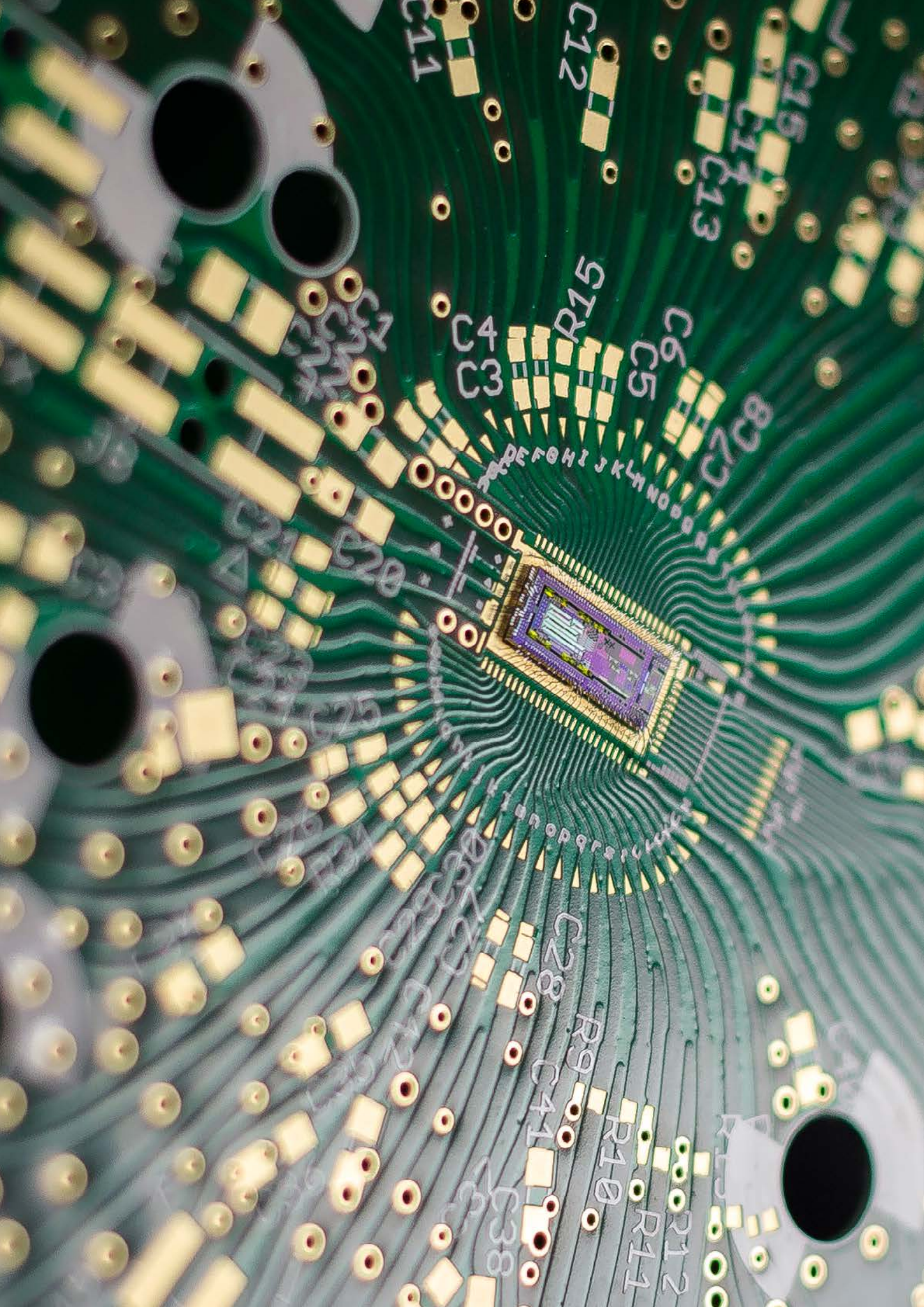
Executive Summary Arno Grabher-Meyer

UMSETZUNG

Gestaltung Maike Sophie Rindler

Redaktion Arno Grabher-Meyer

Datum Oktober 2021



5 Vorwort

7 Photonik als Schlüsseltechnologie

9 Technologien



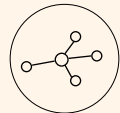
9 Sensorik und Metrologie



15 Produktion und Qualitätssicherung



21 Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt



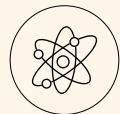
27 Informations- und Kommunikationstechnologien



33 Intelligente Beleuchtung für urbane und rurale Anwendungen



39 Vernetzte Mobilität, Transport und Sicherheit



45 Photonische Quanten-Technologien



51 Bildung, Training und Grundlagenforschung

57 Institutionen und Autor*innen

61 Long Term Vision

63 Executive Summary



9 Sensorik und Metrologie



33 Intelligente Beleuchtung für urbane und rurale Anwendungen



15 Produktion und Qualitätssicherung



39 Vernetzte Mobilität, Transport und Sicherheit



21 Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt



45 Photonische Quanten-Technologien



27 Informations- und Kommunikationstechnologien



51 Bildung, Training und Grundlagenforschung



Vorwort

**VERENA VESCOLI,
SENIOR VICE PRESIDENT R&D AMS**

Photonik – die Schlüsseltechnologie des Informationszeitalters

Eine Vielzahl von Daten – Text, Ton, Bilder und Videos, Sprache oder Klang – werden weltweit erzeugt, erfasst, verteilt, verarbeitet und gespeichert. Konventionelle Technologien stoßen dabei an ihre Grenzen. Die Photonik, die funktionale Symbiose aus Elektronik und Optik, ist der **Schlüssel für Technologien der Zukunft**, die in der Lage sein werden, innovative und nachhaltige Lösungen für unsere Gesellschaft und Umwelt anzubieten.

Die Kombination aus Festkörperphysik, Halbleitertechnik und Optoelektronik ist die Ausgangsbasis innovativer und außergewöhnlicher Technologien der Zukunft. Neben optischem Informationstransfer und photonischen Netzen sind es unter anderem auch photonisch integrierte Schaltkreise (sogenannte PICs), die es zukünftig erlauben werden komplexe Sensorsysteme kompakter und ressourcenschonender zu realisieren und zwar bei gleichbleibender beziehungsweise verbesserter Funktionalität im Vergleich zu diskret integrierten Bauteilen. **Höhere Systemkomplexität in Kombination mit reduziertem Formfaktor zu günstigeren Herstellkosten** – das steht im Mittelpunkt der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in der Photonik. Diese bereiten den Weg für hoch-innovative Lösungen: Anwendungsgebiete sind etwa auf den Gebieten einer lebendigen und dynamischen Visualisierung, einer intelligenten und den menschlichen Bedürfnissen exakt angepassten Beleuchtung zu finden, aber auch in der Mobilität der Zukunft. Erst durch die Photonik und durch die Heterointegration von photonischen und elektronischen Komponenten werden elektronische Systeme mit neuartigen Eigenschaften und Funktionalitäten ermöglicht.

Das über die letzten Jahrzehnte bestimmende Technologie-Paradigma der Miniaturisierung „More Moore“ wird durch „More-than-Moore“ und „Beyond-Moore“ erweitert. Dank der Photonik ist zukünftiger technologischer Fortschritt **von einem stetig wachsenden Energiebedarf entkoppelt**. So werden zum Beispiel photonische Schaltkreise Cloud Computing zu einem Bruchteil des heutigen Energiebedarfs ermöglichen und nur dadurch können die prognostizierten Datenmengen in der Zukunft verarbeitet werden. Sensoren basierend auf photonischen Bauelementen werden zu jeder Zeit und an jedem Ort die Vitalfunktionen von Menschen messen und Krankheitserreger detektieren können. Das wird zum einen die medizinische Diagnostik revolutionieren, und zum anderen in Anbetracht von Pandemien und einer alternden Gesellschaft die **Lebensqualität** einer jeden Einzelnen in der Gesellschaft erhöhen.

Die Roadmap für Photonics Austria baut auf die Stärken des österreichischen Photonics Sektors, erhöht seine Wettbewerbsfähigkeit und weist visionär den Weg in eine bessere und lebenswerte Zukunft. Die Photonik liefert nachhaltige Technologien für soziale und technologische Megatrends wie die Digitalisierung und Kommunikation, das Gesundheitswesen, Klimaschutz und Sicherheit. Die Photonik wird somit zur wesentlichen Triebkraft für wirtschaftliches Wachstum, Beschäftigung und nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft im Herzen Europas und darüber hinaus.

Die enge Partnerschaft zwischen photonischer Industrie und akademischer Forschung ist von essenzieller Bedeutung für die erfolgreiche und zeitnahe Umsetzung dieser Roadmap. Von den Partnern in Österreich werden alle Bereiche der Photonik adressiert, von energiereicher kurzwelliger Strahlung im extremen Ultraviolett, dem sichtbaren Licht bis hin zum infraroten und fern-infraroten Spektralbereich. ●



Mobile Devices als integraler Bestandteil unseres Lebens sind vorzüglich als Steuerung des smarten Human Centric Lighting geeignet, das einen großen Einfluss auf unsere Stimmung, unser Wohlbefinden und unsere Gesundheit hat.

Photonik als Schlüsseltechnologie

Was ist Licht und wie wird es genutzt?

Licht ist ein elementares Phänomen. Es ist die Grundlage für die Entwicklung des Lebens und umgibt uns überall, zu jeder Zeit. Für den Großteil der Menschheit gilt dies als selbstverständlich und man vergisst die Vielzahl von Dingen, welche im täglichen Leben erst durch das Licht ermöglicht werden. Einerseits lässt es uns Farben sehen, andererseits überträgt es aber auch Energie, sodass wir Wärme empfinden. Pflanzen brauchen Licht für die Photosynthese und bei anderen Lebewesen, wie beispielsweise dem Menschen, beeinflusst es die Hormonausschüttung und bewirkt ein Gefühl der Zufriedenheit.

Aufgrund der vielseitigen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten wurde schließlich daran gearbeitet, Licht auch für technische Zwecke zu nutzen. Damit wurde der Grundstein für die Photonik gelegt, welche durch technologischen Fortschritt immer weiterentwickelt werden konnte und immer mehr neue Möglichkeiten eröffnet.

Heute findet man **photonische Anwendungen in einem Großteil von Alltagsgeräten** wie Smartphones, Bildschirmen oder allgemein in der Beleuchtung. Doch auch für Industrie und Medizin ist Licht zu einem unverzichtbaren Werkzeug geworden. Dies vor allem, da Klima- und Umweltschutz in Verbindung mit dem Ausbau von Mobilität, Energie, Kommunikation, Sicherheit und Gesundheit unsere moderne Gesellschaft vor viele Herausforderungen stellt.

Themen wie Energie- und Ressourcenschonung werden zum Grundpfeiler neuester technologischer Errungenschaften. Moderne Anwendungen, die nicht umweltverträglich sind, finden aktuell kaum mehr Zuspruch. Hier übernimmt die Photonik eine Schlüsselrolle. Unter anderem, weil viele Prozesse dadurch effizienter und nachhaltiger gestaltet werden können, was eine Abfall- und Emissionsverminderung mit sich bringt. Somit besitzen photonische Technologien ein erhebliches Zukunftspotential, welches bei entsprechender Ausschöpfung einen entscheidenden Beitrag zur verbesserten Lebensqualität zukünftiger Generationen leisten wird.

Was ist Photonik?

Die Photonik beschäftigt sich mit Licht und dessen technischer Nutzung. Die Bezeichnung Photonik setzt sich aus dem Begriff Photon (griech.: phos – Licht) und der Endung von Elektronik zusammen. Dazu werden heute optische Technologien gezählt, die zur Erzeugung, Verstärkung, Übertragung, Steuerung und Messung von elektromagnetischer Strahlung verwendet werden. Photonen benennen dabei die kleinsten diskreten Energiepakete (Quanten) des Lichts. Elektronen wechselwirken mit Photonen, wodurch sich die Schnittstelle zur Elektronik ergibt.^{1,2}

Die Bedeutung der Photonik für die europäische Wirtschaft

Photonik spielt als explizite **Key Enabling Technology** eine zentrale Rolle in der österreichischen und europäischen Technologieentwicklung, und wird dabei in hohem Tempo weiterentwickelt. Die Photonik stellt dadurch eine reiche Quelle technologischer Entwicklungen und kommerzieller Verwertungsmöglichkeiten bereit und ist damit ein essenzieller Faktor der industriellen Wirtschaft.³

Der globale **Photonik-Markt betrug 690 Mrd. € im Jahr 2019**, der europäische 103 Mrd. € (15%), mit einer mittleren Wachstumsrate von 7% (2005-2019), was dem Dreifachen der Rate des europäischen Bruttonationalprodukts entspricht und auch über dem Wachstum vergleichbarer Hightechsparten liegt (z.B. Mikroelektronik: 4%). 390.000 Arbeitsplätze konnten 2019 in der EU direkt dem Segment der Photonik zugeordnet

werden,⁴ wobei Hightech-Segmente und hochwertige Produkte dominieren. In vielen Marktsegmenten kommen die Marktführer aus Europa, manche sogar aus Österreich, wenngleich sie mitunter als „hidden champions“ bezeichnet werden müssen.

Der **Marktanteil europäischer Firmen in Teilsegmenten ist beachtlich** und reicht von Industrie 4.0 (Produktionstechnologie) mit 40% über optische Instrumentierung mit 38%, Verteidigung und Sicherheit mit 22%, bis zu Komponenten und Materialien mit 19% und Mobilität mit 17%, um nur die wichtigsten Beispiele zu nennen.

Die Bedeutung der Photonik für Österreich

Die heimische Forschung und Wirtschaft stellt im Umfeld der Photonik in weiten Bereichen ein Spiegelbild der europäischen Sicht dar, wie sie in der Photonics21 Roadmap abgebildet wird. Dabei liegen die österreichischen Stärken unter anderem in den Segmenten Beleuchtung (Allgemein und Automotive), Integrierte Photonische Schaltkreise, Sensorik und Produktionstechnologien. Marktführer wie auch hoch spezialisierte kleinere und mittlere Unternehmen sind aus der internationalen Photonics-Landschaft nicht mehr wegzudenken und liefern wertvolle Beiträge zu bahnbrechenden Innovationen.

Die Entwicklungen im Bereich **Mobilität und Sicherheit** umfassen Matrix- und Laserscheinwerfer, modernste dreidimensionale Kameratechnologien für zukünftiges autonomes Fahren und unbemannte Luftfahrzeuge (Drohnen) ebenso wie faseroptische Sensoren zur Echtzeiterfassung und Verfolgung der Züge und zur Überwachung von Verkehrsinfrastruktur.

Im Bereich von **Life Science, Gesundheit und Umwelt** sind Beiträge für optische Bildgebungsverfahren wie optische Kohärenztomographie zur kontaktlosen, tiefenaufgelösten Visualisierung von Geweben hervorzuheben. Nicht weniger bedeutend sind die Errungenschaften bei Sensoren und Methoden zur Umweltüberwachung, wie Luft- und Gewässerreinigung oder die landwirtschaftliche Produktion.

Intelligente, umweltfreundliche **Beleuchtung** Made in Austria ist weltweit im Einsatz, ob mit einem Fokus auf Human Centric Lighting Aspekte oder für Horticulture Anwendungen. Die Forschung an intelligenten Systemen und effizienten optischen Lösungen steht schon seit Jahren auf der Agenda der Firmen und Forschungsinstitute.

Dasselbe gilt für die österreichische **Sensor-, Produktions- und Qualitätssicherungstechnologie**. Photonische Methoden für zerstörungsfreie Qualitätskontrolle sind von der Industrie geforderte Entwicklungen, an welchen österreichische Firmen und Institute arbeiten. Laser sind nicht nur beim Schweißen die bevorzugten Energiequellen, sondern auch für die meisten Arten des 3D-Drucks oder des Additive Manufacturing.

Aber auch moderne **Informations- und Kommunikationssysteme** sind ohne Laserlicht undenkbar. Im Vergleich zu Elektronen legen Photonen in Glasfaserkabeln weite Strecken mit bis zu 20-mal geringeren Verlusten zurück. Aber auch zur Datenspeicherung und für zukünftige neuartige Rechneinheiten sind photonische Technologien von unschätzbarem Wert.

Auch in der **optischen Quantentechnologie** und hier insbesondere auf dem Weg zum optischen Quantencomputer sind österreichische Institute und Firmen weltweit vorne dabei, sicherlich auch wegen des im internationalen Vergleich hohen Niveau der **Bildung und Grundlagenforschung** in der Photonik. ●

Quellen:

¹ Steglich, P. & Heise, K., 2019. Photonik einfach erklärt - Wie Licht die Industrie revolutionierte. Wiesbaden: Springer Spektrum. | ² Bäuerle, D., 2009. Laser - Grundlagen und Anwendungen in Photonik, Technik, Medizin und Kunst. Weinheim: WILEY-VCH. | ³ Photonics 21, 2019, Europe's age of light, Düsseldorf: European Technology Platform Photonics 21 | ⁴ Tematys, 2020, photonics market data and industry report-2020



Abb. 1: Intelligente Prozessintegration und Datenauswertung eröffnet zahlreiche neue Anwendungen für miniaturisierte Spektrometer.

Sensorik und Metrologie

Der Hightech-getriebene globale Photonik Sensor Markt wurde 2020 mit 13,25 MRD USD bewertet und erwartet bis 2026 eine jährliche Wachstumsrate von 17% auf 26,65 MRD USD. Die Vielseitigkeit der Nutzung von Sensordaten für intelligente Entscheidungsfindung (z.B. bei Machine Vision Sensoren) und die Entwicklungen der Industrie 4.0 mit Konnektivität, Flexibilität, Künstlicher Intelligenz (KI) und Geschwindigkeit in Unternehmensprozessen werden diese Marktentwicklung weiter forcieren. Auch die regulatorischen Anforderungen an Safety und Security sind ein wesentlicher Treiber des Photonik Marktes. Er verlangt kontinuierlich nach noch kompakteren, leichteren, effizienteren und zuverlässigeren Geräten und Systemen mit höherer Leistung und mehr Funktionalität, die auch in großen Stückzahlen wirtschaftlich herstellbar sind.

Optik-basierte Sensorik kann genau diese zuvor genannten Anforderungen erfüllen und hat darüber hinaus eine Vielzahl von Vorteilen, die ein weites Einsatzgebiet ermöglichen. Grundsätzlich lassen sich hier

zwei unterschiedliche Zielrichtungen ausmachen:

a) Hightech Erweiterungen für Consumer-Elektronik und b) high-performance Lösungen für die industrielle Sensorik. In beiden Bereichen gibt es

höchst relevante Player in Österreich und in der Photonics Austria: Dazu zählen ein weltweit führender Entwickler und Hersteller von photonischen Sensoren und Lichtquellen zur Realisierung der unterschiedlichsten Systeme im Consumer- und Industrie-Markt oder weltweit anerkannte Forschungseinrichtungen für photonische Systeme für die prozessintegrierte industrielle Messtechnik.

Optische Sensoren ermöglichen berührungsloses Hochleistungs-Screening in der Industrie, im Gesundheitswesen und bei Verbraucheranwendungen. Schon in den letzten Jahren haben hier eine **Miniaturisierung und eine Kostenreduktion** stattgefunden, die es ermöglichen, deutlich mehr Sensoren als früher einzusetzen. Die Verbindung von hochpräzisen optischen Sensoren und analogen Complementary Metal Oxide Semicon-

ductor (CMOS)-Mikrocontrollern mit hoher Geschwindigkeit ist erforderlich, um zukünftige Photonik-basierte Sensorlösungen zu entwickeln, welche die Funktionalität und Leistung von Sensorsystemen revolutionieren werden. Softwarebasierte 3D-Sensortechnologie erweitert die Fähigkeiten der Hardware, ihre reale Umgebung „wahrzunehmen“ und findet sich heute zum Beispiel bereits in Smartphones, Autos, Drohnen und Cobots. In Smartphones hat die Gesichts- oder Gestenerkennung bereits die Art und Weise verändert, wie wir damit interagieren, aber sie wird auch in Spielen oder beim sicheren Banking eingesetzt. In Autos wird optische 3D-Sensorik der Schlüssel zum autonomen Fahren sein, aber auch Anwendungen im Innenraum wie Gestensteuerung, berührungslose Armaturenbretter oder Müdigkeitserkennung werden die Sicherheit und Funktionalität von Autos drastisch erhöhen. Im Internet werden auf Sensorik basierende 3D-augmented-Features das Benutzererlebnis in Augmented- und Virtual-Reality-Anwendungen beispielsweise im Bereich Social Media oder E-Commerce verändern.



Abb. 2:

Laser sind aus der photonischen Sensorik nicht wegzudenken.

Nationale Highlights

In den Bereichen Sensorik, Beleuchtung sowie Visualisierung ist das österreichische Unternehmen *ams* auf dem Weg zum Marktführer für Komponenten und Lösungen. Aber auch andere österreichische Firmen und Forschungseinrichtungen in diesem Segment sind im internationalen Vergleich im technologischen Spitzenfeld angesiedelt. **Um weiterhin konkurrenzfähig zu sein, müssen die Technologie-Roadmaps der Unternehmen Schlüsseltechnologien der Photonik abdecken** (Abb. 3). Das reicht von Emittoren über Lichtmodulatoren und Detektoren bis zu Technologien für integrierte Schaltungen zur Datenerfassung und -manipulation.

Emitter

Um aus der Vielfalt der von *ams* entwickelten Emittoren, Light-Emitting Diodes (LEDs), μ LEDs, Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL)/ Edge-Emitting Laser (EEL) sowie Lampen nur einen Emittor-Typ herauszugreifen, haben beispielsweise deren VCSELs die beste Leistungsdichte ihrer Klasse sowie die beste Konversionseffizienz. Diese VCSELs findet man nicht nur in Smartphones, sondern auch in Solid-State-Light Imaging, Detection and Ranging (LiDAR)-Anwendungen für das autonome Fahren. Um die Effizienz weiter zu verbessern, gibt es verschiedene bedeutende Forschungsthemen: Besonders hervorzuheben sind die Optimierung der internen Quanteneffizienz, die Inte-

10

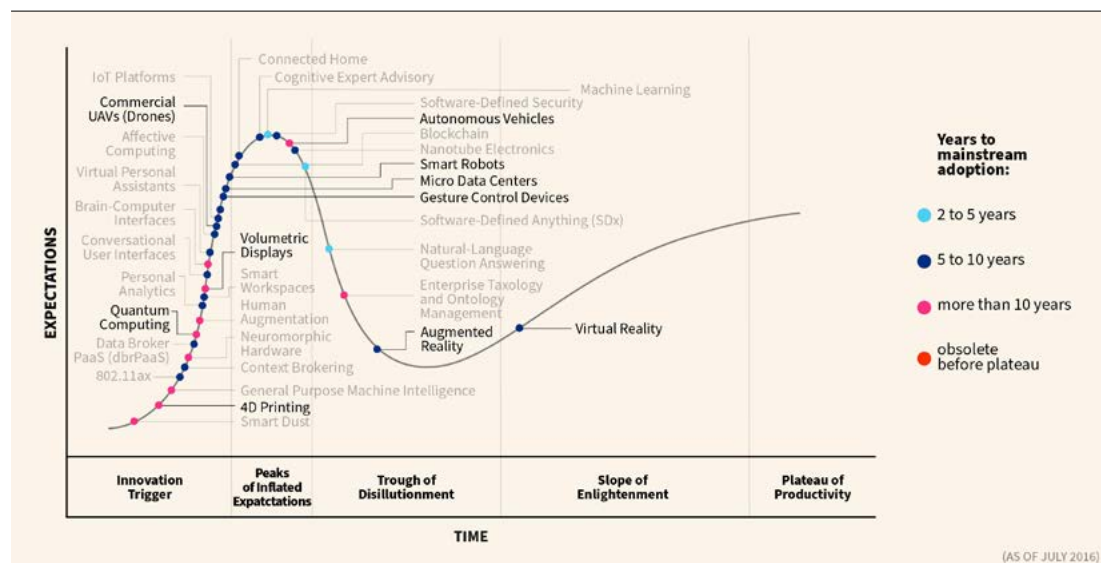
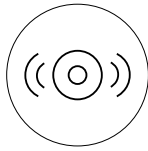


Abb. 3: Gartner's Hype Cycle für neue Technologien zeigt den Status zahlreicher photonischer Technologien, die als Grundlage für zukünftige Anwendungen behandelt werden.



gration diffraktiver optischer Strukturen für eine effiziente Lichtauskopplung und -lenkung sowie die ultrakompakte Modulintegration.

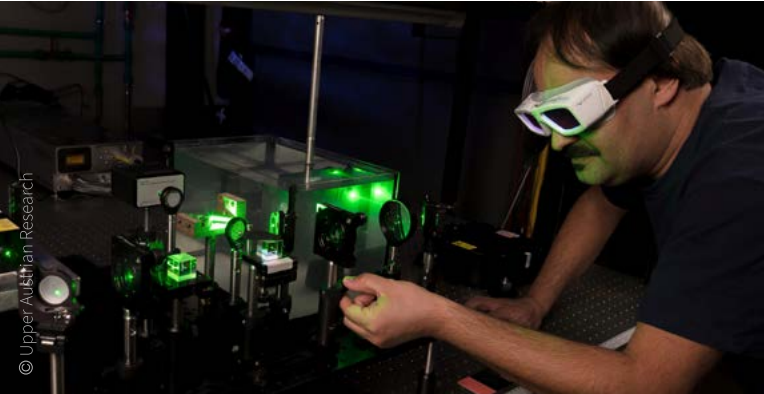


Abb. 4: Justierung eines Lasers.

Sensoren

Auch bei Sensoren gibt es **internationale Benchmarks aus Österreich**, zum Beispiel das Sensormodul TMD2636, mit dem *ams* 2021 den weltweit kleinsten Näherungssensor für den Einsatz in kabellosen Ohrhörern mit einem Gehäusevolumen von nur 0,7 mm³ vorgestellt hat. Das erleichtert die Integration von mehreren Sensoren zur zuverlässigen Erkennung der Nutzung. Der Ohrhörer schaltet sich automatisch ein, wenn er in das Ohr eingesetzt wird bzw. schaltet sich aus, wenn er herausgenommen wird. Dadurch wird der Komfort für die Benutzer*innen gesteigert und vor allem Energie gespart, wenn der Ohrhörer nicht verwendet wird.

Ultrakompakte optische Mehrkanalsensoren im sichtbaren bis nahen Infrarotbereich werden zur spektralen Identifikation und für analytische Anwendungen in mobilen Geräten eingesetzt. Der *ams*-Mehrkanalsensor AS7341L ermöglicht eine spektral aufgelöste optische Abtastung. Darauf aufbauend konnte beispielsweise die deutsche *Sanovia Healthcare* im Jahr 2020 innerhalb von nur neun Monaten einen COVID-19 Lateral Flow Test entwickeln.

Ein gutes Beispiel eines im Gegensatz zu dieser Breite an Sensorlösungen sehr spezialisierten österreichischen Unternehmens ist *XARION Laser Acoustics*. Das Unternehmen entwickelt und produziert optische Mikrophone mit besonders hoher Sensitivität und Bandbreite, primär für industrielle Anwendungen in der Messtechnik.

Systeme

Aufbauend auf der frühzeitigen Beschäftigung mit relevanten Zukunftsthemen konnte sich beispielsweise das oberösterreichische Forschungsunternehmen *RECENDT* eine international führende Rolle in Themenfeldern

der photonischen industriellen Sensorik erarbeiten, wie zum Beispiel in der Laser-basierten Ultraschallprüfung, der Terahertz-Prüftechnik, Optical Coherence Tomography (OCT)-Technologie oder der Mikrospektrometer-Technologie. Gerade diese bietet eine gewaltige Chance für die breite industrielle Anwendung, da sie durch einen Sprung bezüglich Größe, Robustheit und Kosten neue Nutzungspotenziale für die bewährte und bekannte Technologie der Infrarot-Spektroskopie eröffnet. Die Kosten wurden beispielsweise bereits jetzt von der Größenordnung € 40.000,-- auf die Dimension € 400,-- gedrückt – und weitere technologische Entwicklungen bieten Potential in Richtung € 4,--. Dadurch eröffnen sich interessante neue Anwendungsmöglichkeiten, insbesondere auch für die *RECENDT* mit ihrer breiten Expertise in der Prozessintegration von Sensorik und in der daran anknüpfenden Datenauswertung. Die im Kapitel „Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt“ (Seite 23) ausführlich besprochene **OCT-Technologie bietet auch im industriellen Einsatz beträchtliches Potential** und wird weiter massiv von der gemeinsamen Forschung und Entwicklung (F&E) profitieren.



Abb. 5: Photonische Sensorik eignet sich auch perfekt für die Roboter-geführte Nutzung.

Systeme in kleinster Bauform stellen PICs (Photonic Integrated Circuits) dar, die auch im Kapitel Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) (Seite 23) für deren Bedeutung in der Telekommunikation umfangreicher dargestellt werden, wo beispielsweise im nationalen Projekt *COHESION*¹ gemeinsamen von *AIT* und *ams* zum Thema „PIC für 3D Netzhautscans“ oder im europäischen Projekt *COLODOR*² mit einem deutschen Partner zum Thema „PIC für Volatile Optical Compounds (VOC)“ bereits bedeutende Arbeiten geleistet wurden. Für die weitere industrielle Nutzung wird besonders die Erstellung von Photonic Design Kits (PDKs) eine bedeutende Voraussetzung sein, wie auch die Halbleiterprozessentwicklung für die Integration von Lichtquellen, Modulatoren, Interferometern, optischen

Filtern und Photodetektoren unterschiedlicher Materialsysteme auf einem Chip.

Eine wichtige Voraussetzung für die breite Anwendung photonischer Sensoren ist in vielen Fällen die **Zertifizierung nach Sicherheitsstandards** für industrielle und öffentliche Verwendung. Insbesondere bei innovativen Technologien ist das häufig äußerst komplex und erfordert eine enge Zusammenarbeit von Innovationstreiber und Zertifizierungsgeber. Das österreichische Unternehmen *tofmotion* ist diesen Weg gegangen und hat die weltweit erste sicherheitszertifizierte ToF Kamera auf den Markt gebracht.

Forschungsprojekte

Ein nationales, von der *Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG)* gefördertes Forschungsprojekt im COMET-Programm, das sich intensiv mit Fragen industrieller optischer Messtechnik auseinandersetzt, ist *PSSP – Photonic Sensing for Smarter Processes*.³ Wie im Projekttitel zum Ausdruck kommt, ist Photonic Sensing in der industriellen Betrachtung nie nur Selbstzweck, sondern hat immer dem industriellen Fertigungsprozess zu dienen, diesen zu optimieren, zu helfen, die Effizienz zu steigern, Fehler zu vermeiden, Sicherheit zu garantieren, besseres Prozessverständnis aufzubauen und bessere Modelle durch Digital Twins zu ermöglichen. Diese Themenfelder bieten weiteres Forschungspotenzial für viele Jahre.

Im Fokus

Die breit gefächerten Einsatzmöglichkeiten optischer Sensorik machen diese für Consumerprodukte als auch industrielle Anwendungen gleichermaßen interessant. Während viele Technologien und Produkte hauptsächlich einem der beiden Themenkomplexe

zuordenbar sind, bewirken der rasante technische Fortschritt und die Kostenreduktion in vielen Fällen auch eine Anwendung in beiden Segmenten.

Hightech Erweiterungen für Consumer-Elektronik

Nicht ausschließlich, aber doch in sehr großem Maß für die Consumer Elektronik bedeutsam, sind die verschiedenen Formen von **Emittern**. Neben der Optimierung und weiteren Verbesserung von LEDs und VCSELs stehen die Entwicklung und der Einsatz von μ LEDs dabei im Vordergrund. Sie werden als Schlüsselemente für die nächste Generation von Displays dienen, da sie bei größerer Helligkeit eine längere Lebensdauer als moderne Organic Light Emitting Diodes (OLEDs) bieten, und darüber hinaus effizienter sind. Die Integration von Sensoren in μ LED-Displays wird mobile Geräte zudem intelligenter machen.



© tofmotion

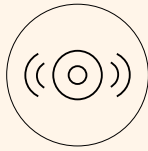
Abb. 6: Outdoorfähige ToF Kamera IC5 von tofmotion.



GREEN PHOTONICS ASPEKT

Photonik kann auch für das feinmaschige Monitoring unserer Umwelt eingesetzt werden, insbesondere zur Bewertung der Luftqualität. Statt hierfür auf regional weitmaschig verteilte Wetterstationen zu setzen, könnten Anwender*innen mit Hilfe von Wearables, die mit einem Partikelsensor ausgestattet sind, die persönliche Umgebung in Echtzeit überwachen und zum Beispiel bei gesundheitsgefährdenden Feinstaubwerten sofort reagieren. Laut einer Studie der Europäischen Umweltagentur (EEA) sterben allein in Europa jedes Jahr über 400.000 Menschen vorzeitig an den Folgen der Feinstaubbelastung. Neben der Integration in Wearables kann ein sol-

cher Sensor auch einfach und vielfältig in Innenräumen und im öffentlichen Raum integriert werden – und kann damit eine bisher nicht gekannte Menge und Dichte an Messwerten beziehungsweise Messstellen liefern. Die *ams* hat gemeinsam mit der *TU Graz* und *Silicon Austria Labs* einen ultrakompakten und energieeffizienten Sensor für mobile Geräte entwickelt, der Nutzer*innen in Echtzeit über den Feinstaubgehalt in der Luft informiert und bei erhöhten Werten warnt. Solche Photonik-basierten Sensoren werden das öffentliche Bewusstsein für regional unterschiedliche Umweltbelastungen schärfen und helfen, weitere regulatorische Maßnahmen voranzutreiben. Diese werden entscheidend sein, um unsere Welt grüner, sicherer und gesünder zu machen.



Weitere Schlüsseltechnologien der 3D-Sensorik sind auch **optische Komponenten und Mikromodule**.

Besonders mobile Geräte verlangen nach ultrakompakten Linsenmodulen, was die Entwicklung von Multistack-Mikrolinsen vorantreibt. Darüber hinaus werden diffraktive optische Elemente wie flache Linsen ihren Weg in die Anwendung finden, um höhere optische Fähigkeiten zu einem niedrigeren Preis zu ermöglichen. 3D-Sensorik, zum Beispiel strukturiertes Licht, nutzt diese Technologie bereits. Die Weiterentwicklung dieser Schlüsseltechnologien wird Sensorapplikationen ermöglichen, die von ultrakleinen Anwendungen wie der Endoskopie bis hin zur Fernerkennung und -erfassung (LiDAR) reichen.

Halbleiterbasierte Detektoren, sowohl im sichtbaren als auch im Infrarotbereich, sind weitere bedeutende Komponenten. Hohe Empfindlichkeit, geringes Rauschen und ein hoher Dynamikbereich sind technische Schlüsseleigenschaften von Bildsensoren. Ein hohes Auflösungsvermögen und hohe Bildwiederholraten ermöglichen eine Optimierung der automatisierten optischen Inspektion, um die Produktivität in Fabriken zu erhöhen. Sie sind aber auch bedeutsam für Anwendung in der Sicherheitstechnik, in intelligenten Verkehrssystemen sowie in der Videotechnik. In Mobiltelefonen können neue Miniatur-Umgebungslichtsensoren in der Lücke zwischen dem Bildschirm und dem Gehäuse des Telefons in Edge-to-Edge-Smartphone-Displays positioniert werden. Dabei ermöglicht beispielsweise eine Kombination mehrerer Photodioden für die Erfassung von sichtbarem Licht und Infrarotlicht die Unterdrückung von Infrarot-Störungen und die Messung von Umgebungslicht bis hinunter zu nur 1 mlux, was das Helligkeitsmanagement des Displays unterstützt und die Bildqualität der Kamera verbessert.

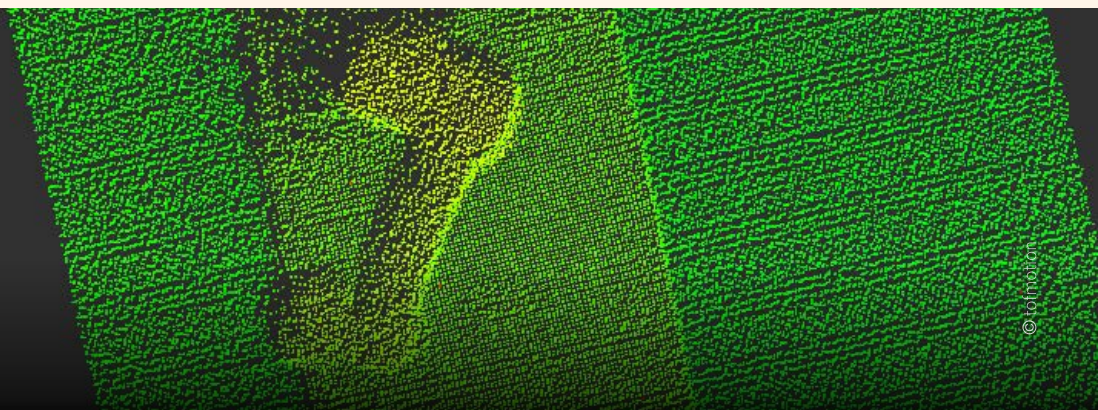
Grundlegende Schlüsseltechnologien für **3D-Sensorik** basieren auf Photonik. Beispielsweise ToF Sensorik, strukturiertes Licht sowie aktives Stereosehen. ToF-Flugzeitsensoren (Abb. 6) beleuchten die Szene mit ultrakurzen Nahinfrarot-Lichtimpulsen und messen die Zeit, bis der Impuls zurückkommt, um das 3D-Bild zu berechnen. Strukturiertes Licht basiert auf der Projektion von Punkten (oder anderen Geometrien) auf Objekte und misst die verzerrten,

zurückreflektierten Muster, um 3D-Objekte darzustellen. Beim aktiven Stereosehen erzeugen zwei oder mehrere leicht versetzte Kameras ein stereoskopisches Bild, aus dem die Tiefeninformation berechnet wird.

High-performance Lösungen für die industrielle Sensorik

Die wesentlichen Anforderungen für Sensortechnologien im industriellen Einsatz sind selbstverständlich die technische Leistungsfähigkeit, Robustheit, Messgeschwindigkeit, aber meist auch der Preis, die Baugröße und die Flexibilität. All diesen Herausforderungen kann mit photonischen Lösungen gut begegnet werden – und wenn berührungslose Messungen gefordert sind, führt meist kein Weg an photonischen Lösungen vorbei. Die Einsatzbereiche sind vielfältig, ebenso wie die Lösungsansätze und die zur Verfügung stehenden Technologien. Als Enabler-Technologien für die Industrie ist der Forschungsbedarf in der Sensorik zwar durch die Industrieansforderungen getrieben, muss aber in der Forschungsförderungslandschaft auch als eigenständige Key-Enabling Technology (KET) berücksichtigt werden.

Zu den Sensoren zählen (neben einfachen Systemen wie Lichtschranken oder bereits sehr gängigen Laser-Tastern/ Distanzmessgeräten) selbstverständlich Kameras. Die laufende Entwicklung in diesem Sektor ist beeindruckend, und sie ist nicht zuletzt getrieben durch den Consumer-Markt. Auflösung, Schnelligkeit, Preis, Baugröße werden optimiert – aber auch die Anwendungsbereiche werden ausgedehnt: Bildgebung ist längst nicht mehr auf den optisch sichtbaren Bereich beschränkt. Chemische Bildgebung (Hyper-Spectral Imaging) liefert Informationen über die orts aufgelöste chemische Beschaffenheit von Produkten oder identifiziert Verunreinigungen. Für die Charakterisierung chemischer Elemente, zum Beispiel in Metallen, können mittels Funkenspektrometrie oder Laser-Induced Breakdown-Spectroscopy (LIBS) bereits Ortsauflösungen im Mikrometerbereich erzielt werden. Neben der chemischen und bildgebenden Sensorik im nahen und mittleren Infrarot (NIR, MIR) entwickelt sich auch die Terahertz-Technologie (THz) laufend weiter. Damit lassen sich auch dickere dielektrische Materialien durchstrahlen und strukturelle 3D-Bilder oder chemische Informationen generieren. Für derartige Anwendungen steht selbstverständlich auch jede Form der röntgen-



basierten Messtechnik (Radiografie, X-ray Computed Tomography - XCT) zur Verfügung, die zwar höhere sicherheitstechnische Anforderungen stellt, aber für manche Einsatzzwecke beinahe unschlagbare Ergebnisse liefert. Mit Mikrofokus-Röntgengeräten können auch kleinste 3D-Strukturen im Mikrometer-Maßstab aufgelöst werden. Bei optisch teiltransparenten Materialien können – ohne Strahlenschutzanforderungen – 3D-Strukturen im Mikrometer-Bereich auch durch die OCT-Methode abgebildet werden. Diese ist echtzeitfähig und in-line in Prozesse integrierbar. Dieser Aspekt der prozessintegrierten Analytik (PAT – Process Analytical Technologies) ist traditionell sehr eng mit den klassischen NIR-spektroskopischen Methoden (Nah-Infrarot) für die chemische Analytik direkt in chemischen und biochemischen Prozessen verbunden. Hier geht die aktuelle technologische Entwicklung klar hin zu kleinen, flexiblen und kostengünstigen Spektrometermodulen – die wiederum die Brücke zu mobilen Consumer-Anwendungen (beispielsweise Scanner-

Applikationen für Lebensmittel, Textilien, Materialrecycling oder Drogentests) schlagen.

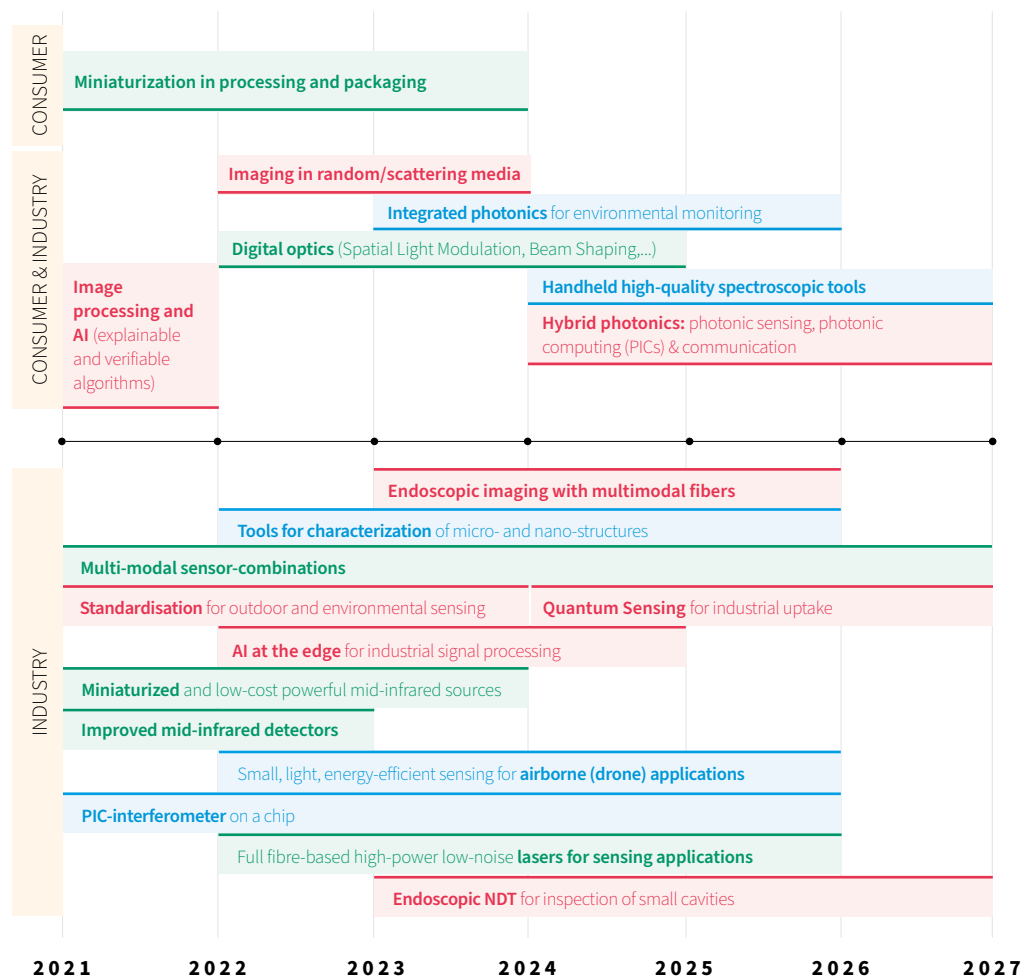
Die Grenzen der photonischen Technologien sind dehnbar: Verfahren wie die Photoakustische Bildgebung oder Laser-induzierter Ultraschall verwenden photonische Laserpulse, um im Material akustische Wellen anzuregen. In der Thermographie werden Licht- oder auch Laser-Impulse genutzt, um thermische Wellen anzuregen. Mit diesen Verfahren können somit auch Materialien untersucht werden, die für die rein photonischen Signale beziehungsweise Wellen nicht ausreichend transparent oder zu stark streuend wären. Bei jedem Messverfahren stellt neben der Physik der Signalerzeugung auch die Mathematik der Signalanalyse einen sehr bedeutenden Erfolgsfaktor dar. Auch hier zeigt sich, dass viele grundlegende Methoden, wie zum Beispiel superresolution-Ansätze, auf alle Wellentypen gleichermaßen anwendbar sind und die Ergebnisse dramatisch verbessern können. ●

TIMELINE

● zugrundeliegende Technologien und Anwendungen

● Challenges

● bahnbrechende Produkte



Quellen:

¹ COHESION: Meilenstein in der Sensor-Miniaturisierung zur Augendiagnostik, (ait.ac.at) | ² COLODOR: Projekt mit Partnern aus Deutschland zum Thema PIC für VOC „volatile organic compounds“ Detektion | ³ PSSP – Photonic Sensing for Smarter Processes, <http://www.pssp.at/>



Produktion und Qualitätssicherung

Die Produktionstechnik befindet sich in einem Wandlungsprozess, der durch die Möglichkeiten neuer IKT vorangetrieben wird, und vielfach als die vierte industrielle Revolution bezeichnet wird. Zusätzliche Innovationsstreiber sind ökologische und Nachhaltigkeitsaspekte, auf politischer Ebene mittlerweile unter dem Begriff „Green Deal“ subsummiert. Photonische Technologien spielen bei diesem Wandel eine entscheidende Rolle. Zwei der für unser heutiges Leben prägendsten Entwicklungen der letzten beiden Dekaden, die heutige Computertechnologie sowie das Internet, wären ohne sie nicht möglich.

Auch die moderne Fertigungstechnik durchläuft heute eine photonische Revolution, wobei frühere Generationen von industriellen Maschinen zunehmend **Lasern und Sensoren, meist in Verbindung mit robotischen Systemen Platz** machen. Photonische Technologien stehen im Mittelpunkt der Strategien des Fertigungssektors für „Industrie 4.0“ – der Entwicklung einer vollständig

digitalisierten und verbundenen Wertschöpfungskette von den Lieferanten*innen bis zu den Kunden*innen, die eine neue Ära der hochpräzisen, kostengünstigen und ressourceneffizienten Produktion, der schnellen und flexiblen „mass customisation“ und neuer Dienstleistungen rund um die hergestellten Produkte ermöglichen wird.

Dies gilt nicht nur für photonische Fertigungsprozesse, wie zum Beispiel der lasergestützten additiven Fertigung. Auch die Qualitätssicherung und -verfolgung – ein Kernthema von Industrie 4.0 – wird zunehmend durch berührungslose und hochgenaue photonische Messtechnik dominiert. Sie führen im Produktionsumfeld unter anderem zu erhöhter Energieeffizienz und der Vermeidung von Ausschuss durch Nullfehlerproduktion. Damit verbundene KI und Big Data (BD) Anwendungen, zur Überwachung und Optimierung von Fertigungsprozessen oder ganzen Produktionsabläufen, basieren oftmals auf den Daten optischer Messtechnik.

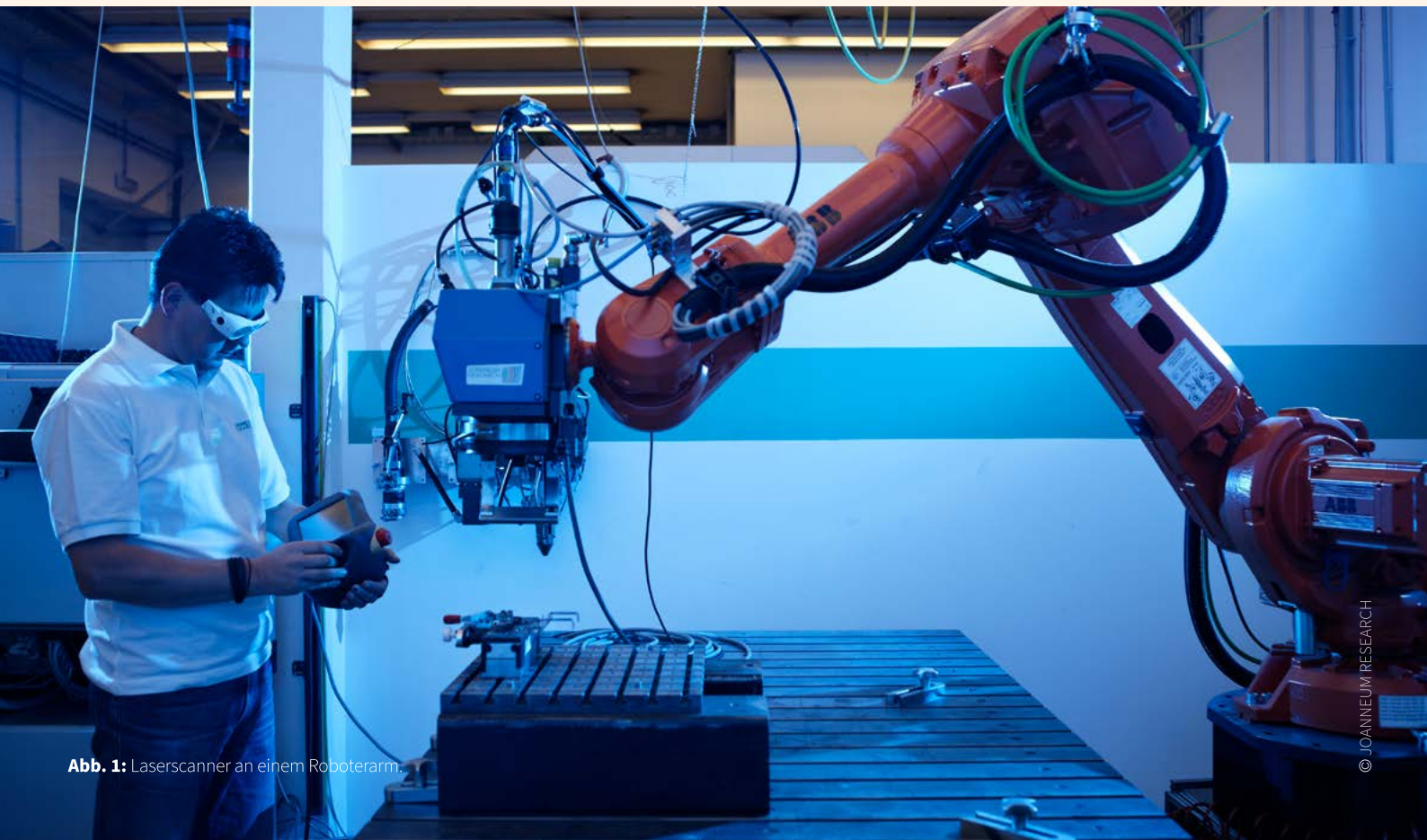


Abb. 1: Laserscanner an einem Roboterarm

Nationale Highlights

Europäische Laseranlagenhersteller nehmen auf dem stark umkämpften weltweiten Markt eine herausragende Stellung ein, auch wenn zuletzt viele kleinere Hersteller (auch mehrere österreichische Laserhersteller) von großen Unternehmen aufgekauft wurden. Trotzdem gibt es gerade im Bereich der lasergestützten Fertigung diverse Akteure in Österreich, die mit ihren jeweiligen Aktivitäten international äußerst erfolgreich sind:

Einzigartige numerische Simulationen

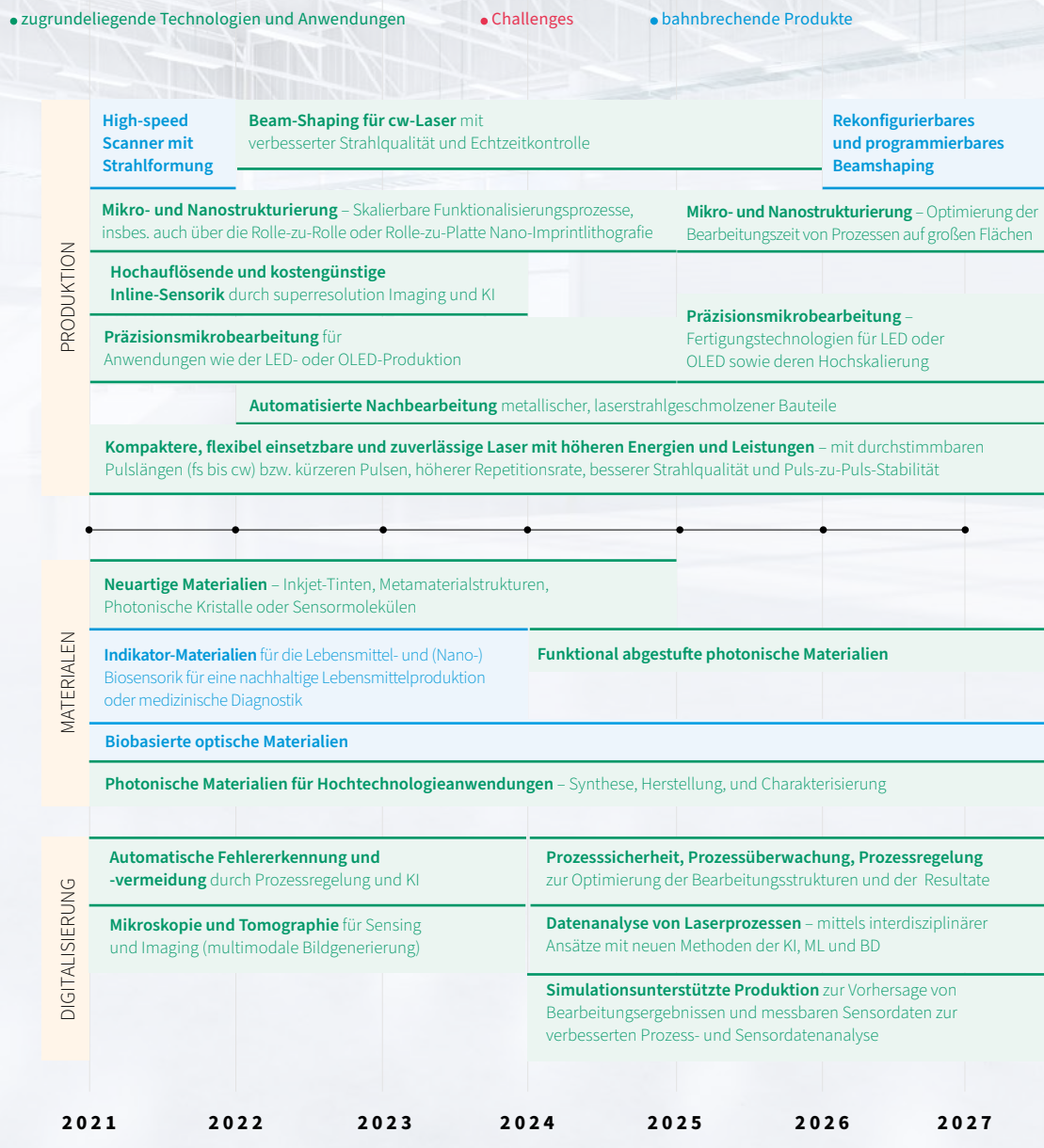
Die *TU Wien* führt weltweit für Industrieunternehmen

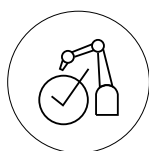
multiphysikalische, numerische Simulationen von Lasermaterialbearbeitungsprozessen mit einem selbst entwickelten Softwarepaket durch. Diese **einzigartigen Simulationen** unterstützen die **Optimierung von Produkten und Prozessen** zum Beispiel mit Blick auf deren Umweltverträglichkeit und tragen direkt zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei.

In-line Monitoring laserbasierter Herstellungsprozesse

Die Firma *Plasmo* ist ein führender Hersteller von in-line Monitoring für laserbasierte Herstellungsprozesse,

TIMELINE





ISI Automotive ein Fertiger von Airbags: Gasgeneratoren für Airbags sind Sicherheitsbauteile, die eine maximale Absicherung der Prozessschritte erfordern. Mittels optischer in-line Kontrolle gelingt eine detaillierte Analyse kritischer Schweißnähte. **Dieser Prozess erspart die zerstörende Prüfung von Stichproben.**

Funktionalisierte Oberflächen

Von JOANNEUM RESEARCH und Bionic Surface Technologies mit photonischen Methoden der Laserbearbeitung und UV-Mikrostrukturierung entwickelte funktionalisierte Oberflächen (Riblets, „Haifischhaut“) ermöglichen in der Luftfahrt, je nach Ausprägung, 1-5% Einsparung von Kerosin. Sie haben sich im Red Bull Air Race bewährt und werden von einem großen europäischen Luftfahrtunternehmen getestet und für die zivile Luftfahrt weiterentwickelt.

Im Fokus

Laserquellen

In Österreich gibt es im Bereich der Herstellung von Laserquellen einige Akteure, die sich in Nischenbereichen sehr erfolgreich positioniert haben. Hier sind vor allem die Aktivitäten im Bereich der ultrakurzen Laserpulse in Vorarlberg und in Wien hervorzuheben. Im Burgenland werden spezielle CO₂-Laser insbesondere für die Kunststoffbearbeitung hergestellt. Im universitären Bereich sind die TU Wien und TU Graz, sowie die Universitäten in Leoben, Graz, Wien und Linz im Bereich der Grundlagenforschung und mit Anwendungen der Lasertechnologie erfolgreich. Hersteller mit weltweiter Bedeutung sind als Integratoren von Lasern in ihre Geräte und Anlagen in Österreich aktiv und weltweit tätige Laserhersteller betreiben lokale Niederlassungen.

Laser mit kürzeren Pulsdauern ermöglichen neuartige Bearbeitungsmethoden und gesteigerte Präzision. Laserquellen, die **Pulse im Piko- und Femtosekundenbereich emittieren, erlauben die weitgehend schädigungsfreie Bearbeitung unterschiedlichster Werkstoffe.** Die technologischen Aktivitäten der nächsten Jahre widmen sich der Entwicklung von kompakteren und zuverlässigen Femtosekundenlasern mit höheren Energien und Leistungen beziehungsweise kürzeren Pulsen, höherer Repetitionsrate, besserer Strahlqualität und Puls-zu-Puls-Stabilität für die Präzisionsmikrobearbeitung für Anwendungen wie der LED- oder OLED-Produktion.

Laserproduktionstechnologien

Anwendungen der Lasertechnologie finden sich in vielen Sparten, sowohl in der Großindustrie als auch

in kleinen gewerblichen Betrieben. Verschiedene Forschungseinrichtungen (z.B. JOANNEUM RESEARCH, TU Wien, FH Vorarlberg) forschen und entwickeln in den Bereichen Laserschweißen, Laserauftragsschweißen, Laserlegieren und Additive Fertigung (3D-Druck im Pulverbett und mittels Laserauftragsschweißen). Obwohl die Lasertechnologie in der Produktion bereits vieler-

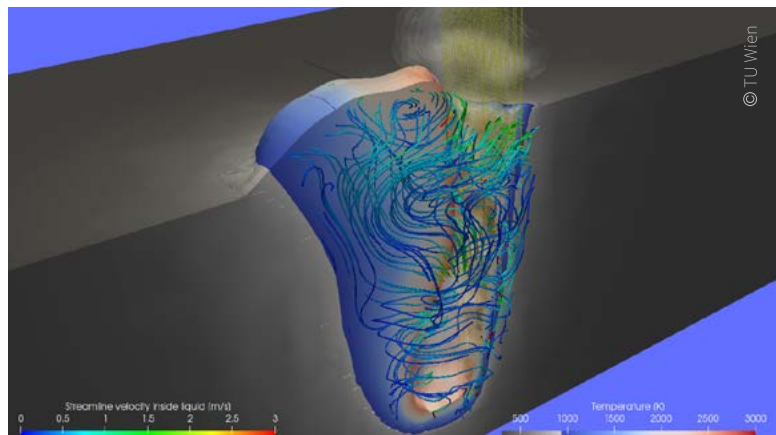


Abb. 2: Simulation eines Laserschmelzbades. Was unsichtbar ist, wird berechnet.

orts gut etabliert erscheint, wird auch in den Branchen, die Laser schon länger einsetzen – wie etwa der Fahrzeugindustrie, der metallverarbeitenden Industrie und dem Maschinenbau – großes Potenzial und ein hoher Forschungsbedarf gesehen: der Einsatz neuer Laserquellen als auch die Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender Anwendungen.

Das Laserschweißen ist eine etablierte Füge-technologie in der Industrie. Aufgrund der Entwicklung neuer Werkstoffe (z.B. hochfeste Stähle, Verbundwerkstoffe) und des zunehmenden Wunsches, unterschiedliche Materialien miteinander zu verbinden (z.B. Hartmetall mit Stahl oder Metall mit Keramik) treten auch in diesem Feld neue unbeantwortete Forschungsfragen auf: automatische Fehlererkennung und -vermeidung durch Prozessregelung, Schweißen komplizierter Materialien und Materialkombinationen, oder Strahlformung bei herausfordernden Fügspaltgeometrien. Im Segment der Energieerzeugung und der Schwermaschinen soll das Laserauftragsschweißen für neue kundenspezifische optomechanische Elemente oder die Reparatur vor Ort eingesetzt werden.

Bereits jetzt ermöglichen Laser mit verbesserter Strahlqualität, einer hohen Ausgangsleistung und ausgezeichneten Effizienz enorme Produktivitätssteigerungen in verschiedensten Anwendungsbereichen. Durch Beam-Shaping und Kombination von Lasern mit anderen Bearbeitungsverfahren können neue Anwendungsfelder und die Bearbeitung neuer Materialkombinationen

erschlossen werden. *So soll durch Beam-Shaping die Mikrostruktur von Bauteilen beeinflusst oder sogar maßgeschneidert werden*, indem man Temperaturfelder in Echtzeit überwacht und regelt. Auch die Entwicklung funktional abgestufter Materialien wird dadurch befeuert und soll es ermöglichen, Multimaterialien zu entwerfen und durch additive Prozesse in gewünschter Zusammensetzung zu produzieren.

Prozessanalyse und -überwachung

Nicht nur im Bereich der laserbasierten Fertigungsverfahren kann eine verstärkte Verknüpfung zwischen einer inline-Prozessdatenerfassung, verschiedenen Sensordaten (Seiten 9-14) und einem vertieften Prozessverständnis aus der Simulation der Prozesse die Wettbewerbsfähigkeit erhalten und sogar ausbauen. *Prozessüberwachung, -steuerung bis hin zu einer Prozessregelung zur Fehlerfrüherkennung beziehungsweise Fehlervermeidung* sind deshalb zentrale Themen für die Zukunft. Eine „Null-Fehler-Produktion“ stellt besonders in der heutigen Zeit – unter dem Aspekt einer möglichst optimalen Ausnutzung sich verknappender Ressourcen, der Vermeidung von Abfall und auch durch optimale Wiederverwertbarkeit – eine immens wichtige Aufgabe dar. Dazu sind allerdings noch weitere Anstrengungen in Sensorik, Monitoring/Diagnose, Prozessverständnis und Simulation von Bearbeitungsprozessen erforderlich.

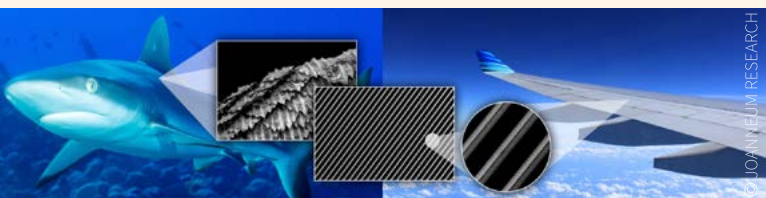


Abb. 3: Laser-generierte Riblets helfen den Strömungswiderstand zu reduzieren und damit Treibstoff zu sparen.

Als Beispiel dafür kann insbesondere der 3D-Druck metallischer Materialien dienen: Die Technik bringt enorme Flexibilität, Zeit- und Materialeinsparungen, sowie bei gewissen Anwendungen (z.B. Leichtbau/Aerospace) auch Kosten- und Energieersparnis mit sich. Damit werden Parameter rentabler Fertigung neu definiert. Nur möglichst umfassendes Prozessverständnis erlaubt die Entwicklung flexibler und gleichzeitig möglichst stabiler Prozesse bei höchster Qualität und minimalem Ausschuss. Hierfür bedarf es unbedingt Messungen in Echtzeit während der Fertigungsprozesse.

Beim Beispiel des 3D-Drucks umfasst eine gesamtheitliche Betrachtung der Prozesskette die Erzeugung der Pulver bis hin zur Nachbehandlung für ein verkaufsfertiges Produkt. Auch für diese automatisierte Nachbearbeitung metallischer, laserstrahlgeschmolzener Bauteile

(automatisierte Entfernung von Stützstrukturen und Oberflächenglättung) sind Lösungen mittels photonischer Prozesse verfügbar.

Bei anderen makroskopischen Laseranwendungen können verbesserte Mess- beziehungsweise Qualitätskontrollinstrumente, beispielsweise als Tools zur Prozessüberwachung beim Trennen oder Fügen, einen wesentlichen Beitrag zur Standortsicherung leisten. Maßgebliche österreichische Player in diesem Themenfeld sind zum Beispiel die *RECENDT (Research Center for Non-Destructive Testing)*, sowie die Firmen *Plasmo* und *Xarion*, die F&E für photonische Methoden der in-line Sensorik vorantreiben.

Die fortschreitende Miniaturisierung photonischer Komponenten für Verfahren zur Qualitätskontrolle, wie die Spektroskopie, bietet sowohl technische als auch finanzielle Vorteile und beflügelt die Forschung nach neuen Materialien. Forschungsaktivitäten in der Mikroskopie und Tomographie für Sensing und Imaging steigern die orts aufgelöste 2D und 3D Darstellung spezifischer Material- und Systemeigenschaften. Dabei ermöglicht die Entwicklung einer innovativen multimodalen Bildgenerierung (z.B. eine Kombination aus visueller Kamera-basierter Inspektion, Röntgen-CT, hyperspektralem Imaging in verschiedenen Größenskalen, Thermografie und Terahertz-CT) wesentliche Fortschritte für Multiskalen-Fragestellungen. Diese Vielzahl an *zerstörungsfreien Testmethoden (Non-Destructive Testing (NDT)) muss für den industriellen Einsatz als Low-Cost und/oder High-Speed-Technologien umgesetzt werden*, unter interdisziplinärer Einbindung aktueller Entwicklungen wie Compressive Sensing, Super-Resolution Imaging, Machine Learning (ML), Edge- und Grid Computing. Für die Datenanalyse werden interdisziplinäre Ansätze mit neuen Methoden der KI, ML und BD unabdingbar sein.

Prozesssimulation für laserbasierte Bearbeitungsverfahren

Prozesssicherheit, Fehlerdetektion beziehungsweise Fehlervermeidung stellen viele Unternehmen, die Lasertechnologie einsetzen, vor große Herausforderungen. In der Regel sind Laserbearbeitungsvorgänge kaum im Detail erfassbar. Eine direkte Beobachtung der Vorgänge, beispielsweise beim Laserstrahlschweißen direkt im Keyhole, ist schwierig und die Zuordnung von Ursache und Wirkung fast unmöglich. So können meist lediglich sekundäre Erscheinungen messtechnisch mit Sensoren erfasst werden. Die Korrelation von Messdaten mit Fehlern bereits während der Bearbeitung und damit in Folge auch deren aktive Vermeidung ist von immenser wirtschaftlicher Bedeutung. *Simulationen stellen hier*



oftmals die einzige Möglichkeit dar, ein besseres Prozessverständnis zu erlangen und Details über

den Bearbeitungsprozess – über Fehlerentstehung und Fehlervermeidung – zu erhalten.

Die Weiterentwicklung von teilweise bereits vorhandenen Simulationsverfahren hin zu Vorhersagetools über zu erwartende Eigenschaften in Verbindung mit detaillierteren Sensorresultaten erfordert weitere Anstrengungen. So sind große Herausforderungen in den nächsten Jahren etwa der Ausbau von Simulationstechniken zur Vorhersage von messbaren Sensordaten, die Analyse von Sensordaten und ihre Verknüpfung mit Bearbeitungsergebnissen sowie Simulationsergebnissen, als auch die Verknüpfung dieser Daten mit den Werkstoffen, verwendeten Strahlquellen, Prozessen und Bauteileigenschaften ganz im Sinne der Ziele in „Industrie 4.0“.

Funktionalisierung von Oberflächen

Präzisionsmaterialbearbeitungsverfahren über **Ablation und Oberflächenstrukturierung mithilfe von Kurzpulslasern (Nano-, Pico- und Femtosekundenlasern)** werden von JOANNEUM RESEARCH, der TU Wien oder auch der FH Vorarlberg bis zur industriellen Serienreife entwickelt. Im Unternehmens-Bereich arbeitet zum Beispiel die *Rebeat Innovation* an der fs-Laserstrukturierung von Mastern für die wieder boomende Vinyl-Schallplattenproduktion. **Die photonische Funktionalisierung von Oberflächen wird in der Zukunft zu neuen, maßgeschneiderten Oberflächen, Strukturen und Bauteilen führen.**

Durch eine selektive Mikro- und Nanostrukturierung können ressourcen- und umweltschonend gewünschte Bauteileigenschaften wie etwa hydrophile, hydrophobe oder auch tribologische Eigenschaften lokal

gezielt verändert werden. Durch die bereits eingangs im Bereich der Strahlquellen erwähnten Entwicklungen soll die Skalierung der Prozesse auf große Flächen bei gleichzeitiger Optimierung der Bearbeitungszeit erreicht und eine wirtschaftliche Fertigung von funk-

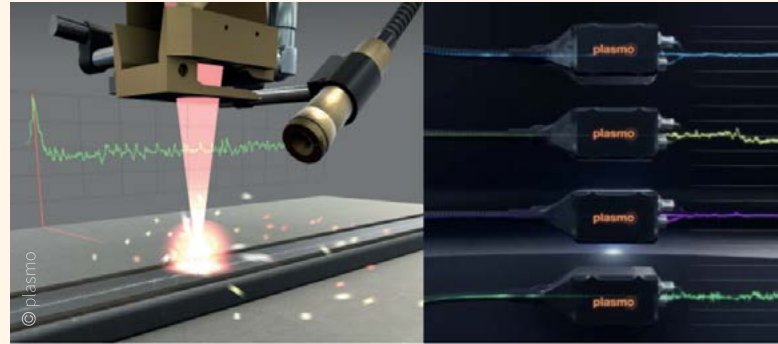


Abb. 5: Optische Analyse enttarnt Produktionsfehler.

tionalisierten Bauteilen ermöglicht werden. Allerdings ist gerade im Bereich der sub- μm -Strukturierung von Bauteilen das generelle Prozessverständnis noch sehr ausbaufähig. Fragen der Prozesssicherheit, Prozessüberwachung, Prozessregelung und Simulationen zur Auswahl optimaler Bearbeitungsstrukturen und der Vorhersage von Resultaten sind auch hier wichtige Themen der kommenden Jahre.

Photolithografie, optische Beschichtungen und verwandte Technologien

In der Halbleitertechnologie werden für Transistorstrukturen Auflösungen im Bereich unter 10 nm angestrebt. Hierfür kann die Modifikation und Strukturierung von Oberflächen auch mithilfe von Licht über lithografische Prozesse erfolgen. Die Material- und Prozessentwicklung für Photo- beziehungsweise Elektronenstrahl-Lithografie oder digitale Drucktechnologien wird deshalb eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Dünne optische und – allgemeiner – photonische Schichten sind für viele Anwendungen ein Schlüsselfaktor. Der Fokus der F&E für die nächsten Jahre wird auf neuartigen funktionalen optischen oder opto-elektronischen Beschichtungen und heterogenen Schichtsystemen beziehungsweise der Funktionalisierung von Oberflächen zur Generierung optisch aktiver Komponenten liegen. Der Bogen der Anwendungen spannt sich dabei von Biosensorik, Farbgebung, Lichtquellen und Detektoren, über den Gebäudereich mit Verbesserung der Energieeffizienz bis hin zu Smartphones, Solarzellen und diagnostischen Geräten. Auch aufkommende Trends wie IoT (Internet of Things) und Industrie 4.0 werden eine zunehmende Nachfrage nach neuartigen technologischen Lösungen generieren. Im Bereich der Funktionalisierungsprozes-

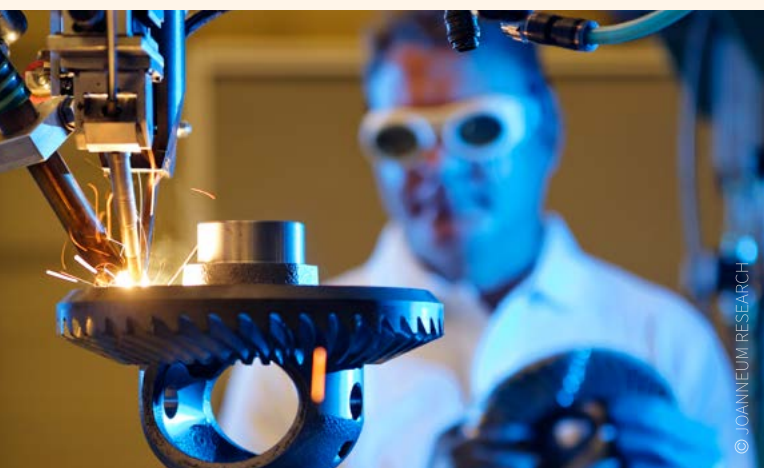


Abb. 4: Laserschweißen hoch beanspruchter Getriebeteile für eine sichere Fahrt.

se wird die Mikro- und Nanostrukturierung, insbesondere auch über die Rolle-zu-Rolle oder Rolle-zu-Platte nano-Imprintlithografie den Weg in die industrielle Anwendung finden, um die klassischen Halbleiterprozesse zu ergänzen und komplett neue Möglichkeiten in der Mikrooptik zu schaffen.

Life-Science-Märkte und in-vitro-Diagnostik werden mit mikrofluidisch basierten, Lab-on-a-Chip-Systemen adressiert, die wesentliche Beiträge zu geeigneten Technologien für viele Millionen benötigte Teststreifen, auch nach pandemischen Ausbrüchen wie der COVID-19-Krise, für eine resiliente Gesellschaft bereitstellen. **Photonische Prozesse sind eine wesentliche Grundlage für die Masteringtechnologien der nano-imprint-lithographischen Verfahren.**

Diese Technologien sind aber auch für Leiterplattenhersteller oder Anlagenbauer interessant. Auf der Seite der Materialien gibt es nur wenige Firmen, die sich der Chemie von strahlungshärtenden Polymeren widmen (z.B. *Allnex* und *Cubicure*). Im Forschungsbereich sind die *Silicon Austria Labs*, *TU Wien*, *JOANNEUM RESEARCH* oder *Profactor* aktiv.

Photonische Materialien

Für die meisten zuvor beschriebenen Schlüsseltechnologien spielen photonische Materialien eine wichtige Rolle, weshalb sie teilweise auch bereits dort erwähnt wurden. Das Thema ist sehr breit und umfasst Teilbereiche aus etablierten Glas- und Halbleiter-Materialien, Polymermaterialien, maßgeschneiderte Nano- und Metamaterialien und aufkommende synthetische Biophotonik-Materialien, um nur einige zu nennen. Österreich hat einen soliden wissenschaftlichen und industriellen Hintergrund bei der Herstellung von Glas- und Keramikwerkstoffen, Glasfasern, kostengünstigen Polymerkomponenten und Lacken, sowie bei der Entwicklung und Herstellung maß-

geschneiderter photonischer Materialien, Komponenten oder Produkte.

Materialien für die Photonik haben auch eine große Bedeutung für den Green Deal bei gleichzeitig hohem zukünftigem Geschäftspotenzial. Zentrale Forschungsschwerpunkte werden dabei die Synthese, Herstellung, und Charakterisierung von photonischen Materialien für Hochtechnologieanwendungen, die entsprechenden innovativen Fertigungstechnologien sowie die Hochskalierung der entsprechenden Prozesse sein. Mikro- und Nanometer-große optische Komposite oder Gläser, glasartige optische Materialien und transparente (Hochleistungs-)Keramiken (etwa YAG-Keramiken), oder neuartige Legierungen (glasartig, mikrolegiert) spielen dabei eine Rolle als Lasermedium, Farbkonversionsmaterial (UV bis NIR) oder als Komponente für die verlustarme optische Signalübertragung. Indikator-Materialien für die Lebensmittel- und (Nano-)Biosensorik für eine nachhaltige Lebensmittelproduktion oder medizinische Diagnostik erfordern Innovationen bei Inkjet-Tinten, Metamaterialstrukturen, photonischen Kristallen oder Sensormolekülen.

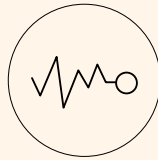
Post scriptum

Eine bessere Vernetzung, sowohl zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen wie auch zwischen Forschungseinrichtungen untereinander, kann einen deutlichen Innovationsschub bewirken. Das ist von großer Bedeutung, da Forschung im Bereich der Lasertechnik häufig sehr kostspielige Infrastruktur und Interdisziplinarität erfordert. Eine intensive Zusammenarbeit von Physiker*innen, Lasertechniker*innen, Metallurg*innen und Werkstoffwissenschaftler*innen aber auch KI- und Big-Data-Spezialist*innen ist notwendig, um die zunehmend komplexen Fragestellungen bei der Entwicklung und Anwendung photonischer Technologien zu beantworten. ●



Laut der Photonics21 Roadmap „Europe’s age of light“ liegen die Herausforderungen einer grünen Produktion in der Realisierung des technischen und ökonomischen Potenzials einer nachhaltigen Produktion und einer hocheffizienten und emissionsfreien Produktion in urbaner Umgebung. Europäische Fabriken sollen bis 2030 schnell, grün und flexibel arbeiten. Photonische Technologien unterstützen dabei inhärent eine Zielausrichtung auf Effizienzsteigerung, Ressourcenschonung und Umweltverträglichkeit, sowie die Mission einer „echten Kreislaufwirtschaft“. Photonik reduziert konkret CO₂-Emissionen,

ermöglicht Gewichtsreduktion und Materialeinsparungen, ersetzt chemische Behandlungen und erhöht den Produktlebenszyklus und die Nachhaltigkeit. Aktuelle Beispiele gibt es in großer Zahl: So wurden vor Kurzem neuartige Laser auf Galliumarsenid-Basis entwickelt, die weltweit die effizientesten Lichtquellen darstellen. Ohne prozessintegrierte Überwachung durch photonische Sensoren wäre die „Nullfehlerproduktion“ zur Vermeidung von Ausschuss nicht denkbar. Und nicht zuletzt basieren viele der additiven Fertigungsmethoden auf photonischen Technologien, die revolutionären Leichtbau und effizientes Rapid-Prototyping ermöglichen.



Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt

Licht ist die Grundlage allen komplexen Lebens wie wir es kennen. Nahezu sämtliche Lebensformen hängen direkt oder indirekt von der Energieversorgung durch den biochemischen Prozess der Photosynthese ab. Für den Menschen und viele Tierarten stellt die visuelle Wahrnehmung die dominante Form zur Aufnahme von Information und Interaktion mit der Umgebung dar.

Daher verwundert es auch nicht weiter, dass photonische Technologien in den Lebenswissenschaften, die unter anderem auch Aspekte der Bereiche Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt umfassen, von zentraler Bedeutung sind. Physikalisch betrachtet ist diese Bedeutung auf die Wechselwirkungen von Licht mit der Elektronenhülle von Atomen und Molekülen sowie mit den mechanischen Rotations- und Schwingungszu-

Im Bereich der Gesundheit werden in den kommenden Jahren verbesserte **photonische Forschungswerkzeuge, Diagnosemethoden und miniaturisierte Messsysteme** einen signifikanten Beitrag zum Wandel des Gesundheitssystems im Sinne der sogenannten **4P Medizin** leisten. Die Abkürzung 4P steht dabei für prädiaktiv, präventiv, personalisiert und partizipativ.

In der Umweltüberwachung und der Landwirtschaftstechnik spielen insbesondere spektrale, hyperspektrale und multimodale bildgebende Verfahren zunehmend bedeutende Rollen (z.B. im Zusammenhang mit der Präzisionslandwirtschaft). Ebenso finden neuartige optische Analyseverfahren und portable Sensorsysteme zur Prüfung der Luft-, Wasser- und Bodenqualität sowie der Tiergesundheit Einzug in diesen Bereichen.

Nationale Highlights

Die Technologie PICs basierend auf integriert-optischen Wellenleitern hat in den vergangenen Jahrzehnten, angetrieben durch die optische Telekommunikation, eine beachtliche Entwicklung vollzogen. Die Erfolge in der Telekommunikation haben zu vielseitigen Bemühungen geführt, diese PICs auch für Anwendungen in der Lebenswissenschaft zu nutzen. Allerdings erfüllen die Konzepte, Materialien und Fertigungsprozesse aus dem Telekommunikationssektor nur bedingt die Anforderungen biophotonischer Anwendungen. Während zum Beispiel für die optische Telekommunikation wenige Wellenlängenbereiche im Nahinfrarot genutzt werden, sind in der **Biophotonik** unterschiedlichste spektrale Bereiche relevant, die vom sichtbaren, über den nahen und mittleren Infrarotbereich, bis hin zur Terahertzstrahlung reichen.

Darüber hinaus ermöglichen innovative Konzepte und photonische Grundkomponenten, die es in dieser Form für Telekommunikationsanwendungen nicht gibt, überhaupt erst viele Anwendungen in der Biophotonik. Für die diversen spezifischen Anwendungen braucht es maßgeschneiderte Lösungen. Dies eröffnet



Abb. 1: Licht ist essenziell für Leben und Entwicklung.

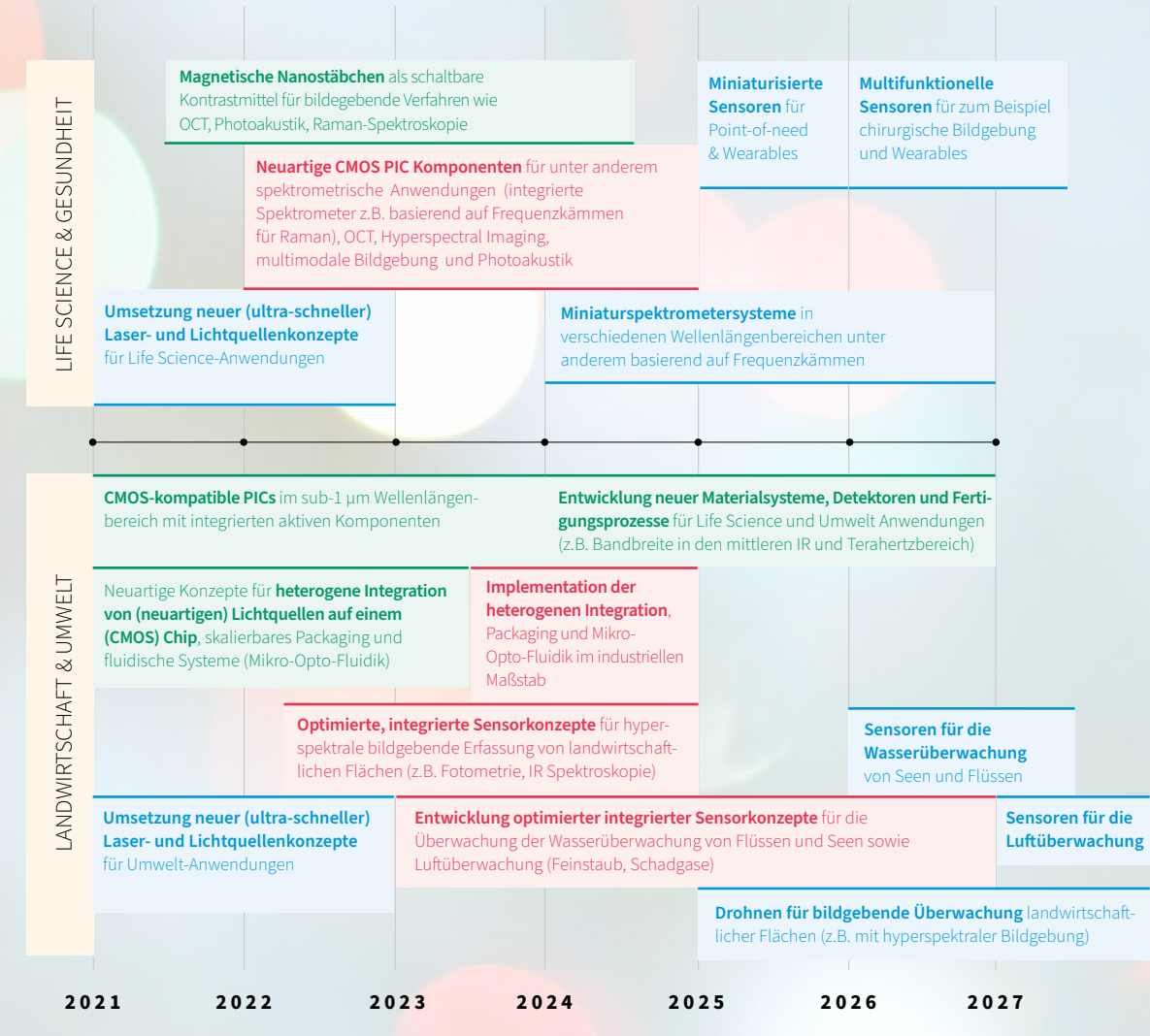
ständen von Molekülen zurückzuführen. Auf der Basis dieser **Licht-Materie Wechselwirkungen** wurde in den Lebenswissenschaften ein reichhaltiger und vielfältiger Werkzeugkasten an Methoden zur Analyse und Beeinflussung biologischer Systeme entwickelt, der ständig erweitert und verbessert wird.

TIMELINE

● zugrundeliegende Technologien und Anwendungen

● Challenges

● bahnbrechende Produkte



GREEN PHOTONICS ASPEKT

Sauberes Trinkwasser ist unser wichtigstes Lebensmittel, dessen Qualität allerdings bereits durch geringste Verunreinigungen (z.B. Mikroplastik, Rückstände diverser Pharmazeutika, Pestizide...) massiv beeinträchtigt wird. In den Wasserkreislauf eingebrachte Problemstoffe verteilen sich meist schnell und ungehindert im gesamten Ökosystem und begünstigen den Biodiversitätsverlust. Photonik ermöglicht ein kontinuierliches, automatisiertes Wasser-Monitoring, inklusive erforderlicher Probenahme- und Sensor-

systeme zur ersten Probenanalyse. Dies erfolgt durch Integration optischer Analysetechnologien wie zum Beispiel Fotometrie, Raman-Spektroskopie oder IR-Spektroskopie (FTIR) in den Probennehmer und die Datenspeicherung oder Kommunikation mittels eines eingebauten Moduls. Auch die Verknüpfung mit einer autonomen Energieversorgung mittels Durchflussgeneratoren und/oder Solarzellen sowie die Auslösung eines Alarms bei kritischen Messresultaten verstärkt in diesem Zusammenhang den Nutzen der Photonik.



auch für die österreichische Photonik F&E Landschaft ungeahnte Möglichkeiten. Ein überaus erfolgreiches Beispiel sind die Aktivitäten österreichischer Firmen und Forschungseinrichtungen im Bereich der integrierten **OCT**. OCT ist ein optisches Bildgebungsverfahren zur **kontaktlosen, tiefenauflösenden Visualisierung diverser Materialien und Gewebe**. In der Medizin hat sich OCT (Seite 11) dank ihrer einzigartigen Möglichkeiten, insbesondere in der Ophthalmologie (Augenheilkunde), als unverzichtbare Diagnosemethode etabliert. Zuvor konnte man nur mittels Funduskamera und viel Erfahrung erahnen, ob sich unter der obersten Netzhautschicht eine Erkrankung entwickelt. OCT liefert Bilder in Echtzeit, vergleichbar mit einer Ultraschalluntersuchung ohne nennenswerte Belastung der zu untersuchenden Person. OCT-Geräte sind zudem hinsichtlich Größe, Komplexität und Anschaffungskosten mit medizinischen Ultraschallgeräten vergleichbar, weshalb sie bisher vornehmlich in Kliniken, aber auch in manchen gut ausgestatteten Arztpraxen eingesetzt werden.

Österreichische Partner haben sich in mehreren Projektkonsortien zusammengefunden, um mit integrierter Optik einen wichtigen Schritt vorwärts in Richtung kompakter, preisgünstiger und robuster ophthalmologischer OCT-Geräte zu gehen.

Dem bereits abgeschlossenen FFG Projekt *COHESION* (2015-2019) kommt hier eine nationale Vorreiterrolle zu. Hier konnte ein ausschließlich österreichisches Konsortium um den international agierenden Halbleiterhersteller *ams* die weltweit ersten „in-vivo“ OCT-Aufnahmen einer menschlichen Netzhaut mit einem Chip-integrierten Spektrometer demonstrieren (Abb. 2). Diese Ergebnisse wurden im renommierten Journal „Light: Science and Applications“ des Nature Verlags veröffentlicht.¹ Das Spektrometer wurde konzeptionell von der *Fachhochschule Vorarlberg* entwickelt und die Messungen wurden vom Zentrum für Medizinische Physik und Biomedizinische Technik der *Medizinischen Universität Wien (MUW)* durchgeführt.

Die Basis dafür wurde in der langjährigen Zusammenarbeit der *ams* mit Experten für integrierte Optik des *AIT Competence Units Molecular Diagnostics* gelegt. Dabei wurden die Fertigungsprozesse und photonischen Grundkomponenten einer Siliziumnitrid-basierten Wellenleiterplattform für ein breites Spektrum sensorischer Anwendungen entwickelt. Die Integration von Wellenleiterkomponenten und optoelektronischen Komponenten, wie zum Beispiel Photodioden und Ausleseelektronik, ermöglicht ein sehr hohes Maß

an Funktionalität auf einem einzigen Chip. Damit profitieren entsprechende Sensorkonzepte von denselben Vorteilen in Bezug auf Kosteneffizienz, Leistungsfähigkeit und Robustheit, die auch beispielsweise Smartphones zum Durchbruch verholfen haben.

In den *EU Horizon 2020* Projekten *OCTCHIP*² und *HandheldOCT*³ wird nun an der nächsten Entwicklungsstufe gearbeitet, die durch die Integration der Optik effizient realisiert werden soll. Dank eines innovativen Konzepts werden dabei mehrere OCT-Einheiten auf einem einzigen Chip integriert. Mit diesem hohen Maß an Parallelität könnten die finalen diagnostischen Geräte bisherige OCT-Systeme in ihrer Leistungsfähigkeit zukünftig übertreffen. Dabei ist das Ziel von *OCTCHIP*, ein kompaktes OCT-Gerät für den Wellenlängenbereich von 850 nm basierend auf der CMOS kompatiblen Wellenleiterplattform der *ams* zu ermöglichen. In *Handheld-OCT* wird ein portables OCT-System für den Wellenlängenbereich von 1060 nm unter Verwendung einer speziellen Wellenleitertechnologieplattform von *imec* entwickelt. Letzteres soll dann so kompakt sein, dass es in jeder Arzttasche Platz finden kann.

Im Fokus

Für die Analyse zukunftsweisender photonischer Technologien in den Bereichen „Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt“ ist es zunächst hilfreich, sich die wichtigsten richtungsweisenden Rahmenbedingungen vor Augen zu halten. Der größer werdende Anteil älterer Bevölkerung in den Industriestaaten, der durch eine steigende Lebenserwartung und geringe Geburtenzahlen verursacht wird, stellt die Gesundheitssysteme in vielen Ländern vor große Herausforderungen. Es gilt die Qualität der gesundheitlichen Versorgung weiterhin auf hohem Niveau zu halten beziehungsweise weiter zu verbessern, und den Menschen ein möglichst langes, gesundes und selbstbestimmtes Leben zu ermöglichen, ohne die Kosten für die Gesundheitsversorgung explodieren zu lassen. In wirtschaftlich schwachen Regionen der Welt bedarf es einer signifikanten Verbesserung der medizinischen Versorgungslage, um die Lebensqualität der Bevölkerung an das Niveau der Industriestaaten heranzuführen.

Gleichzeitig hält das globale Bevölkerungswachstum an. Der ungemindert hohe Ressourcenverbrauch in den Industriestaaten kombiniert mit weltweit steigenden Lebensstandards und der damit gekoppelten Zunahme des globalen pro-Kopf Ressourcenverbrauchs verstärken die Zerstörung der Ökosysteme und der Ökodiversität auf unserem Planeten. Dies wird drastisch durch den „**Erdüberlastungstag**“ (Earth Overshoot Day) vor Augen geführt, jenem berechneten Tag des Kalenderjahres,

an dem der Rohstoffverbrauch durch die Menschen die Kapazität der Erde zur Reproduktion dieser in diesem Jahr übersteigt. Aktuell liegt der Erdüberlastungstag im Juli. Diese Entwicklungen werden durch die globale Klimaveränderung zusätzlich verschärft.

Um mit diesen Entwicklungen bestmöglich umzugehen beziehungsweise ihnen entgegenzuwirken, bedarf es verschiedenster technologischer Hilfsmittel. Photonische Technologien tragen dazu bei, Lösungsansätze für diese Herausforderungen zu finden.

Gesundheit

Die oben beschriebenen Faktoren führen zu einem Wandel des Gesundheitssystems, weg von einer reinen Krankheitsverwaltung und Reparaturmedizin hin zu Gesundheitserhaltung und Vorsorge. Hinzu kommt ein steigendes Gesundheitsbewusstsein in der Bevölkerung. Neue technologische Lösungen werden auf den folgenden vier Ebenen benötigt wobei Photonik in unterschiedlichster Weise zu tragen kommt:

Die **medizinische Forschung (Wissenschaft)** verfügt bereits heute über zahlreiche unverzichtbare optische Instrumente und photonische Methoden zur Erlangung neuer Erkenntnisse, die zu einem verbesserten Verständnis diverser biologischer und biochemischer Prozesse und deren Zusammenhänge mit der menschlichen Gesundheit beitragen. Der optischen Mikroskopie sowie anderen bildgebenden Verfahren zum Sichtbarmachen von relevanten biologischen und biochemischen Abläufen ex-vivo und in-vivo kommen dabei tragende Rollen zu. Für die nächsten Jahre werden Forscher*innen durch die Weiterentwicklung der Analysemethoden, wie etwa multimodale Bildgebung durch Kombination physikalisch unterschiedlicher Messkonzepte (z.B. Raman-Spektroskopie, Fluoreszenz, Infrarotspektroskopie, Multiphotonenmikroskopie) oder verbesserte Verfahren für in-vivo Studien (z.B. photoakustische Bildgebung unter Verwendung neuartiger Kontrastmittel), noch effizientere Werkzeuge für ihre Studien zu Verfügung gestellt. Als Beispiel können hier akusto-optische Detektoren genannt werden, bei denen durch den Einsatz von optisch auslesbaren polymerbasierten Mikroresonatoren eine massive Steigerung in der detektierbaren Frequenz erzielt werden kann.

Bei der **Vermeidung (Prävention)** bedarf es einer starken Partizipation des Einzelnen, um sich gesund zu halten. Dafür kommen Gerätschaften zum Einsatz, die Menschen bei krankheitsvermeidenden Maßnahmen in Bereichen wie „Fitness“, „Lifestyle“, „Well-

being“ und „Activity Monitoring“, sowie „Monitoring des Gesundheitsstatus“ unterstützen. Bislang kommen solche technischen Hilfsmittel zur Selbstüberwachung primär in Form von **Wearables** für das Mitverfolgen („Tracking“) von biophysikalischen Parametern zum Einsatz. Optische Messmethoden können zukünftig dazu beitragen auch biochemische Parameter (Elektrolyte, Metaboliten, Entzündungsmarker, Blutzucker) in Körperflüssigkeiten wie Blut, Urin, Speichel oder interstitieller Flüssigkeit (Gewebsflüssigkeit) zu bestimmen. Hierfür bedarf es kompakter und kostengünstiger photonischer Komponenten, die zum Beispiel spektroskopische Analysen im Nah- und Mittelinfrarot oder fluoreszenzbasierte Detektion durchführen können.

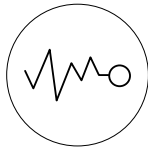
Zur Prävention zählt auch die Hygiene. Hierbei ist zu erwarten, dass aufgrund des durch COVID-19 gestiegenen Problembewusstseins die Nachfrage nach verbesserten oder neuartigen Komponenten und Gerätschaften zur UV-C Desinfektion steigen wird. Neben Viren sind es vor allem multiresistente Krankenhauskeime, die es abzutöten gilt.

Für das **Erkennen (Diagnose)** werden verbesserte Methoden und Geräte sowohl zur möglichst frühzeitigen Erkennung von Erkrankungen als auch für die Therapiebegleitung und Überwachung nach Behandlungsmaßnahmen entwickelt, wobei die dezentrale, patientennahe Diagnostik zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Bei der **medizinischen Diagnostik** waren optische Methoden immer schon von großer Bedeutung. Molekulardiagnostische Verfahren basieren vorrangig auf Fluoreszenz und Chemolumineszenz.

In der Augenheilkunde hat in den vergangenen Jahren die optische Kohärenztomographie¹ (Seite 11) als nicht-invasives Verfahren zu einer signifikanten Verbesserung in der Früherkennung von retinalen Krankheiten geführt. Auch in der Dermatologie und der Zahnheilkunde hat die optische Kohärenztomographie erfolgreich Einzug gefunden. Endoskope gestatten einen Blick in das Innere des Körpers. Die Mikroskopie von Biopsieproben stellt die Entscheidungsgrundlage für operative Eingriffe in der Krebsbehandlung dar.

Ein wesentlicher Faktor in der Technologieentwicklung ist der fortschreitende Trend der **Dezentralisierung des Gesundheitssystems**. Daraus ergibt sich ein hoher Bedarf an miniaturisierten Messsystemen für die patientennahe Diagnostik. Als Konsequenz der international herausfordernden Situation während der COVID-19 Pandemie ist zu erwarten, dass in Bereichen, die zur Bewältigung von Pan-



demien beitragen können, ein kontinuierliches Wachstum beschieden sein wird, wobei die Verbesserung oder Neuentwicklung von Methoden für molekularbiologische Analyse- und genetische Sequenzierungsverfahren, für die Antikörperdetektion sowie die Virenerkennung im Vordergrund stehen.

Auch bei der **Behandlung und beim Heilen (Operation & Therapie)** sind weitere Fortschritte bei Photonik basierten technischen Hilfsmitteln und Methoden zu erwarten. Lichttherapeutische Methoden gewinnen hierbei zunehmend an Interesse. Behandlungs- und Operationsmethoden können durch die Weiterentwicklung von Laserlichtquellen und miniaturisierten Sensorsystemen für die intraoperative Überwachung und Diagnostik maßgeblich an Präzision gewinnen. Neue Substanzen für die photodynamische Therapie werden ebenfalls zu einem verbesserten Behandlungserfolg beitragen.

Umweltschutz

Klima- und Umweltschutz zählen zu den allergrößten Herausforderungen der Menschheit und mobilisieren weltweite Anstrengungen hinsichtlich Dekarbonisierung und Erreichung der Ziele zur Klimaneutralität, Erhalt von Biodiversität und natürlichen Lebensräumen, Reduktion der Einbringung von Schadstoffen und Müll in die Umwelt sowie eines effizienten Einsatzes von Rohstoffen und Energie in einer Kreislaufwirtschaft. Photonische Technologien tragen dazu bei, Lösungsansätze für diese Herausforderungen zu finden.

Insbesondere in der **Umweltüberwachung** werden primär photonische Messmethoden zur Prüfung von Luft, Wasser oder Boden eingesetzt. Technologische Entwicklungen gehen in diesem Bereich zum einen in die Richtung der Detektion und Quantifizierung von Substanzen mit immer niedrigeren Nachweiswerten.

Zum anderen bedarf es kompakterer und kostengünstiger Messsysteme, um ein dichteres Messpunktenetz von stationär oder mobil einsetzbaren Messeinheiten zu ermöglichen, das dank der voranschreitenden IoT Vernetzung die Entwicklung von KI-unterstützten Frühwarnsystemen und weiteren Dienstleistungen für die feinmaschige Umweltüberwachung erlauben wird. In der Luftüberwachung werden Feinstaubpartikel und Schadgase kontinuierlich vermessen und über vernetzte Datenbanken bereitgestellt. Überwacht werden schwerpunktmäßig dicht befahrene Verkehrsadern und urbane Knotenpunkte oder Mülldeponien.

In ähnlicher Form werden im Bereich **Wasserqualität und Gewässerschutz** Flüsse, Seen, das Grundwasser sowie die Abwasserentsorgung und -reinigung kontinuierlich mit verschiedensten Messsystemen überwacht, wobei optische Analysemethoden wie Fotometrie, Raman-Spektroskopie oder Infrarotspektroskopie zum Einsatz kommen. Hier geht die Entwicklung unter anderem in Richtung Erfassung geringster Verunreinigungen wie Pestizide, mikrobiologische Verunreinigungen, Rückstände diverser Pharmazeutika oder Mikroplastik.

Optische Analysemethoden finden auch bei der Entwicklung umweltfreundlicher Fahrzeugtechnologien Einsatz. Für den **Betrieb von Brennstoffzellenfahrzeugen** wird Wasserstoff in einem Tank mitgeführt, während der notwendige Sauerstoff der Umgebungsluft entnommen wird. Kontaminationen der Umgebungsluft durch Abgase herkömmlicher Verbrennungsmotoren können dabei zu einer Vergiftung der Kathode und somit zu einer deutlichen Verringerung der Lebensdauer des Brennstoffzellensystems führen. Das im Rahmen des FFG Programms „*Mobilität der Zukunft*“ geförderte Forschungsprojekt *B.GASUS* („*Brennstoffzellen GAS-UntersuchungsSystem*“, Laufzeit von 2021 bis 2023) befasst sich unter der Projektleitung der *Virtual Vehicle Research* mit dem Einfluss von Umweltschadstoffen auf Brennstoffzellenkathoden im realen Fahrbetrieb und liefert dadurch einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung künftiger Mobilitätssysteme. Angewandt werden vorrangig optische Spektroskopiemessverfahren, deren Ergebnisse in die Erstellung von Simulationsmodellen zur Schädigungsprävention von Brennstoffzellensystemen einfließen.

Land- und Forstwirtschaft

Im Bereich Land- und Forstwirtschaft finden umfangreiche Entwicklungen zur Überwachung von Feldern und Wäldern statt. Ermöglicht wird dies einerseits durch die technischen Fortschritte bei unbemannten Luftfahrzeugen (Seite 41) in Richtung Miniaturisierung und Flugautonomie, die das systematische Abtasten großer Flächen erst möglich machen, und andererseits durch verbesserte,

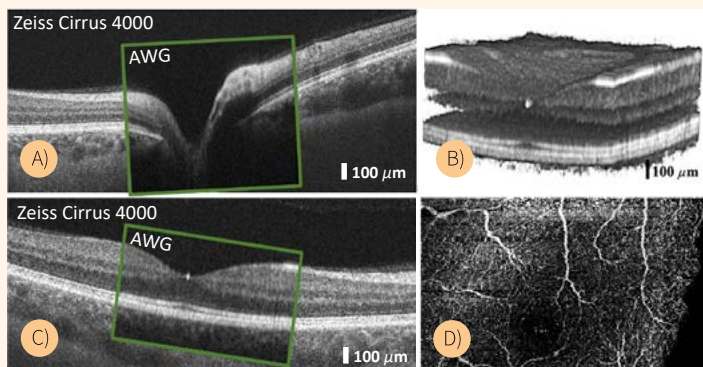


Abb. 2: PIC basierte OCT Bilder einer menschlichen Netzhaut | A) und C): Vergleich der OCT Tomogramme (rechteckiger Ausschnitt) mit jenen eines kommerziellen Geräts | B): 3D OCT Tomogramm der Sehgrube | D): OCT-Angiografie Bild des Mikrogefäßsystems

kompakte photonische Messsysteme, zum Beispiel für die hyperspektrale bildgebende Erfassung von landwirtschaftlichen Flächen mit hoher räumlicher Auflösung. Wälder spielen eine zentrale Rolle bei der Erhaltung des ökologischen Gleichgewichts der Erde, nicht zuletzt wegen ihrer Eigenschaft als Kohlenstoffsenke. Auf der anderen Seite setzen Wald-, Torfmoor, Busch- und Steppenbrän-

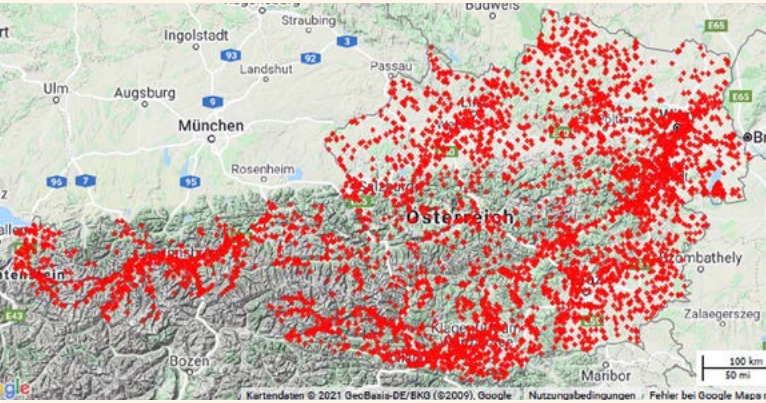


Abb. 3: Systeme und Verfahren zur Erkennung von Waldbränden basieren heute weitestgehend auf photonischen Technologien. ⁴

de weltweit mehr CO₂ in die Atmosphäre frei als der gesamte Sektor Verkehr. Entsprechend wichtig sind Systeme und Verfahren zur Erkennung derartiger Brände, die heute nahezu ausschließlich auf photonischen Technologien basieren (Abb. 3). Satellitengestützte Kameras im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich können helfen, Waldbrände auf der gesamten Erdoberfläche effizient zu überwachen, Schäden zu bewerten und Daten für Vorhersagemodelle zu liefern. Zur Früherkennung eignen sich diese Systeme aber eher bedingt, da ein Satellit nur alle zwei bis fünf Tage über eine Region fliegt. Automatische Systeme auf Wachtürmen oder durch autonome Luftfahrzeuge wie zum Beispiel CAMCOPTER der Wiener Firma Schiebel, die eine Kombination aus LiDAR, Hyperspectral- und High-Definition Kamera einsetzen,⁵ sind in dieser Hinsicht effizienter.

Hyperspektrale bildgebende Technologien finden zunehmend auch in der Präzisionslandwirtschaft Anwendung für die Erhöhung der Erträge bei gleichzeitiger Vermeidung von Überdüngung und Reduktion von Pestizid- und Herbizideinsatz. Kleinere Drohnen sind nun fähig solche Systeme in geeignete Überwachungshöhen zu bringen. Die digitale Verarbeitung der hyperspektralen Daten in Echtzeit erfolgt auf immer leistungsfähigeren Prozessoren mit Software wie zum Beispiel der neuesten Entwicklung der Grazer Firma PerceptionPark.⁶

Ernährung

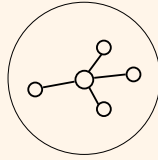
Das Konzept „From Farm to Fork“ steht für ein gesünderes und nachhaltigeres EU-Lebensmittelsystem und ist ein Eckpfeiler des europäischen Green Deals für ökologische Nachhaltigkeit sowie Lebensmittel- und Futtermittelsicherheit.

In der industriellen Lebensmittelproduktion ermöglichen photonische Sensoren immer bessere Sortiertechniken, nicht nur zur Auftrennung von gut und schlecht, sondern zur Klassifizierung in mehrere Güteabstufungen. Als Beispiel ermitteln die Kartoffelsortierer der steirischen Firma Insort, ausgerüstet mit hyperspektralen Nahinfrarotzeitkameras der Grazer Firma EVK, in jeder gescannten Kartoffel die Konzentrationsunterschiede von Stärke und Zucker zu Wasser, die über die weitere Verwendung dieses Lebensmittelprodukts bestimmen. Neben den Forschungsschwerpunkten Life-Science, Ackerbau- und Lebensmittel an der Universität für Bodenkultur besteht seit 2017 auch das Forschungszentrum für „Feed and Food Quality, Safety and Innovation“ (FFoQSI). In diesem COMET-Zentrum sind Forschungsexpertisen verschiedener Partner über eine Vielzahl von Themen gebündelt. Unter anderem wird photonischen Technologien, insbesondere der Spektroskopie und der hyperspektralen Bildgebung, ein großer Stellenwert eingeräumt. Diese Technologien haben Anwendungspotential zum Beispiel in der Beobachtung und Bewertung von Grünflächen oder Ackerflächen, für die Beurteilung landwirtschaftlicher Produkte vor oder nach der Ernte, für die Lebensmittelsicherheit relevante Überwachung von Reinigung oder Verschmutzungen in Produktionsbereichen sowie für Qualitätskontrolle und Prozessoptimierung in der Produktion.

Mit der Firma Anton Paar verfügt Österreich auch über einen weltweit gefragten Anbieter für kompakte Analysensysteme, wie zum Beispiel Raman-Spektrometer, Fourier Transform Spektrometer, oder Refraktometer. Neben dem seit langem etablierten Anwendungsbe- reich in der herkömmlichen Laboranalytik dringt die Spektroskopie auch immer mehr in den direkten Produktionsalltag vor: beispielsweise in Form von tragbaren Handgeräten (Trends: low-cost, Miniaturisierung) als auch auf Roboterfahrzeugen und autonom agierenden Drohnen für Felder oder integriert in Ernte- oder Verarbeitungsmaschinen. ●

Quellen:

¹ Elisabeth A. Rank, Ryan Sentosa, Danielle J. Harper, Matthias Salas, Anna Gaugutz, Dana Seyringer, Stefan Nevlacsil, Alejandro Maese-Novo, Moritz Eggeling, Paul Mueller, Rainer Hainberger, Martin Sagmeister, Jochen Kraft, Rainer A. Leitgeb, and Wolfgang Drexler, „Toward optical coherence tomography on a chip: in vivo three-dimensional human retinal imaging using photonic integrated circuit-based arrayed waveguide gratings,” *Light Sci Appl* 10, 6 (2021): <https://doi.org/10.1038/s41377-020-00450-0> | ² Leitung: MUW; Partner: AIT, ams AG, Exalos GmbH, Fraunhofer IIS, Tyndall Institute, Carl Zeiss AG; 2016/01-2021/03 | ³ Leitung: MUW; Partner: imec, AIT, Innolum, Nanoscribe, Tyndall Institute, Carl Zeiss AG; 2020/01-2023/12 | ⁴ <https://fire.boku.ac.at/firedb/de/> | ⁵ <https://www.schiebel.net/wp-content/uploads/downloadBrochures/CAMCOP-TER%20S-100%20Fact%20Sheet%20-%20Geophysical%20Survey/index.php> | ⁶ <https://www.perception-park.com/>



Informationssysteme und Kommunikationstechnologien

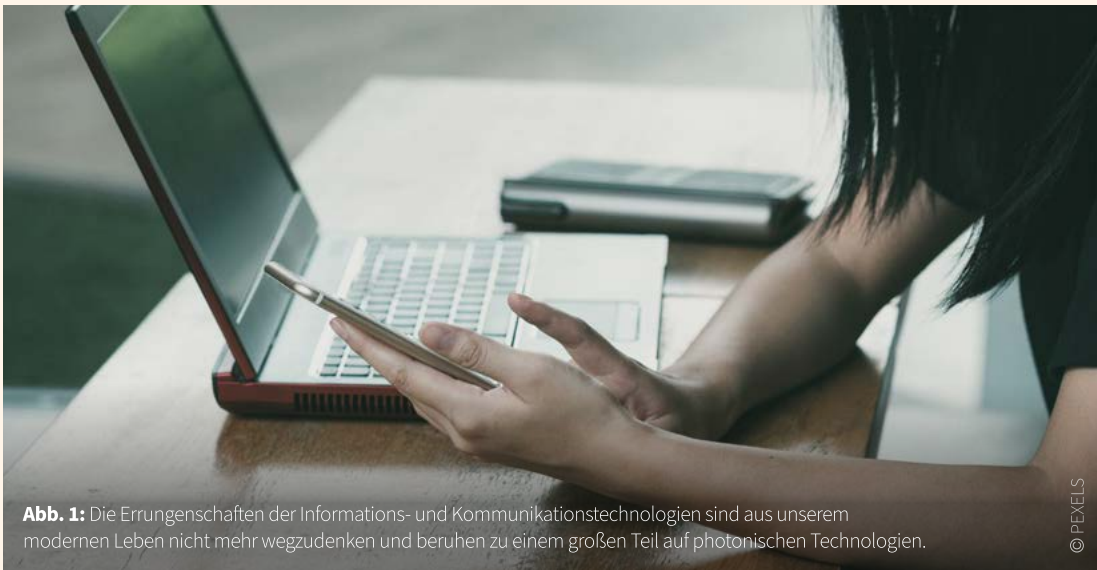


Abb. 1: Die Errungenschaften der Informations- und Kommunikationstechnologien sind aus unserem modernen Leben nicht mehr wegzudenken und beruhen zu einem großen Teil auf photonischen Technologien.

© PEXELS

27

Seit Graham Bell das Telefon einführte, hat sich die IKT mit einer atemberaubenden Geschwindigkeit zu einer alle Lebensbereiche durchdringenden Technologie entwickelt. Der Fortschritt der Mikroelektronik ermöglicht es heute, bis zu 10 Milliarden Transistoren auf einem Mikroprozessor für eine Rechenleistung von bis zu 100 GFlops/s auf der Größe eines Fingernagels zu realisieren. Obwohl beeindruckend, stoßen die Möglichkeiten der Elektronik an ihre Leistungsgrenzen, was die **Skalierbarkeit von Bandbreite unter gleichzeitiger Einhaltung der Energieeffizienz** betrifft: Die Rechenleistung und Datengenerierung wachsen derzeit mit einer jährlichen Rate von 60%, was in den nächsten 10 Jahren circa eine Verhundertfachung des Datenvolumens bedeutet.¹ Dieser Daten-Tsunami erreicht im Jahr 2025 ein Volumen von 175 Zettabyte,² und geht mit einem nicht zu vernachlässigenden Energieaufwand einher.

Die **Photonik** ermöglicht die Übertragung von Information auf optischem Weg und liefert gleich mehrere Rekorde: **Optische Telekommunikationsnetze** als Grundlage des Internets bieten Kapazitäten von bis zu 10 Pb/s (=10.000.000.000 Mb/s) pro Glasfaser,³ die so dünn wie ein menschliches Haar ist. Sie verbinden dabei ganze

Kontinente über Distanzen von mehr als 14.000 km,⁴ und spüren nebenbei Erdbeben auf.⁵ 95% der übertragenen Information wird heutzutage über optische Netze transportiert,⁶ die bis in den Antennenmast von Mobilfunknetzen reichen. Ein weiterer Rekord wird in Bezug auf die Energieeffizienz erreicht (Green Photonics Aspekt), welche den Energieverbrauch der heutigen Cloud-Infrastruktur verringert. In den zugrundeliegenden **Datenzentren** erfolgt seit einigen Jahren die sukzessive Migration von elektronischer Datenübertragung zwischen Racks, Leiterplatten und – in naher Zukunft ebenso – zwischen Prozessorelementen auf photonische Systeme.

Photonische IKT ist auch in vielen weiteren Anwendungen zu finden, wie etwa der Verkehrsinfrastruktur, in industriellen Fertigungsanlagen, beim High-Performance Computing bis in den Endnutzerbereich. Die Bereitstellung einer modernen IKT-Infrastruktur ist unerlässlich für eine Fülle von IT-Anwendungen mit hohen Anforderungen an Bandbreite, geringe Latenzzeit und Cloud-basierte, das heißt zentralisierte Datenverarbeitung.

Nationale Highlights

Monolithisch integrierte Silizium-Optoelektronik

Die Photonik vermag Information mit hoher Bandbreite bei geringem Leistungsbedarf zu übertragen. Die Elektronik hingegen ermöglicht die Verarbeitung von Information. Ein höchsteffizientes Zusammenspiel von Transmission und Transformation von Information benötigt daher eine hocheffiziente Schnittstelle zwischen Photonik und Elektronik. Zudem soll deren nahtloser Übergang etablierten Fertigungsprozessen genügen. Ein repräsentatives Beispiel aus dem Bereich monolithisch integrierter Silizium-Optoelektronik liefert eine Initiative von *ams*, dem *AIT Austrian Institute of Technology*, der *TU Wien* und *Intel Austria*:

Durch den Einsatz von Silizium-basierter Halbleiterfertigung wurden auf Wafer-Ebene Hochfrequenz-Mikroelektronik für bis zu 10 GHz Bandbreite sowie opto-elektronische Signalkonverter und passive optische Funktionen als PICs realisiert. Beide Welten wurden durch drei-dimensionale Stapelung miteinander zu einem einzigen Wafer verschmolzen, um auf wenig Chipfläche, mit hoher Energieeffizienz, aggregierte Datenraten von bis zu 80 Gbit/s pro Datenübertragungskanal zu ermöglichen.

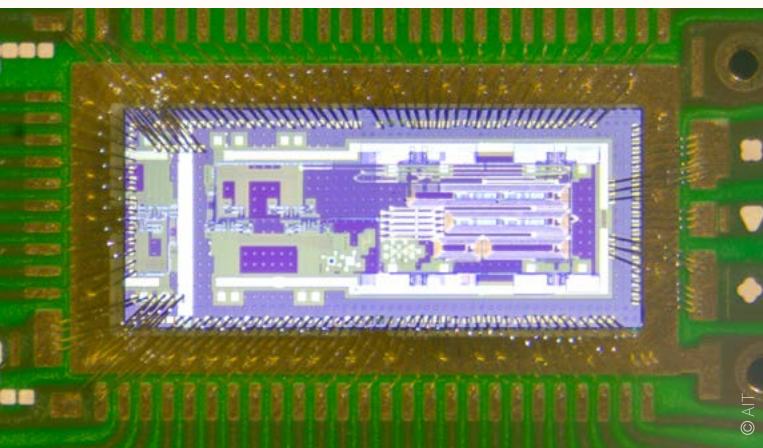


Abb. 2: Durch drei-dimensionale Stapelung miteinander zu einem einzigen Wafer vereinte Silizium-Optoelektronik ermöglicht hohe Effizienz auf kleinstem Raum.

Data Matrix on Ceramics

Die Photonik liefert einen weiteren wichtigen Beitrag für ruhende Informationen. Das österreichische Start-Up *Ceramic Data Solutions* arbeitet gegenwärtig gemeinsam mit der *TU Wien*, der *Universität Wien*, *RECENDT* in Linz und dem *AIT Austrian Institute of Technology* an den Grundlagen einer neuartigen optischen Datenspeichertechnologie basierend auf keramischen Beschichtungen auf Saphirglas-Wafern. Die sehr harten, temperaturbeständigen Beschichtungen und Substrate werden dabei mit Femtosekunden-Lasern gezielt im Nanometerbereich abgetragen und auf diese Weise werden Daten für extrem

lange Zeiträume gespeichert. Mehrlagige Beschichtungssysteme lassen eine Speicherdichte von bis zu 1 TB pro 100 cm² erwarten. Die Schreibgeschwindigkeiten von bis zu 1 GB/s sollen mittels ultraschnellen Digital Micromirror Devices erreicht werden. Der geschätzte Energieverbrauch pro geschriebenem oder gelesenen Bit soll unter 1 nJ liegen. Der Energieverbrauch für die Langzeitspeicherung ist vernachlässigbar, da die keramischen Speichermedien keinerlei Klimatisierung bedürfen.

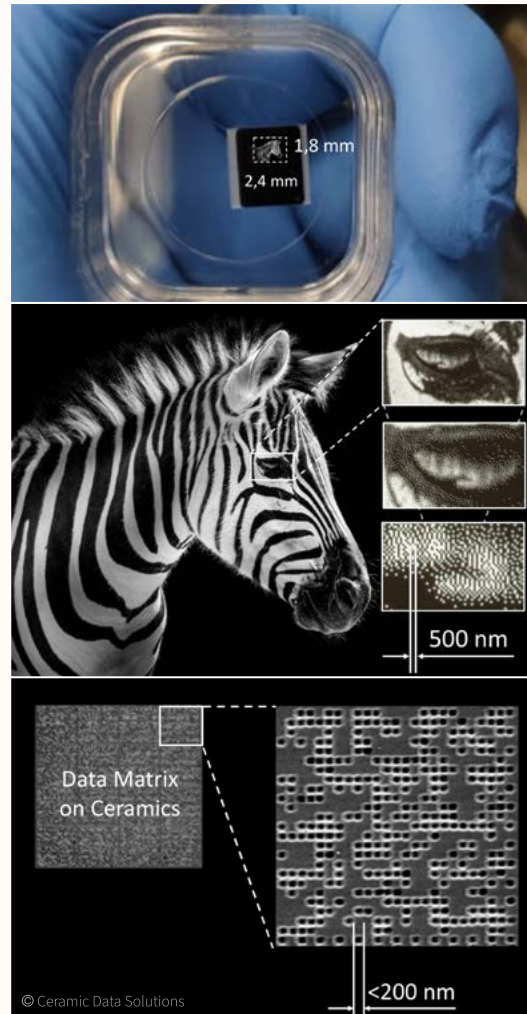
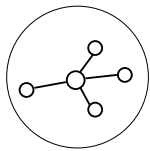


Abb. 3: Eine neuartige optische Datenspeichertechnologie basierend auf keramischen Beschichtungen auf Saphirglas-Wafern hilft, den Energieverbrauch für Langzeitspeicherung zu reduzieren.

Im Fokus

Forschungsaktivitäten im Bereich der photonischen IKT werden in den nächsten Jahren die Entwicklung von Komponenten und Systemen für heterogenste optische Netze (Industrie, Telekommunikation, Datenzentrum, Heimbereich, Weltraum), neue Ansätze für die Verarbeitung gewaltiger Datenströme (Hardware für KI, High-Performance Computing) sowie die robuste Speicherung von Daten behandeln. Diese Herausforderungen werden



von einer kontinuierlichen und systematischen Technologieentwicklung im Bereich der PICs unterstützt.

Datenkommunikation: Performance bei gleichzeitiger Energieeffizienz – zwischen Prozessorkernen oder Kontinent übergreifend

Die digitale Transformation des 21. Jahrhunderts geht mit einer Datenflut einher, welche nur mit entsprechend leistungsfähigen physischen Kommunikationskanälen bewältigt werden kann. Bereits heute werden fast alle Bits auf optischem Weg übertragen. Optische Kommunikationskanäle beschränken sich jedoch nicht nur auf traditionelle Internetverbindungen, die durch faseroptische Netze oft bereits bis in den Heimbereich gestützt werden. Sie spannen, was die Übertragungsdistanz betrifft, über zehn Größenordnungen von On-Chip Kommunikation zwischen Prozessor- und Speicherkernen in Supercomputern und optischen Wellenleitern auf Leiterplatten und Backplanes in Datenzentren, über lichtbasierte Funktechnologie im Innenbereich, Fiber-to-the-X und die Anbindung von Antennenanlagen von Mobilfunknetzen, bis zu urbanen, ruralen, länderumspannenden und interkontinentalen Kommunikationsnetzen. Die durch optische Kommunikation getragene Digitalisierung bewirkt nicht nur die Schaffung von Arbeitsplätzen, sondern erhöht ebenso die Innovationsfähigkeit eines Landes: Steigt der Digitalisierungsgrad um 10%, so verringert sich die Arbeitslosenrate im Durchschnitt um 0.84% beziehungsweise steigt das Ranking im globalen Innovationsindex um 6%.⁷

In Telekommunikationsnetzen spielt die Bereitstellung von Bandbreite eine entscheidende Rolle, um neue Anwendungen zu etablieren. Vor allem durch COVID-19 wurde die Notwendigkeit eines entsprechenden Bandbreitenangebots deutlich: Der um circa 40% gestiegenen Bandbreitenbedarf zur Bewältigung täglicher beruflicher und privater Aktivitäten,⁸ entspricht einer Beschleunigung der Bedarfssteigerung um circa 3-4 Jahre.⁹ Oft unscheinbar, bilden optische Netze das Rückgrat moderner **Access- und Mobilfunknetze**, welche neue Services wie etwa Virtual Reality unterstützen und empfangene Funksignale als digitale Signale per optischem Transport einem Datenzentrum übermitteln. Im Gegenzug werden durch gezielte optische Anspeisung erhaltene Signale von Antennenstationen ausgesendet. Speziell die ab 5G vorgesehenen größeren Signalbandbreiten unterstreichen die Bedeutung eines solchen optischen „Fronthauls“, welches in Zukunft mit optischen leitungsgebundenen Technologien aus dem Access-Bereich verschmelzen wird. Für

diese nächste Generation von Access (NGOA) wird ein disruptiver Ansatz für passiv-optische Zugangsnetze erwartet, etwa durch die Etablierung von kohärenter statt direkter Signaldetektion, wie sie in klassischen Funknetzen seit vielen Jahrzehnten im Einsatz ist. Für 6G werden Frequenzen von mehr als 100 GHz – bis in den Terahertz Bereich – erwartet, was ebenso einen Technologiesprung in Bezug auf opto-elektronische Komponenten (z.B. Empfänger, Beamformer) aber auch neue Konzepte mit sich zieht. Die Einbindung von Ressourcen der Verkehrsinfrastruktur (z.B. Beleuchtung) wird eine wichtige Rolle spielen. Die optische Technologie wird sich nicht ausschließlich auf leitungsgebundene Kommunikation beschränken, sondern integriert ebenso Konzepte des breitbandigen optischen Funks (Light Fidelity (LiFi)). LiFi bietet ebenso die Möglichkeit, hohe Datenraten im 10-GHz Bereich für mobile Endgeräte im Office- und Consumer-Bereich bereitzustellen, bei gleichzeitig interferenzfreier und räumlich begrenzter Kommunikation. Das erlaubt gegenüber dem vergleichsweise schmalbandigem WiFi einen Transfer von großen Datensätzen mit geringster Dauer und Latenz, und somit die Anbindung an private oder öffentliche Cloud-Dienste.

In Industrieanlagen ist das **„industrielle Internet“** durch die Automatisierung der Fertigung, kollaborative Roboterschwärme sowie den Telesbetrieb, beruhend auf videobasierter Fernsteuerung in Echtzeit, ein gewichtiger Treiber für innovative Lösungen. Eine zentrale Rolle spielt hierbei eine Kommunikationstechnologie, welche robust gegenüber elektro-magnetischer Interferenz ist und einen hohen Datendurchsatz (Tb/s) bei deterministischer Latenz (ms) aufweist.

Informationsfabriken hingegen erfordern die Integration von optischer Kommunikationstechnologie in kleineren Maßstäben. Der Verkehr in **Datenzentren** ist besonders kritisch, da jedes Bit auf Langstreckennetzen etwa 100 Bits an Verkehr in diesen neuralgischen Punkten der modernen Cloud-Infrastruktur bewirkt. Somit ist auch die größte Menge an Daten (circa 75%) in diesen Informationsfabriken gebündelt.

Zu Beginn des Jahres 2020 gab es bereits 510 dieser „Hyperscale“ Datenzentren,¹⁰ welche mehr als 5000 Server beherbergen. Optische Kommunikation zwischen Serverracks, Leiterplatten, Prozessoren und deren Kernen, ist hier ausschlaggebend, um den Energiebedarf des Informationsaustausches zwischen den einzelnen Datenverarbeitungseinheiten drastisch zu reduzieren. In diesem Bereich sind vor allem effiziente optoelektronische Transceiver und deren Integration

in Zusammenhang mit Wellenleitern, unter anderem integriert in Leiterplatten, gefragt.

Optische Kommunikation ist nicht nur auf terrestrische Netze und Datenzentren beschränkt. Ebenso spielt die **Photonik am Himmel** eine immer wichtigere Rolle: Eine nahtlose Abdeckung beziehungsweise eine Sicherstellung der Anbindung mit neuen Services bedingt eine teilweise Verlagerung der IKT Infrastruktur in den Himmel. High-Altitude Platforms sowie drohnen-gestützte Systeme werden für ländliche sowie auch urbane Gebiete nicht nur Breitband-Zugang, sondern ebenso Quantenkommunikation gewährleisten. Diese „photonische Luft“ wird ebenso von Satelliten gestützt, wobei erste Demonstratoren eines orbitalen Satelliten-netzes und Erde-zu-Satellit Verbindungen mit Tb/s Kapazitäten bereits in Vorbereitung sind.¹¹ Photonik trägt hier ebenso zu Funktechnologien bei, indem breitbandige analoge Funkmodule in Satelliten, welche schwer zu realisieren sind, durch photonische Funktionen abgelöst werden. Technologische Herausforderungen sind die Vereinfachung von optischen Antennensystemen, welche im Vergleich zur Hochfrequenz-Technik eine viel genauere Ausrichtung benötigen, sowie die Realisierung von optischem Beamforming – ähnlich wie sie in traditionellen Radarsystemen und in 5G Millimeter-Wellen Funktechnologien zum Einsatz kommen. Die optische IKT beflügelt ebenso den Bereich der Sensorik und Quantentechnologien durch **technologische Synergien**. Die Verschmelzung von Sensor- und Kommunikationstechnologie findet sich etwa im Zusammenhang mit LiDAR in der vernetzten Mobilität wieder. Die Einbindung von Energy Harvesting kann zudem neue, energieautarke Anwendungen ermöglichen. Methoden der optischen Telekommunikation bilden ebenso die Grundlage zahlreicher Systeme aus dem Bereich der Quantenkommunikation.

Datenprozessierung: Die Konvergenz von Optik und Informationstechnologie

Eine große Herausforderung mit hohem Verwertungspotential besteht im Bereich der optischen Computer und **optischen neuronalen Netzen**. Während es gegenwärtig zu einer Migration der Kommunikationsschnittstellen weg von elektrischen und hin zu optischen Technologien kommt, findet die Verarbeitung der Daten selbst auf rein elektronischer Ebene statt. Dies führt aufgrund des geringen Durchsatzes der von-Neumann Architektur zu einem Flaschenhals in der Verarbeitung, sowie zu einem exzessiven Energieverbrauch. So benötigt eine Rechenoperation zum Multiplizieren und Addieren heute einen Energieaufwand von 100 Picojoule. Hingegen das menschliche Gehirn – ein Meisterwerk

der Datenverarbeitung und ein Prozessor, welcher nicht nur auf physischer Ebene unterschiedlich ist, sondern auch eine andere Architektur aufweist – meistert dies im Sub-Attojoule Bereich, also acht Zehnerpotenzen effizienter. Der Wunsch nach bio-inspirierten, neuronalen Schaltungen, in denen die natürlichen Verarbeitungsprozesse des Gehirns abgebildet werden, ist daher mehr als berechtigt. Photonik bietet hier vor allem eine skalierbare Lösung: Das menschliche Gehirn baut auf circa 10^{11} Neuronen mit je circa 10^4 Synapsen. Diese große Zahl an Verbindungen zwischen den Knoten des Netzwerks lässt sich auf elektronischer Ebene nur schwer bis gar nicht adressieren, wogegen die Photonik hierfür auf zusätzliche Multiplexingdimensionen, wie etwa die optische Frequenz, zurückgreifen kann. Zudem bietet sie eine höhere Informationsdichte für die zeitliche Kodierung der neuronalen Aktionspotenziale. Dadurch werden zeitkritische Anwendungen wie etwa die Mustererkennung mit geringer Latenz ermöglicht. Optische neurale Netze sollten hierfür rekonfigurierbar und programmierbar gestaltet sein, um somit lernfähig zu sein und sich den Anwendungsparametern optimal anpassen zu können. Optische neurale Netze werden zukünftig eine leistungsfähige und energieeffiziente **Hardware für KI** beziehungsweise **Co-Prozessoren für High-Performance Computing** beisteuern.

Datenspeicherung:

Hohe Dichte und Langlebigkeit

Eine weitere Anforderung der IKT ist die Speicherung von Daten für kurze, aber auch lange Zeitspannen. Die Effizienz der Datenspeicherung in Bezug auf Ressourcenaufwand und Energiebedarf hängt da-

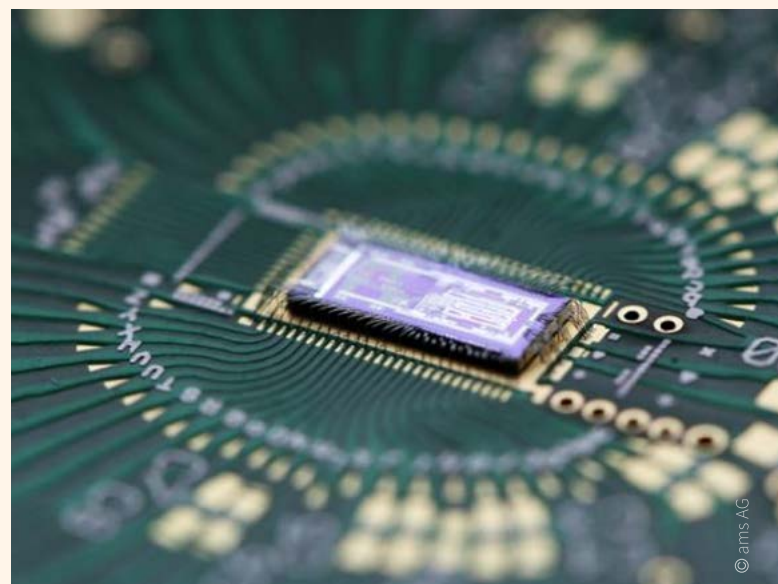
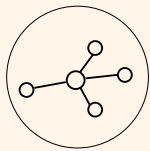


Abb. 4: Integration photonischer Schaltungen eines opto-elektronischen Signalkonverters auf Wafer-Ebene mit einer Silizium-basierten Mikroelektronik.



bei sehr stark von den gewählten Speichermedien ab. Derzeit werden in Datenzentren Medien mit kurzen Lebenszyklen von typischerweise 3-5 Jahren eingesetzt, wie etwa Solid-State Laufwerke für schnelllebige Datenströme, Harddisk-Laufwerke (HDD), oder Bandlaufwerke für längerfristige Speicherung. Diese Laufwerkstypen sind fragil, haben einen hohen Energiebedarf und benötigen eine permanente Migration der gespeicherten Daten – wobei diese Migration nicht ressourcenschonend ausgeführt werden kann. Photonische Speichertechnologien wie etwa keramische Datenspeicher bieten hier eine attraktive Alternative für große Datenarchive. Sie kombinieren das Knowhow von optischen Speichermedien (Digital Versatile Disc (DVD)) in Bezug auf optische Schreib- und Lesegeräte für Datenpixel im Nanometerbereich und erreichen so eine hohe Speicherdichte von bis zu 1 TB pro 100 cm². Durch die Verwendung von keramischen Substraten beziehungsweise dünnen Keramikschrichten können Daten über einen extrem langen Zeitraum (100.000 Jahre) bei niedrigstem Energieaufwand und Kosten gespeichert werden. Bei Schreibraten im Gb/s Bereich und einem Energieaufwand von circa 1 nJ/bit, entspricht das einer Energiereduktion von 99% gegenüber Hard Disk Drives (HDDs). Zudem sind derartige Datenspeicher robust gegenüber Temperaturschwankungen (bis zu 1200°C) und äußeren Einflüssen wie etwa Chemikalien oder Strahlung.

Photonische Integrierte Schaltungen: der IKT entsprungen, der IKT den Weg zu ebnen

Die beeindruckenden Errungenschaften der IKT in den letzten Jahrzehnten sind vor allem dem raschen Fortschritt der elektronischen Schaltungsintegration und der damit verbundenen Skalierbarkeit bei gleichzeitiger Reproduzierbarkeit und Robustheit zu verdanken. Ähn-

lich dazu werden die Durchbrüche in den meisten der genannten IKT-Themengebieten von Innovations-sprüngen auf dem Gebiet der photonischen Integrationstechnologie begleitet sein beziehungsweise erst durch diese ermöglicht. Die Realisierung von Schaltungen mit entsprechender Funktionsdichte und Reproduzierbarkeit ist das Rückgrat sämtlicher heutiger Rekorde im Bereich der photonischen IKT.

Die **monolithische Realisierung von Hochfrequenz- und optischen Funktionen durch 3D Integration**, welche in einem hybriden Ansatz durch optische Quellen ergänzt werden, ist beispielsweise zentrales Thema bei Breitbandanwendungen. Heterogene Integration von zugeschnittenen Lösungen in einem System-on-Chip, zum Beispiel auf 2.5D Integration aufbauend, wird ebenso für 6G Anwendungen von großer Bedeutung sein. In Zusammenhang mit neuen Materialsystemen, welche nicht mit der klassischen, silizium-orientierten Fertigung kompatibel sind, ist die hybride Integration unerlässlich.

Die Erfahrungen aus der Mikroelektronik zeigen, dass der Massenmarkt erst durch die Integration auf dem Chip und den damit verbundenen Kostenverfall angesprochen werden kann. Im Vergleich zu mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) zeichnen sich photonische integrierte Schaltungen (PIC)s durch höhere Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen wie Vibrationen, Feuchtigkeit oder Temperaturschwankungen aus, und können mit weniger Ausschuss produziert werden. PICs gehen aus dem Gebiet der optischen Telekommunikation hervor. Die IKT ist von jeher die dominierende Anwendung, mit einem Anteil von 39% am PIC Markt.¹² Während Elektronen in der Mikroelektronik durch beliebig geführte Leiterbahnen auch um Ecken gelenkt werden können, ist das bei Lichtquanten nicht so einfach. Deshalb ist die Integration von



GREEN PHOTONICS ASPEKT

Der globale Datenverkehr veranschlagt heutzutage bereits einen Energiebedarf äquivalent zu 24 Nuklearreaktoren oder 3-4 % der globalen CO₂ Emissionen – ein Wert vergleichbar mit jenem der kommerziellen Luftfahrt. Der stark wachsende Anteil der IKT am globalen Energieverbrauch könnte 2030 bereits bis zu 21 % (oder 9000 TWh/Jahr) betragen¹³. Photonik kann diesem Trend in den drei Kernbereichen der IKT wesentlich entgegenwirken: Optische **Datenübertragung** ist, mit einem Energieverbrauch von 2 pJ/bit, um ein Vielfaches effizienter als elektrische Methoden, die mehr als 1000 pJ/bit benötigen. **Datenprozessierung** kann im Bereich Hochleistungscomputer und AI Hard-

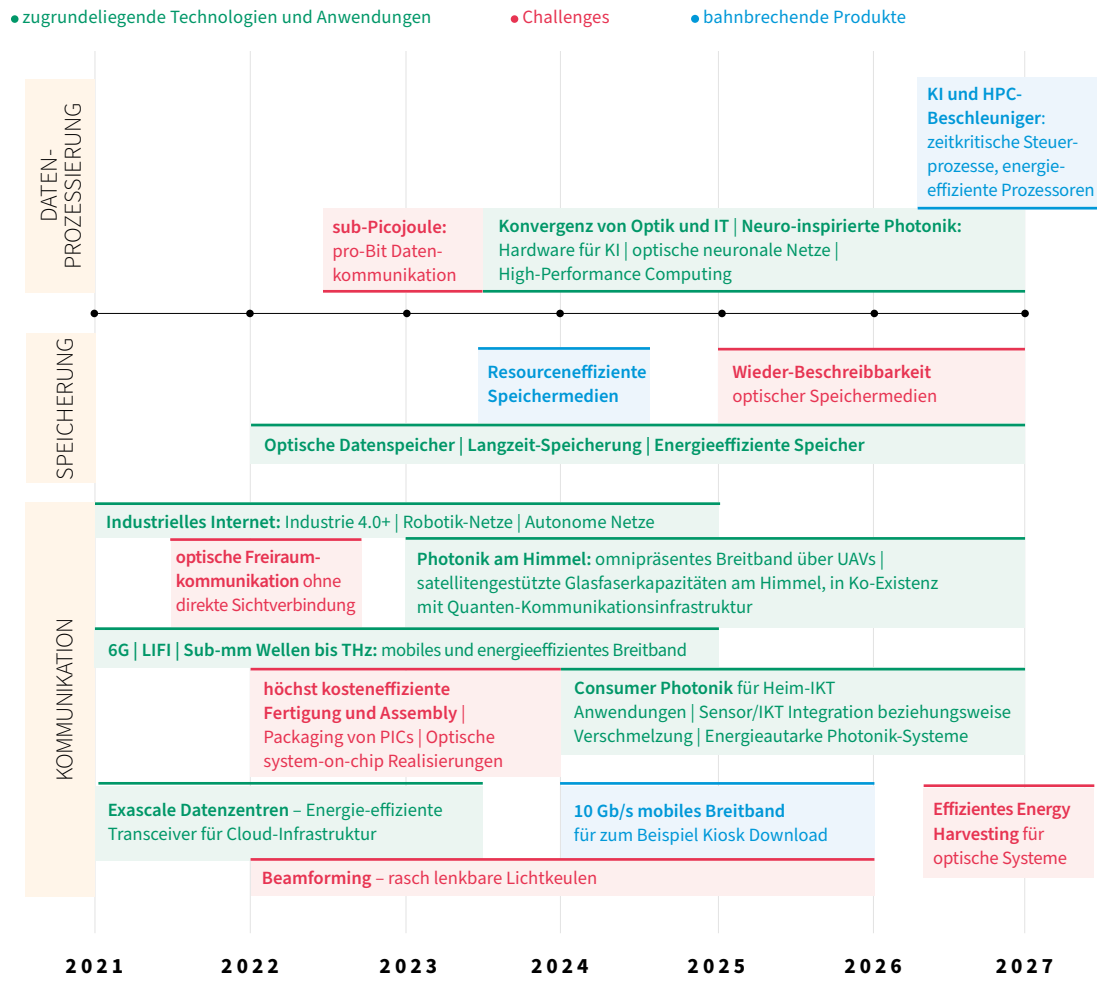
ware durch hybride opto-elektronische Systeme eine 20-fach höhere Rechenleistung bei gleichem Energieverbrauch erzielen. Rein optische Implementierungen würden eine Steigung um weitere Größenordnungen und somit jede Sekunde bis zu 1 Trillion an Rechenoperationen pro Watt ermöglichen.¹⁴ **Datenspeicherung** in modernen Massenspeichern wie Solid State Drives (SSDs) und HDDs verbrauchen im Betrieb in Datenzentren und bei Cloud-Diensten zwischen 30-60 nJ/bit pro Jahr. Die Datenspeicher müssen alle 2-3 Jahre ersetzt und Daten migriert werden. Beim Einsatz von optischen Speichersystemen reduziert sich der Energiebedarf und Ressourcenverbrauch um den Faktor 100.

Strahlteilern eine der Herausforderungen bei PICs. Im Vergleich zu den bisher eingesetzten Y-Verzweigungen erlauben sogenannte Multimodeinterferenz-Koppler (MMI) wesentlich kompaktere, besser integrierbare Lösungen. Sie sind zugleich leichter produzierbar, da es keine Verzweigungspunkte zwischen Wellenleitern gibt. Die nächste Integrationsstufe stellt die Verwendung von Photonic Crystals (PC) dar. Ähnlich zu einem Halbleiterkristall haben PCs ein Bandgap, welches es dem Licht verbietet sich in bestimmten Bereichen aufzuhalten. So kann das Licht auch auf engstem Raum im rechten Winkel geführt werden.

Ähnlich wie in der Mikroelektronik durch FPGAs (Field-

Programmable Gate Array), ist es auch auf photonischer Technologieebene von zentraler Bedeutung, „starre“ Funktionen durch **flexible Funktionselemente zu ersetzen, um (re)konfigurierbaren Schaltungen sowie die Bereitstellung von vollständig programmierbaren Photonikressourcen** zu ermöglichen. Obwohl die Integrationsdichte mit bis zu 1000 Elementen pro PIC jener der Mikroelektronik derzeit noch hinterherhinkt, zeichnet sich eine stetige Performancesteigerung ähnlich dem Moore'schen Gesetz ab,¹⁵ welches eine Verdoppelung der Prozessorleistung alle 2 Jahre sieht. ●

TIMELINE



Quellen:

¹ P. Winzer et al., "From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade," J. Lightwave Technol., vol. 5, pp. 1099-1115 (2017). | ² D. Reinsel et al., "Data Age 2025 – The Digitization of the World," IDC-Seagate white paper, 2018. | ³ D. Soma et al., "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C+L Band," in Proc. Europ. Conf. Opt. Comm., Gothenburg, Sweden, Sep. 2017, Th.PDPA1. | ⁴ A. Turukin et al., "105.1 Tb/s Power-Efficient Transmission over 14,350 km using a 12-Core Fibre," in Proc. Opt. Fiber Comm. Conf., Anaheim, United States, Mar. 2016, Th4C.1. | ⁵ M. Cantono et al., "Sub-Hertz Spectral Analysis of Polarization of Light in a Transcontinental Submarine Cable," in Proc. Europ. Conf. Opt. Comm., Brussels, Belgium, Dec. 2020, Th2H.2. | ⁶ UNEP, ICPC, "Submarine cables and the oceans: connecting the world," Report (2009) | ⁷ K. Sabbagh et al., "Maximizing the impact of digitization," PwC report, 2012. | ⁸ OECD, "Keeping the Internet up and running in times of crisis," OECD Policy Responses to Coronavirus (COVID-19), May 2020. | ⁹ E. Harstead, "10G PONs are here and solve FTTH. What's really next for PON?," in Proc. Europ. Conf. Opt. Comm. (ECOC), Brussels, Belgium, Sep. 2020, Tu6A.1. | ¹⁰ Synergy Research Group, "Hyperscale Operator Spending on Data Centers up 11% in 2019 Despite only Modest Capex Growth," Mar. 2020 | ¹¹ H. Hauschildt et al., "HydRON: High throughput Optical Network," Proc. SPIE, vol. 11272, p. 112720B, Mar. 2020. | ¹² JePIX Roadmap 2018: The Road to a Multi-Billion Euro Market in Integrated Photonics," Joint European Platform for Photonic Integrated Components and Circuits, 2018. | ¹³ N. Jones, "The Information Factories," Nature, vol. 561, pp. 163-166, 2018. | ¹⁴ Y. Shen et al., "Deep learning with coherent nanophotonic circuits," Nature Photonics, vol. 11, pp. 441-446, 2017 | ¹⁵ M. Smit et al., "Past, present, and future of InP-based photonic integration," APL Photonics, vol. 4, p. 050901, 2019.



Intelligente Beleuchtung für urbane und rurale Anwendungen

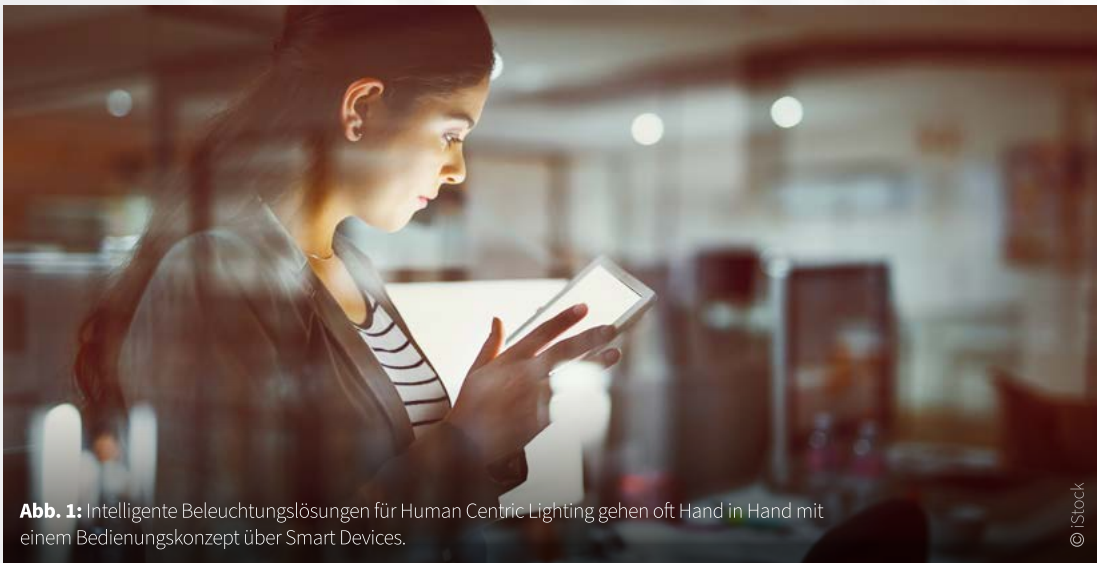


Abb. 1: Intelligente Beleuchtungslösungen für Human Centric Lighting gehen oft Hand in Hand mit einem Bedienungskonzept über Smart Devices.

33

Während früher Beleuchtungssysteme nur dazu dienten, einen Raum oder ein Gelände zu beleuchten, werden heute zunehmend mehr Zusatz-Funktionalitäten und Nutzen von einem Beleuchtungssystem erwartet: **Licht ist nicht nur zum Sehen da** (visuell), sondern hat auch einen großen Einfluss auf unsere Stimmung, unser Wohlbefinden und unsere Gesundheit (nicht-visuell).

Die Berücksichtigung dieser Tatsache in Beleuchtungssystemen wurde erstmals 2013 im Rahmen einer vom europäischen Branchenverband Lighting Europe und ZVEI in Auftrag gegebenen Marktstudie vom Beratungsunternehmen A. T. Kearny durch den Begriff „**Human Centric Lighting**“ (HCL) zum Ausdruck gebracht. Bis heute fehlt jedoch eine klare Definition. Allerdings ist klar, Licht steigert akut die Wachheit, erhöht Arbeits-, Gedächtnis- und Konzentrationsleistungen und kann spezifische physiologische Parameter verändern. Viel Licht am Tage unterstützt den zirkadianen Rhythmus (Schlaf-Wach-Rhythmus). Zu viel Licht in der Nacht unterdrückt die Ausschüttung des Hormons Melatonin und stört diesen Rhythmus, was längerfristig die Schlafqualität und die Gesundheit beeinträchtigt (z.B. signifikant erhöhtes Krebs oder Typ-II Diabetes Risiko).

Licht sollte folglich nichtvisuelle Effekte berücksichtigen und sich so positiv auf die Gesundheit des Menschen auswirken. Die Beleuchtungssysteme sollten Anpassungen an die Stimmung der Benutzer*innen und an die Situation erlauben. Beispielsweise kann ein - durch LED-Beleuchtung mit variabler Lichtfarbe und Intensität (tunable white) - angepasstes Spektrum in Schulen in Prüfungssituationen zu einer Leistungsverbesserung führen, in anderen Situationen eher beruhigen oder das Immunsystem unterstützen. Dieser Trend ist derzeit vor allem technologie- und marketinggetrieben. Klare Vorgaben für die Praxis fehlen noch.

Dennoch ist klar, die **Zukunft der Beleuchtung liegt in intelligenten und adaptiven Systemen**, die sowohl auf Veränderungen in der Umgebung (Wetter, Zeit, Belegung) als auch auf individuelle Bedürfnisse (personalisierte Beleuchtung) eingehen können. Dazu ist eine tiefgreifende Nutzerintegration notwendig. Enabler sind zusätzliche Sensoren und intelligente LED-Treiber, insbesondere IoT-fähige Produkte, welche die entsprechenden Funktionalitäten bereitstellen und sich zudem mit anderen Geräten und Systemen vernetzen können.

Für die Vernetzung mit anderen Systemen auf Gebäude- oder Stadtlevel eröffnen sich durch Smart Devices mit optimierten Algorithmen neue Möglichkeiten zur Lichtsteuerung. Mögliche neue Serviceoptionen gehen über die reine Beleuchtung hinaus und das Lichtnetzwerk wird zum Zugangsportal für andere Dinge des Internets – so etwa auch zur Basis für Machine-to-Machine (M2M) Kommunikation.

Nationale Highlights

Nicht nur für HCL sind Smart Lighting und vernetzte Beleuchtungssysteme bedeutsam. Generell ist die Vernetzung im Sinne von IoT ein zusätzlicher Benefit, den moderne Beleuchtungssysteme für den Nutzer bieten können. Die hierbei in Österreich stark anwendungsbezogene Forschung konzentriert sich auf die **Vernetzung, die Integration und Miniaturisierung von LED-Treibern**. V-Research arbeitet daher gemeinsam mit Tridonic, dem europäischen Marktführer, an der Entwicklung neuer Generationen von IoT-fähigen Smart Lighting Geräten.

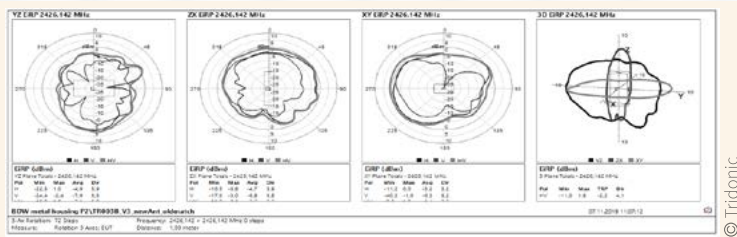


Abb. 2: Die Abstrahlcharakteristik im Metallgehäuse wurde optimiert bis sie jenen in Plastikgehäusen entsprach.

Integration und Miniaturisierung drahtloser IoT Funktionalität

Ein wesentlicher Entwicklungsschritt zur Vernetzung von Leuchtsystemen und für Smart Lighting Anwendungen ist die Integration von Funkschaltkreisen und -Schnittstellen auf einer LED-Treiberplatine. Für die Entwicklung eines neuen drahtlosen Systems (Wireless Reference Platform) wurden verschiedene Module auf ihre Integrationsmöglichkeiten untersucht, und Strategien zur vollständigen Integration ausgearbeitet.

Der erste Integrationsschritt war die Überführung der konzeptionellen, drahtlosen Systeme in integrationsfähige Baugruppen, woraufhin vier Module für unterschiedliche LED-Treiber erstellt und für die Produktion freigegeben wurden. Die kompatible Antennensystematik für Metallgehäuse in LED-Vorschaltgeräten wurde auf Basis eines BDW LCA 50 W 350-1050 mA LP PRE Prototypen erstellt und überprüft. Die Reichweitenanforderungen wurden erfüllt, da eine ähnlich omnidirektionale Abstrahlcharakteristik wie bei LED-Treibern in Plastikgehäusen erreicht wurde, die in Feldversuchen bei typischerweise >30 m liegt.

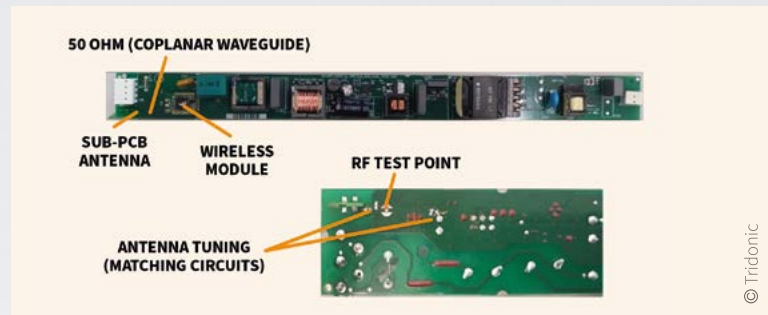


Abb. 3: Überblick Wireless System für Verwendung in Metallgehäuse.

Mit den erarbeiteten Maßnahmen gelang eine Verringerung des Komponenten- und Kosten-Anteils für drahtlose Kommunikation in LED-Treibern. Die Größe der gewählten „Wireless Reference Platform“ mit einem ursprünglichen Volumen von 2,1x4,0x1,6 cm³ wurde auf 1,27x2,00x1,6 cm³ verkleinert, was einer Reduktion auf 30% entspricht.

Optische Freiform Mikrolinsen Folien

Kompakte, kostengünstige, effiziente optische Systeme, welche den Ansprüchen moderner Beleuchtungstechnik und insbesondere dem HCL gerecht werden, sind ein zentrales Thema für den europäischen Marktführer für Leuchten und Beleuchtungssysteme *Zumtobel*. Im Rahmen des internationalen EU-Projekts *Phabulops* dient ein Anwendungsfall der Firma als Beispiel der erfolgreichen Erprobung der Rolle-zu-Rolle (R2R) Pilotlinie zur Produktion von **Freiform-Mikrolinsen-Arrays** (engl. Free-form Micro-Lens Arrays – FMLAs).

Bereits im ersten Jahr gelang es in Kooperation mit dem Projektpartner JAONNEUM RESEARCH zur Bestätigung der eingeschlagenen Forschungs- und Entwicklungsrichtung eine sinnvolle Alternative zu den bislang üblichen sperrigen und teuren facettierten Reflektoren zu erarbeiten, wobei das volle Zukunftspotential der eingesetzten Technologien mit der gegebenen Aufga-



Abb. 4: Entwicklung stromsparender Schaltungen für den Beleuchtungsbereich.



benstellung noch nicht ausgereizt ist. Die Technologie wird seit Anfang 2021 in der ersten kontinuierlichen Lichtlinie der Welt, die höchste architektonische und lichttechnische Ansprüche erfüllt, in *Zumtobels* seit 2015 bewährter SLOTLIGHT infinity eingesetzt. Der Vorteil des Produkts ist dessen Vielseitigkeit. Die bis zu 50 Meter langen Lichtlinien haben keine Nahtstellen mehr und selbst um die Ecke leuchten sie gleichmäßig hell.

Im Fokus

Die steigenden Anforderungen an Beleuchtungssysteme und Smart Lighting, insbesondere LED-Treiber und deren Leistungselektronik gehen Hand in Hand mit dem Wunsch nach Miniaturisierung. Das erfordert den Einsatz von hoch integrierten Komponenten. Dazu gesellt sich der Wunsch nach Ökologisierung und *Optimierung für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft*. Zuverlässigkeit und Lebensdauer, sowie die Integration zusätzlicher Intelligenz sind entscheidende Themen. Bei optischen Systemen ist die Entwicklung kostengünstiger, nachhaltiger, effizienter und dennoch kompakter Lösungen von größter Bedeutung, um das Potential heutiger und zukünftiger Lichtquellen voll auszuschöpfen. Als Schlüssel für die Erfüllung dieser Ansprüche gelten die Erforschung und Entwicklung neuer Produktionsmethoden und Werkzeugeinsätze. Dabei sind das Digitale Engineering und die Anwendung und Entwicklung neuer, verbesserter Simulationmethoden und -Systeme von höchstem Interesse für Forschungsinstitute und deren Industriepartner.

heute das Problem, dass nicht mehr ausreichend landwirtschaftliche Flächen in Stadtnähe vorhanden sind. Ein Übergang vom klassischen Ackerbau zu *Vertical Farming* – der Pflanzenzucht in Hochhäusern – findet statt, bei dem kein Sonnenlicht, sondern künstliches Licht verwendet wird. Um Energie zu sparen, sollte dieses künstliche Licht aber möglichst nur die Spektralteile enthalten, welche die Pflanze auch wirklich für die Photosynthese benötigt, darüber hinaus aber auch für die Produktion und Einlagerung von Geschmacksstoffen und essenziellen Nährstoffen, wie Vitaminen und Spurenelementen.

Freiformflächen – Optiken für die Lichttechnik

In modernen Leuchtensystemen soll das emittierte Licht der Lichtquelle mittels neu entwickelter Freiformoptiken besser genutzt werden, indem das Licht genau auf den gewünschten Bereich gebündelt wird und möglichst wenig Streulicht in andere Bereiche entweicht. Dabei soll die Ausleuchtung möglichst homogen sein und idealerweise in der Mitte genau die gleiche Helligkeit wie am Rand vorliegen, was aber sehr komplexe Optiken erfordert. Die Strukturgrößen in der *Freiformflächen-Facettentechnik* werden deshalb immer kleiner und bewegen sich auf den Mikrometer-Bereich zu. Diese Facetten können sowohl auf reflektorischen als auch brechenden Oberflächen beziehungsweise optischen Grenzflächen aufgebracht werden. Damit befindet man sich bereits im Übergangsbereich von der Strahlen- zur Wellenoptik, die Berechnung und Herstellung solcher Optiken erfordert neue Methoden.

Konkret ist die Erweiterung der Simulations- und Berechnungsmethoden auf den Übergangsbereich zwischen Strahlen und Wellenoptik erforderlich. Zusätzlich sollte der Einsatz neuer Methoden (z.B. Photon Mapping), besser auf die lichttechnischen Aufgabenstellungen zugeschnitten werden. Aber auch die Herstelltechniken bedürfen einer gründlichen Anpassung an neue Anforderungen. Derzeitige Spritzgusstechniken stoßen an ihre Grenzen. Neue Methoden zur Werkzeugfertigung beziehungsweise grundsätzlich andere Herstellverfahren, wie beispielsweise 3D-2Photonendruck für Master, oder R2R, werden notwendig.

Nanostrukturen für lichttechnische Grenz- und Oberflächen

Mittels Nanostrukturen auf optischen Oberflächen beziehungsweise Grenzflächen werden wellenoptische Effekte genutzt. Anwendung findet das beispielsweise, um eine spektrale Durchmischung zu erzeugen oder unerwünsch-



Abb. 5: HCL-Kunstlichtlösung (2200 K bis 5000 K) im F&E Gebäude von Bartenbach.

Neben ihrer Bedeutung für *HCL und Smart Lighting* sind zahlreiche der folgenden Technologien auch im Bereich Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion nützlich. In vielen urbanen Regionen besteht bereits

te Oberflächenreflexionen zu verringern (z.B. kann dabei der sogenannte „Motten-Augen-Effekt“ helfen).

Durch strukturierte Oberflächen, wie bei „Diffusor-Folien“ mit Mikrostrukturen, kann gerichtetes Licht gezielt aufgeweitet werden, beispielsweise in eine quadratische oder elliptische Verteilung. Vorzugsweise erfolgt die Herstellung mit Role-to-Plate (R2P) beziehungsweise R2R Verfahren.

Weitere Photonik – Technologien für die Lichttechnik

Durch das weite Anwendungsspektrum sind noch zahlreiche weitere Technologien von großer Bedeutung – woraus sich auch ein weites Feld an Forschungsthemen ergibt. Auszugsweise seien hier erwähnt:

- „Thermische Glättung“ von optisch wirksamen Oberflächen beziehungsweise Grenzflächen durch die Behandlung mit Lasern verschiedener Wellenlängen
- Hochreflektierende beziehungsweise reflexionsverstärkende Beschichtungen auf Glas, Metall, Polymethylmethacrylat et cetera (z.B. auf federhartem Aluminium für hochwertige Lamellen im Tageslichtbereich)
- Schaltbare Liquid Crystal Filme für die Kunstlicht-Technik und für Verglasungen
- Neue Materialien für optische Zwecke (z.B. PMMA mit verändertem spektralen Cut-Off, besserer UV-Stabilität, niedrigerer Dispersion etc.; oder Beimischung von Nano-Partikeln zur Erzeugung von tageslichtähnlicher Rayleigh-Streuung)
- Farbkonversionstechniken (Phosphor) für LEDs
- Printed Circuit Board (PCB) Entwicklungen
- Sensoren für die Bereiche Körper, Mensch, Medizin

Smarte LED-Treiber

Der Benefit von Smart Lighting, **mehr Funktionalität und Vernetzung** bereitzustellen, führt aber auch dazu, dass tendenziell auch mehr Energie für den Betrieb benötigt wird. Die Herausforderung besteht nun darin, den Stromverbrauch insgesamt – insbesondere die Verluste im Standby-Modus und im Teillastbereich der Geräte – zu reduzieren. Zusätzlich ist eine Miniaturisierung beziehungsweise Erhöhung der Leistungsdichte von LED-Betriebsgeräten gefordert. Um dem Trend zu immer kleineren, flacheren, sich der Leuchtmittel-Geometrie annähernden Formfaktoren gerecht zu werden, wird an neuen LED-Treiber Plattformen geforscht.

Ziele dieser Forschung für neue Plattformen sind die Integration von Funktionen in einen Application-Specific Integrated Circuit (ASIC), um die Komponentenzahl und damit das Volumen zu reduzieren, sowie die integrierte Ansteuerung und Regelung für die, je nach Anwendung, effizienteste Schaltnetzteiltopologie. Es ist zudem wichtig, die Schaltfrequenzen zu erhöhen, um speziell das Volumen von Induktivitäten und Kondensatoren zu minimieren, ohne die Effizienz zu beeinträchtigen. Neue Bauteiltechnologien wie Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors (GaN HEMTs) scheinen hierfür ein idealer Lösungsansatz, da sie sogar eine Effizienzsteigerung in Aussicht stellen. Sie sind aber in der Praxis zugleich eine Herausforderung, die entsprechende Forschungsaktivitäten erfordern. Die Verbesserung der integrierten und isolierten Digital Addressable Lighting Interface (DALI) Spannungsversorgung und die Entwicklung von Treibern für Leistungen jenseits von 300 W mit besserer Systemeffizienz sind weitere zukünftige Forschungsthemen.

Lichtmanagement Systeme

Aufgrund der schnell voranschreitenden Entwicklung im Bereich der Radiofrequenz Mikrokontroller befasst sich die industrielle Forschung damit, immer mehr Aufgaben der LED-Treiber und Sensorik von diesen Bausteinen übernehmen zu lassen. Ein wesentlicher Entwicklungsschritt ist die Integration von Funk-schaltkreisen auf eine LED-Treiberplatine. Hierbei werden bei *Tridonic* kontinuierlich verschiedene Module auf ihre Integrationsmöglichkeiten untersucht und Strategien zur vollständigen Integration ausgearbeitet. Im Fokus stehen die Überführung der konzeptionellen drahtlosen Systeme in integrationsfähige Module für Sensoren, kompatible Antennensysteme für vergossene Gehäuse in LED-Treibern bei besonders kritischen Anwendungen und die Reduktion des Komponenten- und Kostenanteils für drahtlose Kommunikation in LED-Treibern.

Simulationen von EMV, Treiber- und Leuchtensystemen, und die Implementierung eines Digitalen Zwillings

Es existieren zwar bereits erfolgreich entwickelte und validierte Simulationsmodelle von verschiedenen Systemen. Allerdings ist es erforderlich die Effizienz der Simulationsworkflows und die generelle Herangehensweise zu optimieren. Insbesondere ist das Potential die Durchlaufzeit (Pre-Processing, Simulation, Post-Processing) zu reduzieren noch nicht ausgeschöpft. Es ist ebenfalls sinnvoll, bereits vorhandene Simulationsmodelle in einer Library universell verfügbar zu machen.

Eine Herausforderung ist die Störungsimunität (z.B. kritische Spannungserhöhungen an empfindli-



chen Bauteilen durch Blitzschlag), sowie die Störungsemission (z.B. vom LED-Treiber ausgesendete Störungen, die ins Versorgungsnetz zurückwirken). Simulation inklusive der Software gestützten teilautomatisierten Optimierung sind wünschenswert, um den aufwändigen Prozess abzukürzen. Die Forschung zielt auf die Weiterentwicklung der Modellierungsansätze für die dafür erforderlichen Filterelemente ab. Bedeutende Fortschritte werden

Topologien als Knoten dienen und damit kurze Entfernungen zu den einzelnen zu vernetzenden Objekten gewährleisten. So kann die erforderliche Übertragungsleistung minimiert und die Batterielebensdauer der vernetzten Objekte erhöht werden. Mittels neuer Technologien wie LiFi wird zukünftig das von den Leuchten ausgesendete Licht selbst zum Kommunikationsmedium. Auch im Hinblick auf 6G Backscatter-Technologien für die Kommunikation kann die Beleuchtung durch Backscattered Visible Light Communication and Sensing einen essenziellen Beitrag liefern.

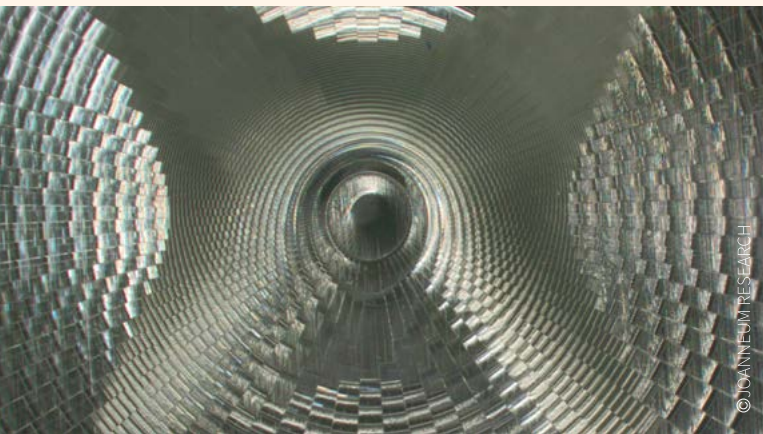


Abb. 6: Der Qualitätsanspruch an Optiken ist hoch, dennoch müssen die Kosten stetig gesenkt werden, um kompetitiv zu bleiben.

37

durch eine detailliertere Modellierung von PCB-Daten und der nominalen und parasitären Bauteileigenschaften erwartet. Die dadurch deutlich gesteigerte Aussagekraft der Simulationsergebnisse hilft, die relative Abweichung zwischen simulierter und gemessener Störung auf $\leq 20\%$ zu reduzieren.

Das spannende Forschungsgebiet des „Digitalen Zwillings“ unterstützt das **Lebenszyklus-Management**, lässt aber auch in frühen Phasen der Produktentwicklung von Beleuchtungssystemen effizientere, neue Lösungsansätze erwarten. Dafür ist es unabdingbar ein Konzept zu erarbeiten, das speziell für die Anforderungen der Beleuchtungsindustrie die Vorteile des „Digitalen Zwillings“ mit dem umfangreichen und fundierten Simulations- und Modellierungswissen vereint.

Integration und Miniaturisierung

Bei LED-Lichtquellen hat sich das Rennen um höchste Effizienz dramatisch verlangsamt und spielt in der Entwicklung nicht mehr die Hauptrolle. Neben einer weiteren Verbesserung der Lebensdauer besteht für LED-Lichtquellen vor allem noch Wachstumspotenzial im Bereich von HCL und LED-Modulen mit integrierten, zusätzlichen Funktionalitäten. Da Leuchten in vielen Infrastrukturen allgegenwärtig sind, können sie in IoT-

LED-Lichtquellen werden immer über elektronische Treiber mit Konstantspannung oder Konstantstrom versorgt, unabhängig davon, ob sie in einem separaten Gehäuse untergebracht, oder in die Lichtquelle integriert sind. Da zumeist bereits ein Mikrokontroller enthalten ist, der auch Sensordaten erfasst und verarbeitet, können mit vergleichsweise geringem Aufwand zusätzliche Funktionalitäten implementiert werden. Es ist nur logisch, zu einer raschen Erweiterung der Funktionalität in Bezug auf HCL, auf ein bestehendes integriertes tunable-white Konzept aufzubauen, bei dem durch mindestens zwei Lichtquellen unterschiedlicher Farben die Farbtemperatur eingestellt werden kann. Zusätzliche Sensor- und gegebenenfalls Notlichtfunktionen können den Integrationsgrad zusätzlich erhöhen.

Die Anwendung Leuchten-integrierter Treiber ist trotz einer Plug 'n' Play Installation begrenzt. Für ein durchgängiges Smart-Leuchten-Konzept sind beispielsweise für kleinere Downlights, freistehende Leuchten, sowie für Linear- und Flächenleuchten externe Treiberkonzepte wünschenswert. Die Sensoren mit Empfangsteilen müssen sich auf einem separaten „Subprint“ befinden, da spezielle Materialien als Substrat nötig sind. Das digitale Ausgangssignal stellt eine optimierte Lösung bezüglich Robustheit dar.

Optimierte, kompakte Multisensor-Lösungen können auch für andere Anwendungen von Nutzen sein. Ergebnisse von Sensordaten und der daraus abgeleiteten Erkenntnisse einer Pilotinstallation legen die weitere Erforschung unterschiedlicher Anwendungsfälle und Betriebskonditionen nahe. Das Hauptkriterium ist die Aufbereitung der Sensoren-generierten Rohdaten, um aussagekräftigere Informationen für Administrator*innen/Benutzer*innen/Verbraucher*innen/Kund*innen dieses Beleuchtungsnetzwerks zu erhalten. Solche Informationen könnten beispielsweise die tatsächlichen Belegungsinformationen von Arbeitsplätzen oder Besprechungsräumen sein, deren Lärmpegel oder die

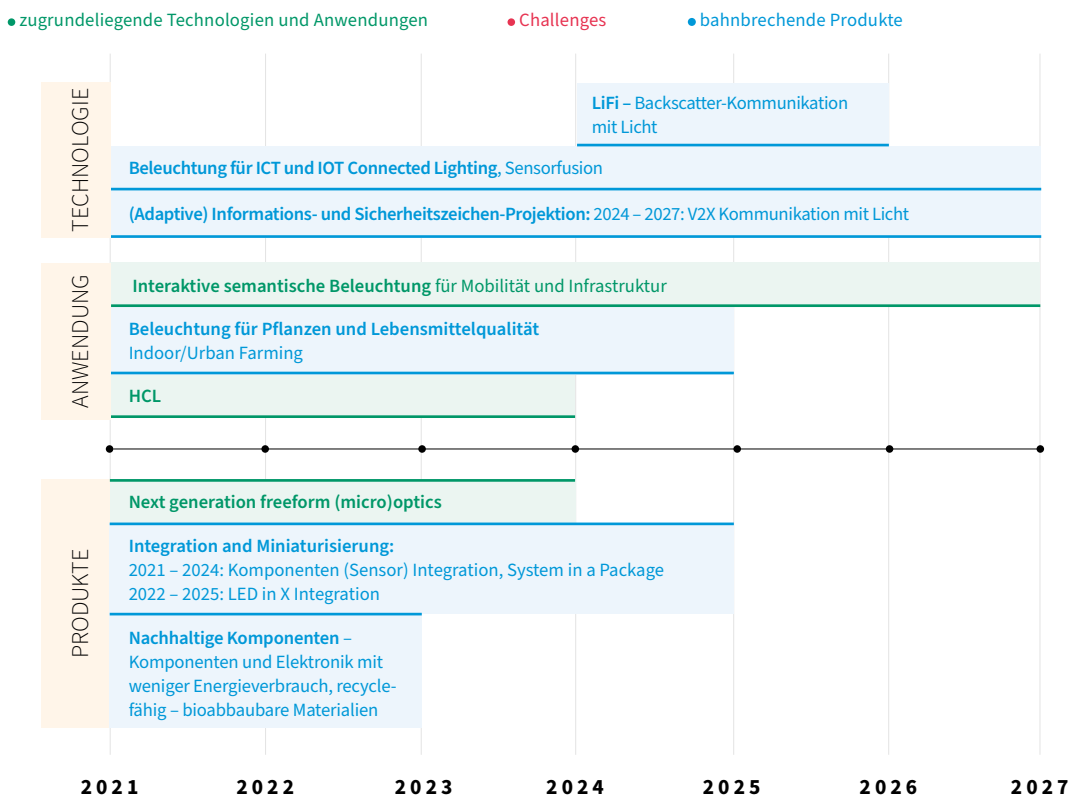
Aufrechterhaltung des Netzwerks und der Betriebstauglichkeit der Leuchten, um nur einige zu nennen.

Oft werden auch Daten von Sensoren gebraucht, die nicht in einer Leuchte integriert werden können. Diese Daten sollen dennoch im gleichen Netzwerk zur Verfügung stehen, um verschiedene Regelungen in der Gebäudeautomatisation realisieren zu können. Um diese Hindernisse zu überwinden, ist es erforderlich auch existierende Sensorlösungen (z.B. Raumtemperatur, CO₂ usw.) zu verwenden und in das vorhandene Netzwerk einzubinden.

Statement

Lag bisher in der öffentlichen Wahrnehmung die Energieeffizienz der Beleuchtung im Mittelpunkt, so liegt nun der Fokus mehr auf **Komfort, Wohlbefinden und Gesundheit** der Bewohner. Hier gibt es noch viel Forschungsbedarf, und es ist eine einmalige Chance für die Beleuchtungsbranche, den Stellenwert des Lichtes in der Gesellschaft zu stärken und mit HCL, Smart Lighting oder Horticultural Lighting die Lebensbedingungen der Menschen nachhaltig zu verbessern. ●

TIMELINE



GREEN PHOTONICS ASPEKT

HCL, durch an die Bedürfnisse angepasstes, flickerfreies Licht, steigert das Wohlbefinden der Endanwender*innen. Höhere Integrationsdichte mit weniger Bauteilen führt zu längerer Lebensdauer und weniger Elektroschrott. Sensorik und Integration in Gebäudemanagement-Systeme optimiert das gesamte Energiemanagement des Gebäudes. Vorausschauende Systemwartung und automatisierte Anpassungen verlängern die Nutzungsdauer durch kontinuierliche, selbständige Verbesserung. Modulare und aktualisierbare Kommunikationsmodule erlauben einen universellen Einsatzbereich mit einfacher und ressourcenschonender Wie-

derverwendbarkeit. Optimierte Simulationsmethoden erhöhen die Robustheit und verringern Ausfälle und somit Austausch von Geräten. Dank energieeffizienter Beleuchtung können pro Jahr weltweit rund 3.742 TWh eingespart werden, was einer CO₂-Einsparung von 1.500 Megatonnen entspricht. Darüber hinaus kann durch spektrale Steuerung des Pflanzenwachstums die landwirtschaftliche Produktion an den schwankenden Tagesbedarf (z.B. Blumen für den Valentinstag) angepasst und damit ebenfalls die CO₂-Bilanz verbessert werden, die Zahl der Ernten und deren Ertrag und Qualität erhöht werden.



Vernetzte Mobilität, Transport und Sicherheit

Die Mobilität der Zukunft steht kurz vor ihrer bisher größten Revolution. **Autonomes Fahren, Konnektivität und Monitoring** bekommen immer größeren Stellenwert und forcieren neue Konzepte und Technologien. Hinzu kommt, dass die individuelle Mobilität der österreichischen Bevölkerung stetig zunimmt, dabei steigt nicht nur die Anzahl der im Privat-PKW zurückgelegten Personenkilometer, sondern auch im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) ist ein starkes Wachstum zu beobachten. Österreich ist in Bezug auf Bahnkilometern pro Person EU-Vorreiter.¹

Diese Entwicklung bringt gleichermaßen Herausforderungen und Chancen, um Österreichs Straßen, Gleise und den Luftraum sicherer, effizienter und nachhaltiger zu gestalten. Durch ihre Vielschichtigkeit und Ubiquität ist Mobilität zu einem zentralen Punkt im österreichischen Alltag geworden, mit komplexen Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Die global betrachtet stetige Zunahme des Individualverkehrs hat den Anstieg des Energiebedarfs im

Verkehrssektor zur Folge. Heute sind 30% der österreichischen Treibhausgasemissionen² allein auf den Verkehrssektor zurückzuführen, aber auch andere schädliche Emissionen wie NOx oder „Feinstaub“ werden vom Verkehr verursacht. Laut einer Studie des Umweltbundesamtes³ reduziert PM_{2,5}, eine spezifische Art des Feinstaubs, die Lebenserwartung in Österreichs Städten um bis zu 17 Monaten. Somit ist die drastische Reduktion der vom Verkehr verursachten Emissionen unumgänglich, um die nationalen Klimaziele und eine langfristig gesunde Gesellschaft zu erreichen.

Alle Sektoren des Verkehrs, inklusive der Bahn, können deutlich von photonischen Innovationen profitieren: Der Fortschritt optischer Sensortechnologien wie etwa des **flash-/LiDAR** und die Weiterentwicklung optischer Datenverarbeitungssysteme rücken autonomes Fahren immer mehr in greifbare Nähe. Innovative Konzepte zur Verbrauchsminimierung von Fahrzeugen, alternative Energiequellen und Antriebe zielen darauf ab, negative Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft zu verringern und gleichzeitig die Sicherheit zu erhöhen. In Zu-



Abb. 1: Faseroptisches Distributed Acoustic Sensing erlaubt Fahrzeugverfolgung, Condition Monitoring der Infrastruktur und Naturgefahrenerkennung auf einer Länge von 50 km mit nur einem Lichtleiter und Sensor.

sammenhang mit den Sicherheitsaspekten besonders hervorzuheben sind moderne LED- oder Laser-basierte Scheinwerfer, die bereits heute dazu beitragen unsere Straßen sicherer zu machen. Photonische Technologien erlauben die lückenlose Umgebungsüberwachung unter vielfältigen Umweltbedingungen oder die hochgenaue Echtzeiterfassung und Verfolgung von Zügen, beispielsweise durch Distributed Acoustic Sensing (DAS), welches zukünftige Bahnsicherungskonzepte ergänzen wird. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), umgangssprachlich oft als Drohnen bezeichnet, können verlässlich und in Echtzeit vor potenziellen Gefahrenquellen warnen.

Nationale Highlights

Der Beleuchtungssektor der europäischen Automobilbranche wird in den kommenden Jahren ein starkes Wachstum verzeichnen, vor allem auf Grund der Präsenz großer Hersteller. Der Löwenanteil wird dabei der LED-Beleuchtung zugeschrieben, da hohe Lebensdauer und geringer Energieverbrauch mit vergleichsweise hoher Leistung eine attraktive Alternative zu Halogen-

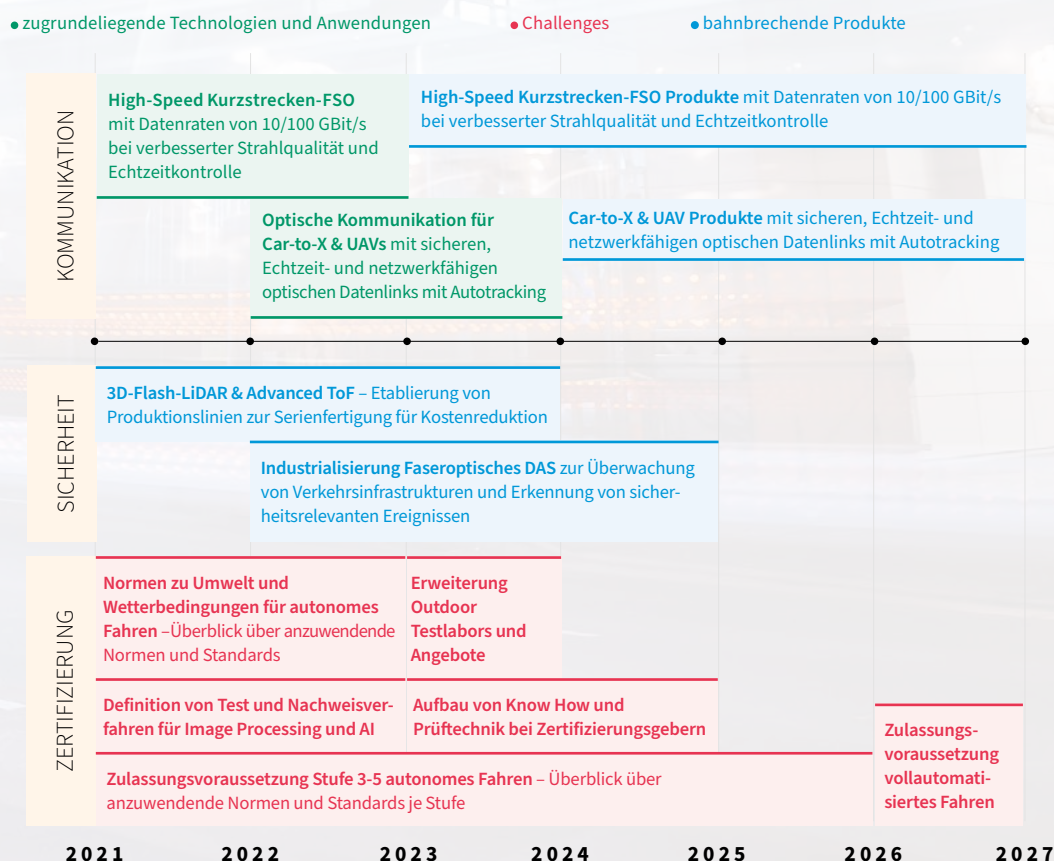
und Xenonscheinwerfern bieten.⁴ Der niederösterreichische Erstausrüster ZKW und andererseits HELLA, ein Unternehmen mit Produktionssitz und langer Tradition in Österreich, konnten einen Durchbruch hinsichtlich Verkehrssicherheit verzeichnen. Österreich wird als Produktionsstandort von dieser Entwicklung stark profitieren können.

Matrix-LED-Scheinwerfer

LED-Scheinwerfer sind seit Jahren ein spannendes Forschungsgebiet der Automobilbranche, verbindet doch die Integration eines LED-Scheinwerfermoduls Designflexibilität mit Miniaturisierung mit höchster Energieeffizienz. Allerdings konnte erst 2005 der erste Voll-LED-Hauptscheinwerfer präsentiert werden, welcher in Bezug auf Lichtleistung vergleichbare Ergebnisse erzielt wie marktübliche Xenonscheinwerfer. Seitdem hat sich der Einsatz von LED-Beleuchtungskonzepten in der Automobilindustrie rasant weiterentwickelt.

Matrix-LED-Scheinwerfer ermöglichen blendfreies Fernlicht durch die gezielte Aussparung von Objek-

TIMELINE





ten, wodurch entgegenkommende Fahrzeuge nicht geblendet werden, gleichzeitig der restliche Straßenraum mit potenziellen Hindernissen aber gut ausgeleuchtet bleibt. Ein System ohne bewegliche mechanische Bauteile, das zusätzlich höchste Zuverlässigkeit bei geringem Wartungsaufwand garantiert, wurde von **HELLA** vorgestellt. Die LEDs der fünf 5-Chip-LED-Reflektoren lassen sich einzeln ansteuern und können somit je nach Bedarf auf- oder abgedimmt werden. Die Alltagsrelevanz dieser neuen Technologie wird deutlich, wenn man die Stresslevel der Autofahrer*innen untersucht. Mehr als die Hälfte der Autofahrer*innen fühlt sich durch schlechte Sicht gestresst⁵. Die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer kann somit durch exzellentes Ausleuchten der Straße sowie der Reduktion des Stresslevels der Autofahrer*innen erhöht werden^{6,7}. Autofahrer*innen in-cabin Funktionen werden mittels ToF Kameras realisiert. Die Kamera kann zum Beispiel die Augen und ihre Bewegungen verfolgen und so den Fahrer*innen Müdigkeit oder Ablenkung signalisieren. Zudem ermöglichen Sie eine intuitive Bedienung zum Beispiel von Navigation oder Radio, um die Aufmerksamkeit nicht vom Fahren selbst abzulenken.

Laserlight

Einen weiteren Erfolg konnte ZKW mit der Einführung von **Laserlight** verzeichnen, einer neuen Fernlichttechnologie, welche auf die Verwendung von Laserdioden gestützt ist. Sie brilliert nicht nur mit ihrer geringen Größe und damit einhergehenden Designflexibilität, sondern überzeugt vor allem durch eine noch höhere Lichtintensität bei gleichzeitig geringerem Energieverbrauch als die bereits äußerst effizienten LED-Scheinwerfer. Die Fernlichtreichweite konnte bei Laserlight auf 600 m erhöht werden, dies entspricht einer Verdreifachung der aktuellen Standards, wodurch die Sicherheit im nächtlichen Verkehr nochmals gesteigert werden kann.⁸

Im Fokus

Österreichische Kompetenzen reichen von Erstausrüstern der Automobilindustrie bis hin zu konkurrenzfähigen Forschungsvorhaben heimischer Universitäten und Forschungsorganisationen. Photonische Technologien haben das Bild des modernen Verkehrswesens, der Transportindustrie und des Sicherheitssektors stark verändert und besitzen das Potential dieses nachhaltig zu prägen. So hat sich unter anderem auch die Entwicklung der unbemannten Luftfahrzeuge in den letzten Jahren von Zukunftsmusik hin zu einer Technologie mit breitem Anwendungsspektrum entwickelt.

Photonik im Dienst von Einsatzkräften

Im Luftraum bringen photonische Technologien neue Möglichkeiten für eine Vielzahl an Anwendungen. UAVs (Drohnen) ermöglichen in Kombination mit modernsten photonischen Komponenten die Analyse unbekannten Terrains für die Unterstützung von Einsatzkräften im Krisen- oder Katastrophenfall, zum Beispiel bei großflächigen Hangrutschungen. Lasermessungen mit LiDAR-Technologie können, zukünftig auch in Echtzeit, ein aktuelles und hochgenaues 3D-Geländemodell bereitstellen. Vegetationsbedingte Sichtprobleme gehören bei modernen **LiDARs, kombiniert mit intelligenter Signalverarbeitung**, der Vergangenheit an – versteckte Pfade, verklauerte Wildbäche und unpassierbare Straßen können effizient und schnell erkannt werden und erhöhen somit die Sicherheit der Einsatzkräfte maßgeblich.

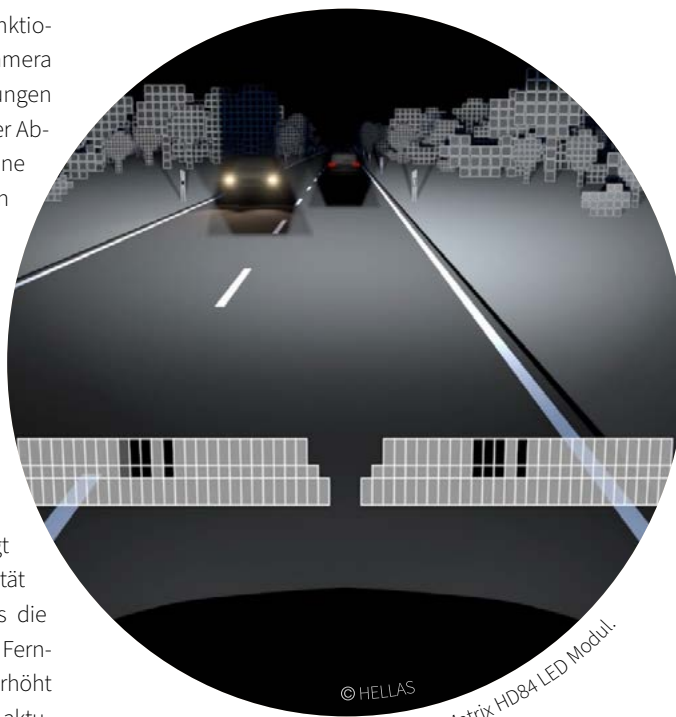


Abb. 2: Matrix HD84 LED Modul.

Darüber hinaus können spezifische potenzielle Gefahrenquellen durch zusätzliche Sensoren effizient lokalisiert und identifiziert werden, wie etwa freiliegende/exponierte radioaktive Substanzen oder spontane Gasaustritte nach einem Erdbeben oder Unglücksfall.

Der wesentliche Bestandteil sind hierbei 3D-Geländedaten in hoher Qualität. Diese können mittels Laser-scannern oder neuartigen 3D 360° Panorama-Kameras (TUCO-3D) generiert werden. Die Ausstattung der UAVs mit entsprechenden Systemen ermöglicht die Erstellung einer interaktiven Karte zur Visualisierung auf einem Tablet binnen kürzester Zeit.

Die Live-Übertragung der Daten zwischen den einzelnen Drohnen und auch der Bodenstation stellt eine der größten Herausforderungen im Bereich UAVs dar. Eine vielversprechende Option ist die Verwendung von **optischem Richtfunk mit Hilfe von Free Space Optics (FSO)**, der auf Grund des hohen Datendurchsatzes, der großen Übertragungsreichweite und vernachlässigbaren Interferenzen als besonders attraktiv gilt. Durch die Verwendung von FSO kann das Kommunikationsnetz zwischen UAVs vollkommen autark agieren, wodurch die Störung durch alternative Frequenzen, wie es etwa im KW-Bereich (Kurzwellenbereich) der Fall ist, ausgeschlossen werden.

Allerdings können die FSO-Verbindungen im freien Raum durch atmosphärische Turbulenzen eingeschränkt werden, wodurch sich die Zuverlässigkeit des Netzes verringert. Somit ist der Aufbau der Netzwerkarchitektur wesentlich, um eine hohe Netzwerkresilienz zu erreichen. Resilienz bezieht sich hierbei auf die Fähigkeit einer Netzwerktopologie, sich gegen Verbindungsausfälle zu wappnen. Zur Lösung dieses Problems werden zwei Network Resilience Aware Topology Formation-Methoden (NRATF) eingesetzt, das heißt zentralisierte-NRATF und verteilte-NRATF, werden untersucht, um das Problem des Topologieentwurfs effizient zu lösen und die störungsfreie Kommunikation zwischen den Drohnen zu gewährleisten.

3D-LiDAR- und CBRNE-Sensoren (chemisch, biologisch, radioaktiv, nuklear oder explosiv) erzeugen eine multi-dimensionale Ansicht. Die Kombination aller verfügbaren Messinstrumente und Werte generiert einen umfassenden Satz an Informationen, der die genaue Lage radioaktiver Quellen über die Bestimmung der Schlüsselparameter feststellen kann und durch die Vorteile des Echtzeit-Situationsbewusstseins eine Lokalisierung innerhalb einer Minute ermöglicht. Durch die Kombination der Radioaktivitätsmessung mit

3D-Geländekarten kann die Verstrahlung modelliert werden. Ein zuverlässiges Bodenmodell wird mittels hochwertiger Laser erstellt. Schnelle Scans liefern vollständige Ergebnisse nach 400 s, bei einer Genauigkeit von circa 1 m und einer Fläche von bis zu 500x500 m. Dieser intelligente Nachweis von Radioaktivitäten stellt die Ergebnisse und Messungen eindeutig in einer zoom- und drehbaren Karte dar.

Das AIT, *Austrian Institute of Technology*, arbeitet im Rahmen der KIRAS Projekte „Durchblick“⁹ und „UAV-Rescue“¹⁰ daran, **Echtzeitinformationen aus LiDAR-Daten für Ersthelfer** zugänglich zu machen, wodurch Gefahren frühzeitig erkannt werden und die Sicherheit von Einsatzkräften erhöht wird.

Von Advanced Driver Assistance Systemen zum autonomen Fahren

Autonome Fahrzeuge sollen mehr Österreicher*innen eine aktive Teilnahme am gesellschaftlichen Leben ermöglichen, da keine Fahrer*innen mehr nötig sein werden. Derzeit benötigen Pendler*innen pro Weg zur und von der Arbeit im Durchschnitt jeweils 29 Minuten.¹¹ Für die Österreicher*innen ergibt sich der Vorteil, dass sie die An- und Rückfahrt konstruktiv nutzen können, wodurch sich im Endeffekt der Arbeitstag deutlich verkürzt. Autonomes Fahren, als Schlüssel für einen sicheren und ökologisch verträglichen Individualverkehr, wird je nach Mitwirkung der Fahrer*innen in sechs Stufen beschrieben (Abb. 3). Systeme die Teil- und Hochautonomes Fahren unterstützen sind als sogenannte Autonome Driver Assistance Systemen (ADAS) bereits heute serienmäßig im Einsatz, zum Beispiel Spurhaltesysteme, Brems- und Einparkassistenten. Bis zur Realisierung des vollautonomen Fahrens könnte bereits ein großer Teil der Verkehrsunfälle durch die Implementierung von ADAS verhindert werden.

Hochleistungsfähige Drahtloskonnektivität ohne Ausfallzeiten erhöht die Sicherheit im Straßenraum



Im Bereich Vernetzte Mobilität, Transport und Sicherheit wird Photonik vor allem bei der Steigerung der Energieeffizienz und der Emissionsreduktion zur Ressourcenschonung beitragen können. Die Reduktion der vom Individualverkehr verursachten Emissionen wird insbesondere durch autonomes Fahren ermöglicht werden. Bereits heute gibt Audi an, durch die aktuelle „adaptive-cruise-control“ (Vermeidung von übertriebenem Beschleunigen und Abbremsen, Einhaltung des Abstandes, Beachten von Tempolimits etc.) eine

Einsparung von bis zu 0,7 Litern pro 100 Kilometer zu erzielen. Die University of Michigan prognostiziert eine Reduktion des Energieverbrauchs und der Emissionen von 16% bei Berücksichtigung von Ökofahrprogrammen. Dementsprechend noch höher sind die Erwartungen bei voll-autonomen Fahren. Zur Schonung der Umwelt und Ressourcen trägt auch ein modernes, gut überwachttes Bahnnetz bei, indem mehr Züge gefahrlos auf demselben Schienennetz geführt werden können, und kleine, leichte UAVs können in manchen Anwendungen große Aufklärungshelikopter ersetzen.



zusätzlich durch lückenloses Verkehrsmonitoring und Gefahrenfrüherkennung. Global gesehen muss zudem mit steigendem Verkehrsaufkommen gerechnet werden, nachdem die Zahl an Individual-PKWs zunimmt. Da autonome Fahrzeuge miteinander und mit ihrer Umwelt kommunizieren, können optimale Beschleunigungs- und Bremsvorgänge gewählt werden, wodurch der Verkehrsfluss optimal erhalten bleibt. Eine Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen ist auf Grund der effizienten Fahrweise fahrerloser Autos zu erwarten.

Frequency Modulated Continuous Wave LiDAR (FMCW-LiDAR), flash-/LiDAR beziehungsweise ToF spielen auf dem Weg von ADAS in Richtung autonomes Fahren eine wichtige Rolle. **Das technologische Rückgrat vieler ADAS-Komponenten liefert die Photonik.** Kamera- und Radarsensoren oder LiDAR-Systeme unterstützen Lenker*innen und helfen Fehler oder in weiterer Folge Unfälle zu vermeiden. Schritt für Schritt finden immer ausgereiftere ADAS-Komponenten Einzug in die neuen Modelle der großen Automobilhersteller, wobei die Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen (C2C) oder aber mit Umwelt und Infrastruktur (Car2x) die Basis darstellt.

Aktuell stehen die Netzwerke für ADAS in Autos noch vor erheblichen Herausforderungen im Hinblick auf Datenraten, Komplexität und Gewicht, Sicherheit und Interferenzen mit direkten Auswirkungen auf Zuverlässigkeit, Sicherheit, Fahrverhalten und Kraftstoffverbrauch. Autonome Fahrzeuge sind derzeit als autarke Systeme konzipiert und verlassen sich ausschließlich auf bordeigene Sensoren. Diese Art der Systemstruktur produziert gewaltige Datenmengen, welche noch weiter ansteigen werden, je mehr ADAS-Komponenten zur Unterstützung und schlussendlich zur fahrerlosen Steuerung, implementiert werden. Die Photonik gilt

hier als Enabler, denn sie ermöglicht die nötige Rechenleistung auf minimalen Raum bei effizienter Datenübertragung unter Einsatz von FSO. Wie im Kapitel IKT (Seite 27) erläutert, bietet Photonik noch weitere Mittel, um diese Herausforderungen zu lösen.

Im Dunkeln sehen

LiDAR, eine laserbasierte Messmethode, gilt als vielversprechende Grundlage vieler ADAS-Anwendungen. Sie wurde während des Apollo-Raumfahrtprogrammes entwickelt, um die Oberfläche des Mondes zu kartografieren. Somit ist LiDAR per se keine vollständige technologische Neuentwicklung, aber erst jetzt ist es Unternehmen gelungen mit ausreichend Präzision zu arbeiten, um hochwertige 3D-Bilder zu erzeugen, welche für autonomes Fahren unbedingt notwendig sind. In Kombination mit hochauflösenden Kameras und konventioneller Radartechnologie wird LiDAR die Straßen sicherer machen. Europäische Hersteller der Automobilindustrie und ihr Netzwerk aus Zulieferern der Photonikindustrie – darunter viele Start-Ups und KMUs – machen rasche Fortschritte.

Aktuelle Weiterentwicklungen in den photonischen Technologien bieten die Möglichkeit, die bisherigen Herausforderungen der lückenlosen Umgebungsüberwachung und die damit einhergehenden riesigen Datenmengen zu bewältigen. Software-Algorithmen, intelligente Bildverarbeitung und automatisierte Antriebsausrüstung werden in Kombination mit flash-/LiDAR beziehungsweise ToF autonomes Fahren und Verkehrssicherheit auf die nächste Entwicklungsstufe bringen.

LiDAR zeichnet sich vor allem durch die schnelle Erfassung beweglicher Objekte unabhängig von geltenden Lichtverhältnissen bei hoher Auflösung und Detailgenauigkeit aus. Allerdings ist die komplexe Optik des LiDARs auf Grund der Größe, der beweglichen

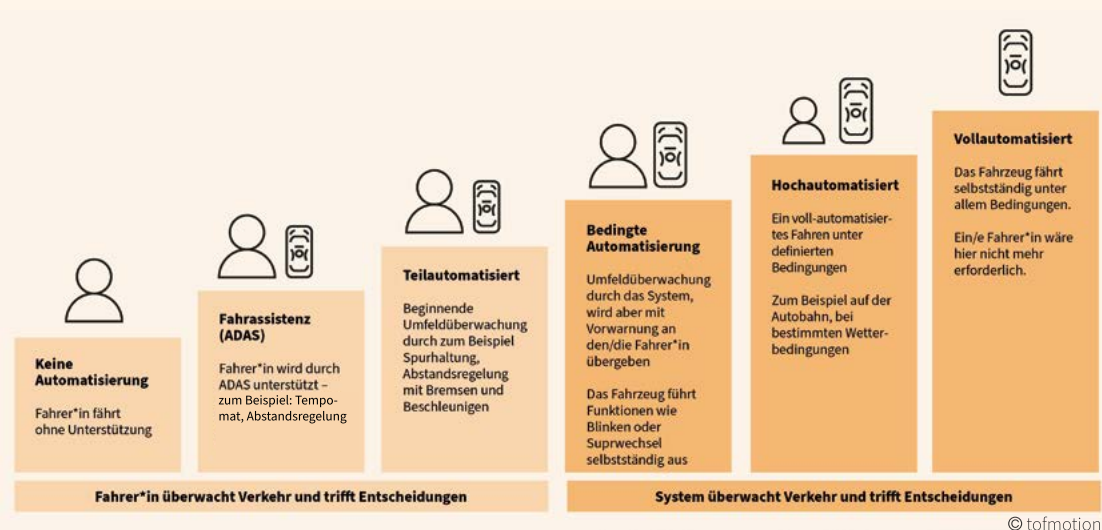


Abb. 3: Die 6 Evolutionsstufen vom konventionellen Fahren zum vollautomatisierten Fahren.

Komponenten und Spiegel derzeit die größte Hürde auf dem Weg zur kommerziellen Verwendung in der Automobilbranche. Ein Durchbruch konnte mit dem 3D-Flash-LiDAR erzielt werden. Dieser überwindet die üblichen Einschränkungen eines Lasers, ein sehr klares Sichtfeld zu benötigen. Stoppschilder, Fußgänger*innen und Laternenpfähle können so selbst bei Dämmerung, Dunkelheit, Staub, Nebel, Regen oder anderen ungünstigen Wetterverhältnissen gut erkannt werden. Die österreichischen Forschungsaktivitäten tragen maßgeblich dazu bei, durch die Etablierung von Produktionslinien die Serienfertigung einzuführen und damit die Kosten zu reduzieren.¹²

Infrastruktur gut behütet

Derzeit existiert eine Vielzahl verschiedener Sensorsysteme zur Überwachung von Verkehrsinfrastrukturen sowie zur Erkennung von sicherheitsrelevanten Ereignissen an deren Perimetern. Den bisher verwendeten Sensor-Systemen ist dabei gemein, dass die Messung und damit die Überwachung nur punktuell (z.B. Achszähler) oder auf kurzen Abschnitten (z.B. bei einer Videokamera) aber nicht lückenlos über große Bereiche in der Größenordnung von Kilometern gemacht werden können. Für eine lückenlose Zustands-, Verkehrs- und Sicherheitsüberwachung ist eine Sensorik erforderlich, die Messungen über weite Bereiche ermöglicht.

Faseroptisches DAS ist die Lösung für oben genanntes Problem und insbesondere die Bahn als ein wesentlicher Träger der Dekarbonisierung im Verkehr wird davon profitieren. Die Senkung der Initialkosten und zusätzlich eine erhebliche Reduktion der Wartungskosten durch Nutzung eines Sensors, anstatt der vielen entlang der Bahninfrastruktur installierten Einzelsensoren, und die Erfassung und Überwachung von Messwerten durch ein einziges bereits bestehendes Glasfaserkabel sind nur zwei der wesentlichen Vorteile von DAS. Die lückenlose **Überwachung von Infrastrukturen und hochgenaue Echtzeiterfassung und Verfolgung der Züge** mit DAS wird somit zukünftige Bahnsicherungskonzepte ergänzen.

DAS ist eine recht neue Technologie, die es erlaubt, große Bereiche über große Distanzen lückenlos zu messen und zu überwachen. Damit können mit einem einzi-

gen, schon verlegten Lichtwellenleiter-Kabel von bis zu 50 km Länge und mit nur einem aktiven Gerät sehr große Infrastrukturen oder Perimeter überwacht werden wie zum Beispiel die Fahrzeugverfolgung, Condition Monitoring der Infrastruktur, Naturgefahrenerkennung und die Ereignisdetektion von Vorfällen. Die einzige aktive Komponente in einem DAS Überwachungssystem ist das „Interrogator“-Gerät zur Erzeugung der Laserpulse für die Messung sowie die Auswertungshardware. Damit kann die gesamte aktive Hardware an einem Ort stehen, wodurch ein solches System verglichen mit anderer aktiver Sensorik, relativ wartungsarm wird.

So konnten das *AIT Austrian Institute of Technology* gemeinsam mit der *NBG FOSA* und der *Dr. Döller Vermessung ZT* bereits auf einer Bahnstrecke die gleichzeitige Felssturzdetection und Zuglaufverfolgung mit einem einzigen DAS System demonstrieren.

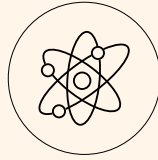
Statement

Autonome Mobilität und Transport sind die bedeutenden Trends und Ziele für die Zukunft. Die Photonik trägt maßgeblich zur Erreichung dieser Ziele bei. Um autonomes Fahren auf der Straße und Schiene zu entwickeln und Realität werden zu lassen, bedarf es entsprechender Rahmenbedingungen:

So sind beispielsweise für die Zulassung eines vollautomatisierten oder Fahrerlosen Fahrzeuges rund 200 Millionen Testkilometer gefordert. Das ist der Komplexität des Fahrzeuges, seinen unterschiedlichen Sensoren und den verschiedensten Szenarien geschuldet, die sich im Straßenverkehr und durch vorherrschende Umweltbedingungen ergeben. Hierfür wurden in den vergangenen Jahren auch in Österreich geeignete Teststrecken geschaffen, zum Beispiel *DigiTrans* und *ALP Lab* für den öffentlichen Personen und Warenverkehr oder *Open.Rail.Lab* für autonome Züge. Aber auch eine weitere Vertiefung auditierbarer und nachvollziehbarer KI und Simulationsszenarien muss geschaffen werden, wie etwa durch die Simulation von ToF Kameras unter Umweltbedingungen im *LIGATE* Konsortium¹³. Das erfordert die frühe Zusammenarbeit von Innovationstreibern und Normierungsinstituten, um zu gewährleisten, dass Innovationen nicht nur verfügbar sondern auch verwendbar sind. ●

Quellen:

¹ EU-Kommission, VCÖ 2020 | ² Klimaschutz zum Beispiel 2020, Umweltbundesamt; Werte mit EH | ³ Abschätzung der Gesundheitsauswirkungen von Schwebstoff in Österreich, Umweltbundesamt 3005: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0020.pdf> | ⁴ <https://www.gminsights.com/industry-analysis/automotive-lighting-market> | ⁵ Studie: Frost & Sullivan | ⁶ <https://www.hella.com/hella-com/de/Scheinwerfer-620.htm1> | ⁷ <https://zkw-group.com/home/produkte-und-innovationen/ferlicht-ohne-blenden/> | ⁸ <https://zkw-group.com/home/produkte-und-innovationen/eine-leuchtende-innovation/> | ⁹ <https://www.kiras.at/gefoerderte-projekte/detail/d/durchblick/> | ¹⁰ <https://www.kiras.at/gefoerderte-projekte/detail/d/uav-getragene-sensorik-zur-ki-basierten-unterstuetzung-von-rettungsmissionen/> | ¹¹ Statistik Austria: Erwerbstätige nach Pendelziel 2018 | ¹² ERA-NET Photonic Sensing Dissemination Event, Dr. Bernhard Schrenk | ¹³ <https://www.ligateproject.eu/consortium.html>



Photonische Quanten-Technologien

Die wenigsten Nutzer*innen moderner Informationstechnologien sind sich bewusst, dass deren Grundlage die Quantenphysik ist. Die Eigenschaften der Materialien und die Funktionalität der verwendeten Halbleiterbauelemente können nur mit der Quantentheorie erklärt, modelliert und optimiert werden. Den Entwickler*innen klassischer Informationstechnologien kommt allerdings entgegen, dass die bizarr anmutenden Effekte, die eigentlichen Quanteneigenschaften, gut verborgen bleiben und bei üblichen Umgebungstemperaturen und Abmessungen der Komponenten verschwinden. Nun ist aber die relevante Region eines aktuellen Transistors nur circa acht Nanometer dick, was circa 35 Atomlagen entspricht. Damit kommt man in Bereiche, wo Quanteneffekte eine Rolle spielen könnten.

erforderlich wäre. Die größten Supercomputer können derzeit ein System von maximal circa 50 Teilchen voll simulieren. In Anwendungen wie der Entwicklung neuer Medikamente, wo man die Struktur komplexer Biomoleküle berechnen möchte, oder der Katalyse zum Beispiel zur energieeffizienten Stickstofffixierung, ist es äußerst wichtig, noch viel größere Systeme von Quantenteilchen genau simulieren zu können. Schon in den 1980er Jahren schlug daher Richard Feynman vor, dass man Quantensysteme mit Hilfe anderer, kontrollierbarer Quantensysteme simulieren sollte. Umso überraschender war dann, dass man in den 1990er Jahren herausfand, dass sogenannte Quantencomputer auch gewisse Aufgaben in der klassischen Informatik sehr effizient lösen können, beispielsweise die Entschlüsselung von Informationen. Gerade das Abhören wird jedoch durch eine weitere Quantentechnologie verunmöglicht: Die von Charles Bennett und Gilles Brassard in den 1980er Jahren erfundene Quantenkryptographie.

Diese gezielte Ausnutzung von Quanteneffekten wird häufig als die zweite Quantenrevolution bezeichnet, nachdem uns die erste das Verständnis der Materialien und Funktionen von Bauteilen ermöglicht hat. **Österreich ist seit den frühen 1990er Jahren führend in der Quanten-Grundlagenforschung** dabei und hat sehr viele „Weltrekorde“ hervorgebracht, wie zum Beispiel die erste Quantenteleportation. Erst langsam beginnt dagegen die industrielle Umsetzung der wissenschaftlichen Erkenntnisse auch in Österreich. Primär durch die Quantenkryptographie ergeben sich viele Verbindungen zur Photonik, wobei photonische Technologien auch im Bau von Quantencomputern, zum Beispiel basierend auf gefangenen Ionen, essenziell sind. Die Weiterentwicklung dieser photonischen Technologien geht also Hand in Hand mit dem Wettbewerb um die Vorherrschaft bei den Quantentechnologien der Zukunft.

Nationale Highlights

Einer der ersten Vorschläge für die Realisierung eines Quantencomputers kam 1995 von Peter Zoller und

45



Abb. 1: Quantencomputer von AQT.

Umgekehrt ist schon seit den Anfängen der Quantentheorie klar, dass quantenphysikalische Systeme aus mehreren Teilchen nur sehr aufwendig mit herkömmlichen Methoden der numerischen Mathematik berechnet werden können, da immenser Speicherplatz

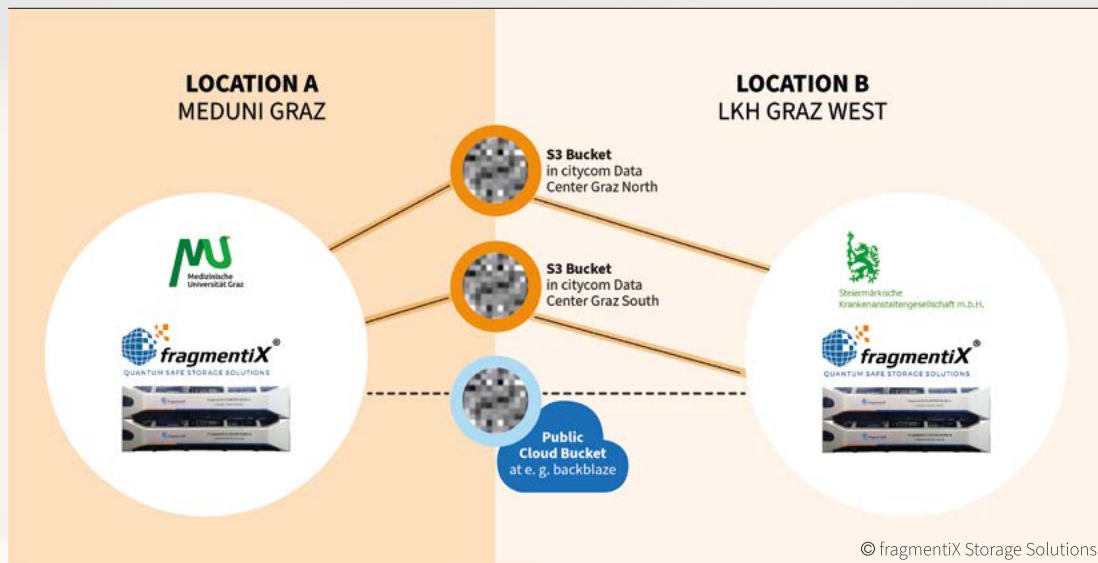


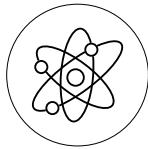
Abb. 2: Schematische Darstellung des QKD Netzwerkes in Graz.

Ignacio Cirac an der *Universität Innsbruck*.¹ Auch wenn es noch ein weiter Weg bis zur praktischen Realisierung war, baut die Firma *Alpine Quantum Technologies (AQT)* heute **erste serienreife Quantencomputer** deren Kern auf wenigen gefangenen atomaren Ionen beruht. In einer elektrischen Falle im Vakuum werden die Ionen gehalten und mit Lasern gekühlt. Speziell geformte Laserpulse führen dann die Quantengatter-Operationen aus und eine Reihe von Gatter-Operationen bildet die Verarbeitung der Quanteninformation. Mehrere photonische Technologien kommen in diesem Quantencomputer zum Einsatz, schmalbandige Laser, optische Wellenleiter, akusto-optische Modulatoren und auch das Auslesen der Ergebnisse erfolgt durch das Zählen von Fluoreszenzphotonen. Dass das alles innerhalb von zwei 19" Racks möglich ist, konnte AQT Anfang 2021 mit einem 50-qubit Quantencomputer demonstrieren, inklusive genauer Kontrolle der einzelnen Ionen und dem Nachweis eines 24-qubit verschränkten Zustands.² Damit ist Österreich im Wettbewerb um anwendungsreife Quantencomputer weit vorne.

Die **Sicherung von medizinischen und biometrischen Daten** gewinnt an immer größerer Bedeutung. In Österreich wurde nun erstmals, im Rahmen des vom *AIT Austrian Institute of Technology* koordinierten H2020 Projektes „OPENQKD“, die Sicherung dieser hoch sensiblen Daten während der Übertragung als auch im (Daten-)Speicher demonstriert. Die *Medizinische Universität Graz*, zusammen mit dem *Landeskrankenhaus Graz-West*, nahmen dafür Slide-Scans aus der

Pathologie zum Zwecke der digitalen Diagnostik auf. Diese Daten wurden im Glasfasernetz der Grazer *Citycom Telekommunikation* verteilt und in deren Rechenzentren abgespeichert. Die Sicherung der Daten in den Rechenzentren erfolgte mittels Secret-Sharing (Geheimnisteilung). Dabei werden die Daten nach den von Adi Shamir 1979 entwickelten Algorithmen in eine frei wählbare Anzahl von Fragmenten zerteilt. Es wird gleichzeitig auch festgelegt, wie viele dieser Fragmente erforderlich sind, um die Originaldaten wieder lesen zu können. Ein Datenleck in einem der Rechenzentren wäre damit kein Problem. Die Server für das Secret-Sharing wurden von der *fragmentiX Storage Solutions* im Grazer Netzwerk installiert und an die jeweiligen Datenspeicher und medizinischen Abteilungen angebunden. Um die Daten auch während der Übertragung zu den Rechenzentren zu schützen, wurde zusätzlich eine Verschlüsselung auf Basis der Quantenschlüsselverteilung eingesetzt. Dieser, auf Naturgesetzen beruhende Austausch von symmetrischen Schlüsseln wird genutzt, um eine absolute abhörsichere Verschlüsselung der Daten über die Glasfaser zu ermöglichen. Das Netzwerk in Graz bestand aus insgesamt vier Knoten mit 50 km Glasfaserverbindungen und wurde für drei Monate im Realbetrieb getestet.

Diamanten sind zwar hauptsächlich als wertvolle Juwelen bekannt, finden aber, aufgrund ihrer Transparenz, herausragenden Härte, und außerordentlichen Wärmeleitfähigkeit, zunehmend ihren Weg in die Technologie. In der Photonik sind Diamanten unter anderem wegen ihrer Farbzentren bekannt, welche auffällig robuste



Quantenzustände besitzen. Diese Farbzentren können in der Quantenkommunikation eingesetzt werden,³ funktionieren jedoch auch als hochempfindliche **Quantensensoren**, insbesondere für die Messung von Magnetfeldern.⁴ Solche Sensoren können sogar das Magnetfeld einzelner Atomkerne messen und sind daher zum Beispiel für mikroskopische Magnetresonanzsysteme von Interesse. Mithilfe der weltweit führenden Elektronikentwicklung von *Infineon* konnte an der *Universität Wien* ein großer Schritt gemacht werden, um diese Quantensensoren zu miniaturisierten und zu kommerziellen Komponenten zu entwickeln. In Zusammenarbeit mit *SAL* und *Philips Austria* werden nun weitere Ansätze zur Systemintegration und kommerziellen Anwendung untersucht.

Im Fokus

Quantenkommunikation

Die Quantenkommunikation beschäftigt sich mit der Übertragung von **Quantenzuständen zum Zwecke des Informationsaustausches**. Da Photonen (einzelne Lichtteilchen), sich besonders gut für die Übertragung eignen, ist dieses Gebiet der Quantentechnologien sehr eng mit der Photonik verbunden. Da sich die Photonen nach quantenmechanischen Gesetzen verhalten, ergeben sich in der Quantenkommunikation

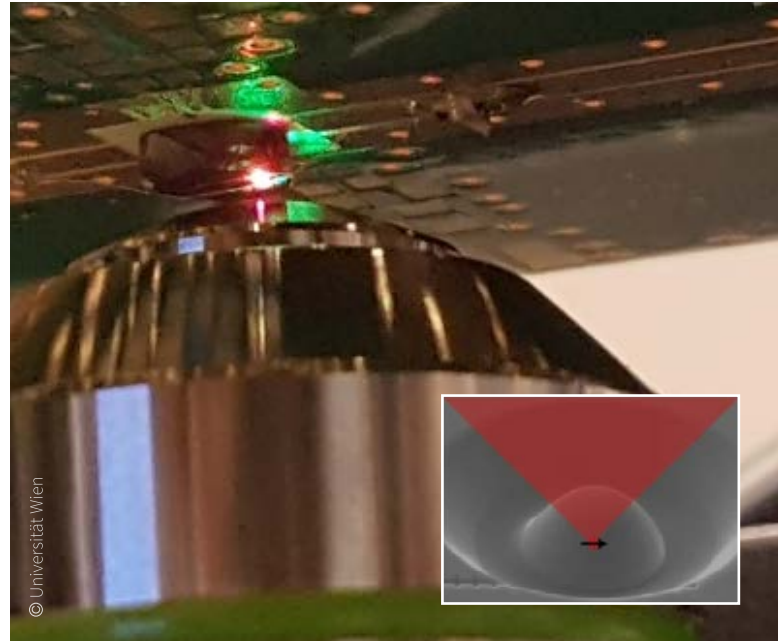
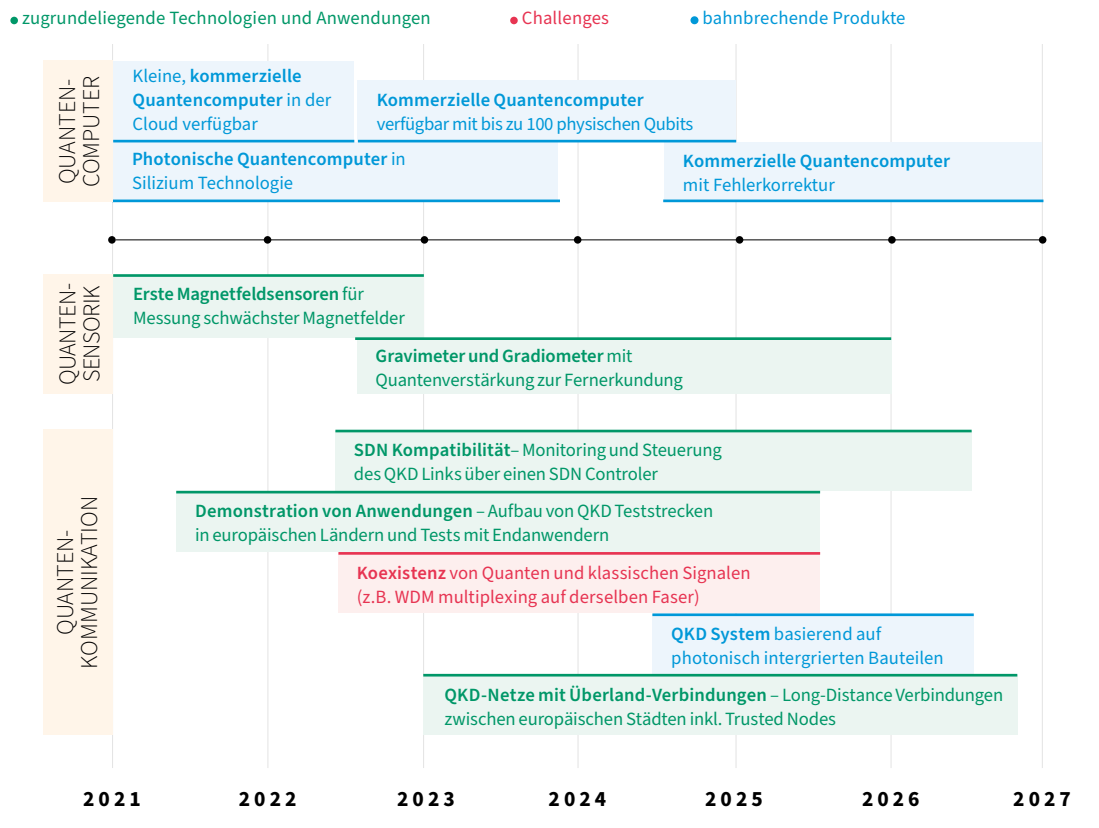


Abb. 3: Zur Steigerung der Photonenausbeute werden Mikrolinsen (0,01 mm) direkt über dem Farbzentrum im Diamanten erzeugt. Für Quantensensorik werden dotierte Diamanten mit mikroelektronischen Komponenten integriert.

neue Anwendungsfelder, wie zum Beispiel die **Quantenkryptographie**. Dort ist es möglich, neue kryptographische Primitive zu entwickeln, die erhöhte Sicherheit gegenüber Angriffen aufweisen. Das bekannteste Beispiel ist die **Quantenschlüsselüber-**

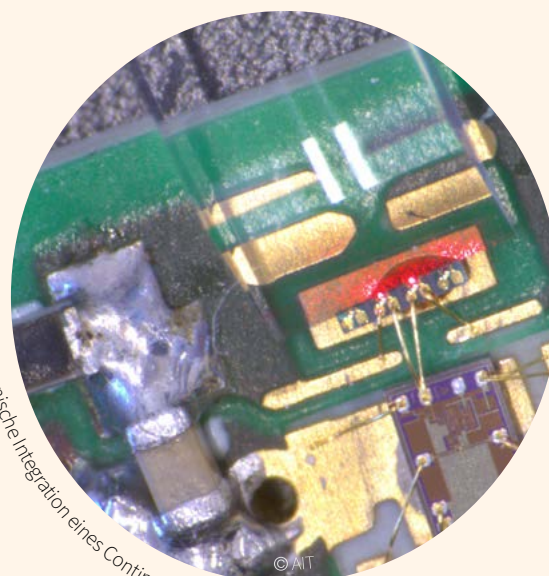
TIMELINE



tragung (engl. Quantum Key Distribution – QKD),

bei der ein symmetrischer Schlüssel zwischen zwei Kommunikationspartnern ausgetauscht wird. Dieser Schlüssel kann dann wiederum in einem klassischen Verschlüsselungsverfahren wie zum Beispiel Advanced Encryption Standard eingesetzt werden. Der Vorteil von QKD besteht darin, dass die Schlüsselübertragung auf Einzelphotonen beruht und daher Sicherheit gegen alle erdenklichen Attacks bietet, wie auch gegen Angriffe eines Quantencomputers, der die Schlüsselübertragung mit der derzeit eingesetzten Public-Key-Infrastruktur sehr schnell brechen kann. Die Grundlagen der QKD sind bereits gut erforscht und es wird nun vermehrt die Alltagstauglichkeit dieser Technologie getestet. Dafür werden Prototypen oder auch schon kommerzielle QKD Systeme zusammen mit den Endanwendern im Feld eingesetzt. Die derzeitigen QKD Systeme beruhen auf diskreten optischen Komponenten wie Laser, Phasen- und Amplituden-Modulatoren Detektoren et cetera mit einem 19-Zoll Form-Faktor für die Installation in Server Racks. Um die Verbreitung weiter voranzutreiben und auch Kosten zu senken, ist eine Miniaturisierung der elektro-optischen Elemente unausweichlich. In vielen Labors werden dafür erste Schritte gesetzt und Teile eines QKD Systems auf photonischen Chips implementiert. Dabei werden meist Chips auf Silizium-, Siliziumnitrid- oder Indium-Phosphid-Basis eingesetzt um in den Sendeeinheiten die Symbolrate (>1 GHz) zu erhöhen, die Verluste in den Empfängereinheiten zu verringern und generell die Stabilität und Anbindung an die elektronischen Steuereinheiten zu verbessern. Ein Problem stellt noch die Miniaturisierung der Einzelphotonendetektoren dar, da diese meist auf (handverlesenen) Lawinendiioden beruhen, die stark gekühlt werden müssen, um das Hintergrundrauschen zu unterdrücken und gerade bei 1550 nm eine schlechte Leistungsbilanz aufweisen. Den Ausweg ermöglicht eine besondere QKD Implementierung, die nicht auf Einzelphotonendetektion angewiesen ist. Für die sogenannte CV-QKD (Continuous-Variable QKD) wird die Schlüsselinformation im Phasenraum kodiert, ähnlich der Quadratur-Amplituden-Modulation, und die Quantensignale mit Hilfe von kohärenter

Abb. 4:



Photonische Integration eines Continuous Variable Quanten Receivers.

Detektion gemessen. Synergien mit der klassischen optischen Kommunikation sind dabei offensichtlich und können der CV-QKD zu weiter Verbreitung verhelfen.

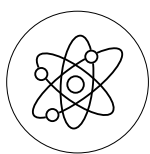
Eine weitere Anwendung der Quantenkommunikation, die auch stark von der photonischen Integration profitiert, ist der **Quantenzufallszahlengenerator/Quantum Random Number Generator (QRNG)**. Einfacher aufgebaut als ein QKD System, weil die Übertragung entfällt, generiert ein QRNG einen Fluss an binären Zufallszahlen. Die Zufälligkeit beruht dabei auf der intrinsischen probabilistischen Beschreibung von Quanteneffekten, wie die „Welcher-Weg“ Messung eines Photons am Strahlteiler. Dadurch ist es nicht möglich, die Zahlenfolge vorherzusagen oder anhand von Zusatzmessungen zu eruieren. Die Zufallszahlen eignen sich daher sehr gut für kryptographische Anwendungen wo eine sehr hohe Unberechenbarkeit nötig ist. QRNGs von wenigen Millimetern Größe können heutzutage bereits auf photonischen Chips hergestellt werden.

Das dritte Anwendungsgebiet in der Quantenkommunikation ist der **Quanten-Repeater**.⁵ Hierbei handelt es sich um eine Kommunikationsverbindung zwischen zwei entfernten Punkten bei der quantenmechanische



Die Quantentechnologie eröffnet neue Möglichkeiten in vielen Bereichen. In ferner Zukunft könnten energieeffiziente, kleine Quantencomputer herkömmliche Großrechner ersetzen, was zu einer merklichen Reduktion des CO₂-Fußabdrucks führen würde. Darüber hinaus ermöglichen Quantencompu-

ter aber auch die Simulation bisher nicht berechenbarer Quantensysteme. Quantencomputer könnten helfen große Moleküle und deren Zusammenspiel in chemischen und biologischen Prozessen zu verstehen und damit neue Möglichkeiten bei der Entwicklung von Medikamenten oder effizienten Katalysatoren schaffen.



Information übertragen wird. Der Vorteil dabei ist, dass der Zustand nicht gemessen werden muss und somit auch Überlagerungen von Zuständen übermittelt werden können. Ein sehr wichtiger Baustein eines Quanten-Repeaters ist neben den verschränkten Photonen auch der sogenannte Quantenspeicher, der die Information eines ankommenden Photons für kurze Zeit speichern und dann weiterverarbeiten muss. Dafür kommen auch Technologien aus Quantencomputern und Quantensensorik zum Einsatz, wie zum Beispiel Ionenfallen oder Farbzentren. Mit Quanten-Repeatern können Quanten-Computer vernetzt werden, um eine gemeinsame Berechnung über getrennte Standorte hinweg zu ermöglichen. Repeater stellen auch eine Möglichkeit dar, QKD über lange Distanzen (>500 km) zu betreiben, da einzelne Punkt-zu-Punkt QKD Verbindungen diese Distanzen auf Grund der Verluste in optischen Fasern nicht überbrücken können. Die Erforschung der Quanten-Repeater wird daher sehr stark vorangetrieben, befindet sich aber noch in einem Anfangsstadium, weil die benötigte Technologie ebenso aufwändig wie bei einem Quantencomputer ist.

Quantencomputer

Wie einleitend beschrieben, versprechen Quantencomputer wichtige, aber **bisher praktisch unlösbare Fragestellungen effizient berechnen** zu können. Sie tun das, indem die Grundeinheit der Information nicht ein binäres Bit, sondern ein sogenanntes Qubit ist, also ein quantenmechanisches Zweizustandssystem, welches

kontinuierliche Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Im Gegensatz zum früher verfolgten Nischenthema des Analogcomputers kommt aber noch die wichtige Eigenschaft dazu, dass mehrere Qubits in gemeinsamen Überlagerungszuständen, sogenannten verschränkten Zuständen, sein können. Das macht einerseits die Simulation quantenmechanischer Systeme schwierig und ist andererseits ein mächtiges Werkzeug, wenn man es schafft diese Zustände kontrolliert herzustellen und zu manipulieren. Der Quantencomputer rechnet damit in gewissem Sinn unzählige Möglichkeiten gleichzeitig aus, und durch geschickte Berechnungsalgorithmen kann man diese Parallelität nutzen. Das heißt nicht, dass jede Art von Berechnung beschleunigt wird, aber es gibt wichtige Anwendungsfälle, wie das Suchen in einer unsortierten Datenbank, das Faktorisieren von Zahlen und die Simulation relevanter Quantensysteme, wie zum Beispiel großer Biomoleküle für die Entwicklung von Medikamenten.

Alle führenden Industrienationen und einige große internationale Unternehmen investieren daher derzeit massiv in die Entwicklung von Quantencomputern. Unter den möglichen Hardware-Plattformen sind drei besonders weit fortgeschritten: 1) supraleitende Quantencomputer, 2) Quantencomputer basierend auf Ionen und 3) rein photonische Quantencomputer. Sowohl bei den Ionen- als auch bei den Photonen-basierten Quantencomputern ist die österreichische Forschung und Industrie in einer weltweit anerkannten Position. Die supraleitenden Quantencomputer erregten vor allem durch



Abb. 5: Pine-Ionenfalle von AQT.

die Demonstration von Quantenüberlegenheit durch Google im Jahr 2019 Aufsehen.⁶ Quantenüberlegenheit soll heißen, dass ein realer Quantencomputer ein gewähltes Berechnungsproblem deutlich schneller als alle existierenden herkömmlichen Computer lösen kann und dass dieser Geschwindigkeitsvorteil für größere Berechnungen noch zunimmt. Eine solche Quantenüberlegenheit wurde Anfang 2021 von einer chinesischen Forschungsgruppe auch für einen rein photonischen Quantencomputer gezeigt mit einem immensen Aufwand für die experimentelle Umsetzung.⁷ In Öster-

aufgrund der Quantisierung des Lichtfelds (Photonen). **In der Quantensensorik geht es daher vornehmlich darum, diese hinderlichen Effekte auszuschalten** beziehungsweise umgekehrt durch gezielte Präparation der Quantensysteme die Eigenschaften der Quantenphysik vorteilhaft nutzbar zu machen. Das Paradebeispiel ist die Idee gezielt einen sogenannten verschränkten Zustand vieler Teilchen (z.B. Atome) herzustellen, welcher dann wesentlich empfindlicher auf die Messgröße, etwa ein extrem schwaches Magnetfeld, reagiert als wenn man dieselbe Anzahl von Teilchen unabhängig der Messgröße aussetzt. Damit kann man theoretisch die aus der klassischen Messtechnik wohlbekannte Skalierung der Messgenauigkeit mit der Wurzel aus der Zahl der Versuche (= Teilchen) in eine proportionale Abhängigkeit verbessern. Man nennt das das Heisenberg-Limit. Das heißt, dass ein solcher Quantensensor viel weniger Versuche, Teilchen, oder Mittelungszeit benötigt als ein herkömmlicher. In der Praxis zeigt sich allerdings oft, dass das Herstellen des gewünschten Zustands auch mit erhöhtem Aufwand verbunden ist, und damit kommt es auf das konkrete Ziel der Messung an, ob sich dieser lohnt. Lohnende Anwendungsmöglichkeiten gibt es zur Genüge, zum Beispiel in der Erkundung neuer Rohstoff-Lagerstätten, in der Seismologie oder beim Nachweis von Gravitationswellen. Bei letzteren Experimenten werden heute schon Quantenzustände eingesetzt, um die kilometerlangen Interferometer noch empfindlicher zu machen.

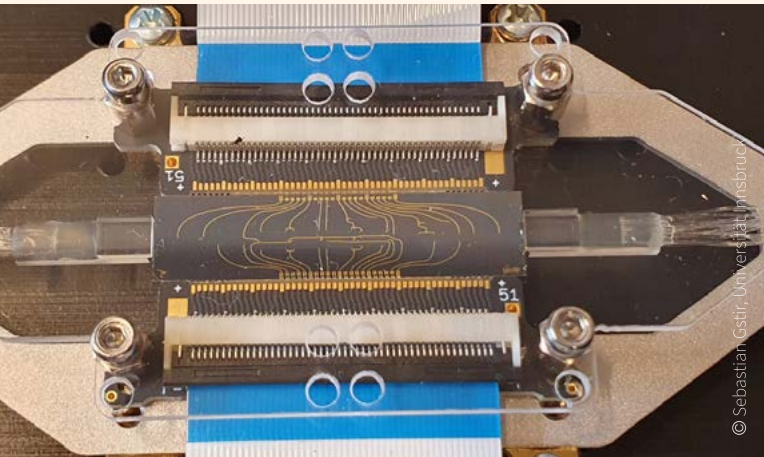


Abb. 6: Beispiel eines integrierten photonischen Schaltkreises für optische Quantencomputertechnologie

reich wird an den *Universitäten Wien und Innsbruck* an photonischen Quantencomputern geforscht. Um diese Forschung näher zur Anwendung zu bringen wurde 2020 das *Christian-Doppler Labor für Optische Quantencomputer* unter der Leitung von Philip Walther eröffnet.

Dabei gehen die benötigten photonischen Technologien mit dem Stand der F&E von Quantencomputern Hand-in-Hand. Insbesondere präzise Laser, verlustarme Wellenleitertechnologien in integrierten Schaltkreisen, schnelle Phasen- und Amplitudenmodulatoren und Einzelphotonendetektoren auf Basis supraleitender Nanodrähte oder von Lawinphotodioden werden benötigt, um mit der internationalen Konkurrenz mithalten zu können.

Quantensensorik

Das empfindliche Messen sehr kleiner Größen und schwacher Effekte führt in der herkömmlichen, klassischen Messtechnik oft unweigerlich zu Effekten der Quantenmechanik, zum Beispiel dem Schrotrauschen

Neben der Ausnutzung von Quantenzuständen fällt in das Gebiet der Quantensensorik auch noch die Verwendung einzelner Quantensysteme, wie zum Beispiel eines einzelnen Atoms, Ions, Photons, und vor allem eines einzelnen Farbzentrons zum Beispiel in einem Nanodiamanten als Sensor, welcher dann mit quantenphysikalischen Methoden ausgelesen wird. Ein Beispiel dafür findet sich unter den Highlights oben.

Es gibt auch noch andere Techniken, die im weiteren Sinn in das Gebiet der Quantensensorik fallen. Dazu zählt die **Quanten-Bildgebung**, wo verschränkte Zustände von Licht dazu benutzt werden können, Objekte mit ansonsten unerreichbarer Auflösung abzubilden. In eine ähnliche Kerbe schlägt die Quanten-Beleuchtung, manchmal auch Quanten-Radar genannt, wo Objekte lokalisiert werden können, ohne dass die Positionsbestimmung selbst nachweisbar ist, also ein Radar für das es keine Warneinrichtung geben kann. ●

Quellen:

¹ J. I. Cirac, and P. Zoller, Quantum computations with cold trapped ions, *Phys. Rev. Lett.* 74, 4091 (1995). | ² I. Pogorelov, T. Feldker, C. D. Marciniak, L. Postler, G. Jacob, et al., Compact Ion-Trap Quantum Computing Demonstrator, *PRX Quantum* 2, 020343 (2021), <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.2.020343>. | ³ Scalable spin-photon entanglement by time-to-polarization conversion, *npj Quantum Information* (nature.com) | ⁴ Photoelectrical imaging and coherent spin-state readout of single nitrogen-vacancy centers in diamond | *Science* (sciencemag.org) | ⁵ H.-J. Briegel, W. Dür, J. I. Cirac, and P. Zoller, Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication, *Phys. Rev. Lett.* 81, 5932 (1998), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5932>. | ⁶ F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, et al., Quantum supremacy using a programmable superconducting processor, *Nature* 574, 505 (2019), <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>. | ⁷ H.-S. Zhong, H. Wang, Y.-H. Deng, M.-C. Chen, L.-C. Peng, et al., Quantum computational advantage using photons, *Science* 370, 1460 (2020), <https://doi.org/10.1126/science.abe8770>.



Abb. 1: Studenten werden bei einem Workshop an der FH Vorarlberg an das Thema optische Datenübertragung herangeführt.

© Dana Seyringer

Bildung, Training und Grundlagenforschung

Der technologische Fortschritt als ein zentraler Aspekt unserer gesellschaftlichen Entwicklung beruht auf dem Wissen, der Expertise und der Motivation gut ausgebildeter Menschen. Die lebenslange **Bildung** ist eine Grundvoraussetzung für die langfristige Entwicklung der photonischen Technologien, muss somit bereits in jungen Jahren beginnen und in jedem Entwicklungsszenario einen entsprechend prominenten Platz einnehmen. Daneben macht es die rasche technologische Entwicklung nötig, durch Weiter- und Fortbildungsmaßnahmen, also entsprechendes (berufsbegleitendes) **Training**, Wissen und Expertise nachhaltig zu sichern.

Die Photonik ist in Österreich als Lehrinhalt in den universitären Bachelor- und Masterstudiengängen der Physik und Elektrotechnik verankert. Die entsprechenden Inhalte werden an den *Technischen Universitäten Wien und Graz* und den *Universitäten Wien, Graz, Linz, Innsbruck und Salzburg* (Lehramt) vermittelt. An der *TU Wien* besteht seit 2013 das Masterstudium Mikro-

elektronik und Photonik, mit etwa zehn Absolvent*innen pro Jahr. Im Rahmen der Spezialisierung im Master- beziehungsweise Dissertationsstudium können Abschlussarbeiten zu einer breiten Palette praktisch aller aktuellen photonischen Forschungsbereiche verfasst werden. An der *FH Vorarlberg* sind Optik und Photonik Teil des Lehrplans und decken die Themen Laser und Materialbearbeitung, optische Sensoren und Datenübertragung sowie Anwendungen in der Medizin ab. Es werden regelmäßig Projekt- und Masterarbeiten durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen, sowie Dissertant*innen betreut. Selbiges gilt für die *FH Technikum Wien* mit den Schwerpunkten IT Security, Medical Engineering und Optoelektronik und mehreren optischen Ausbildungslabors, unter anderem zur Quantenkryptographie und optischer Biophysik.

Um aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen zu begegnen und innovative, nachhaltige wissenschaftliche und technologische Lösungen entwickeln zu

können, braucht es exzellent ausgebildete und motivierte junge Menschen und entsprechende Rahmenbedingungen. Der **Grundlagenforschung** als Voraussetzung für jegliche technologische Innovation kommt dabei die zentrale Rolle zu. Dementsprechend nehmen in dieser Roadmap die Forschung und deren Entwicklungsszenarien im Rahmen der jeweiligen thematischen Schwerpunkte einen breiten Raum ein. Das Folgende ist somit auf die allgemeinen Aspekte und die in allen Bereichen gemeinsamen Anforderungen beschränkt.

Die photonische Grundlagenforschung in Österreich umfasst Schwerpunkte wie Kurzpuls laser, Quantenoptik und -kommunikation, Optoelektronik, Mikro- und Nano-Photonik. Dazu sind diverse spektroskopische Methoden, photonische Messkonzepte, Detektoren und Sensoren, integrierte Optik, Silizium-Photonik, photonische Kristalle, Laser-Materialbearbeitung, optische Kommunikation sowie Licht- und Beleuchtungstechnologien prominent vertreten. In vielen dieser Bereiche wird Forschung auf internationalem Spitzenniveau betrieben. Jedoch sehen sich praktisch alle Forschungsfelder der Herausforderung steigender Kosten für die experimentelle und technische Infrastruktur gegenüber.

Nationale Highlights

Bildung und Jugendarbeit – Der Photonics Explorer

Der *Photonics Explorer* bietet für Schulpflichtige aller Altersklassen eine umfangreiche Sammlung von spannenden und lehrreichen Experimenten, um mittels forschenden Lernens die Grundzüge der Photonik kennenzulernen. Der Photonics Explorer umfasst einerseits Unterlagen für pädagogisches Personal, die damit Experimente mit wenig Aufwand in ihren Unterricht integrieren können. Andererseits enthält er in zehnfacher Ausfertigung alle technischen Komponenten, welche für die Durchführung von Experimenten zu Themen wie Farben, Linsen, Beugung oder Polarisation nötig sind.

Das Material ist für Klassengrößen bis 30 Schüler*innen in Dreier-Gruppen konzipiert. Integraler Bestandteil des Photonics Explorer Konzeptes ist auch eine vorangestellte Unterweisung der Lehrkräfte, die über die pädagogischen Hochschulen im Rahmen von Fortbildungsveranstaltungen erfolgt. Ansprechpartner für

den Bezug des Photonics Explorer sowie die Organisation der Fortbildungen ist *Photonics Austria*.

Im Rahmen des geförderten Projekts „*Phorsch! – Photonik für Schulen*“¹ wird die Photonik als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts mit dem Photonics Explorer erfassbar gemacht. Dabei wurden bereits kurze Videoclips zu den einzelnen Versuchen erstellt, um die Schüler*innen zum selbstständigen Experimentieren zu motivieren, Barrieren abzubauen und den Lehrkräften Hintergrundinformationen zu den Versuchen zu bieten.

Grundlagenforschung – Spezialforschungsbereiche

Junge Wissenschaftler*innen werden an österreichischen Universitäten auf internationalem Niveau in der Photonik ausgebildet. Im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten tragen Master- und Doktoratsstudent*innen speziell in Netzwerkprojekten stark zum Fortschritt der Grundlagenforschung bei.

So wurden beispielsweise im *Österreichischer Fond zur Förderung wissenschaftlicher Forschung (FWF) Spezialforschungsbereich IR-ON* neue photonische Bauelemente im infraroten Wellenlängenbereich entwickelt. Viele chemische Verbindungen (Medikamente, Sprengstoffe, Drogen, Umweltgifte) lassen sich durch ihr Verhalten im infraroten Spektralbereich eindeutig und schnell zuordnen. Dieses Forschungsprogramm wurde von führenden österreichischen Halbleiter- und Nanotechnologie-Gruppen der *TU Wien* und der *Universität Linz*, sowie von Simulationsgruppen an der *Universität Wien* und der *TU München* getragen.

Neuartige effiziente und im Nanometermaßstab maßgeschneiderte Photonenquellen wurden im FWF Spezialforschungsbereich NextLite erforscht und entwickelt. Experimentelle und theoretische Gruppen in Wien, Graz, Innsbruck und Wien haben dabei ihre Forschungsschwerpunkte zur Umsetzung völlig neuartiger Konzepte gebündelt.

Im Fokus

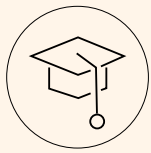
Bildung & Training

Im universitären Studium auf Bachelorniveau werden die Grundlagen der Optik und Photonik vermittelt, deren Inhalte im Allgemeinen keiner Aktualisierung



Die Grundlagenforschung entwickelt jene Konzepte, welche, in den Technologiefeldern der Photonik umgesetzt zu Anwendungen mit mehr Effizienz, geringerem Ressourcenverbrauch und weniger

Emissionen führen – kurz, welche Green Photonics erst möglich machen. Dazu legt eine neue Generation von exzellent ausgebildeten Wissenschaftler*innen ein verstärktes Augenmerk auf umweltschonende und nachhaltige Entwicklungen.



bedürfen. Die Lehrinhalte der folgenden **Masterstudien** sind aber sehr wohl von den disruptiven Entwicklungen und dem raschen technologischen Fortschritt der Photonik betroffen und verdienen somit verstärkte Aufmerksamkeit bezüglich ihrer Anpassung. Dies betrifft sowohl photonische Kernthemen deren aktuelle Entwicklungen beispielsweise in der Quanten-, Ultrakurzzeit- oder Nanooptik liegen, als auch Bereiche, welche vermehrt in die Photonik Eingang finden werden, wie etwa IT und KI. Zum einen sollten solche Anpassungen nicht punktuell, sondern abgestimmt zwischen den Bildungseinrichtungen im Bundesgebiet geschehen. Zum anderen ist ein langfristig angelegtes entsprechendes Monitoring-Programm wünschenswert. Beides könnte ein Gremium aus Vertreter*innen der Bildungseinrichtungen sicherstellen.

Basierend auf den Erfahrungen aus dem **Mikroelektronik und Photonik Programm** der TU Wien sollen regelmäßig Bedarf und Möglichkeit für weitere Masterstudien mit Schwerpunkt auf photonischen Themen evaluiert werden. Hierfür kann auch auf die entsprechenden internationalen Erfahrungen zurückgegriffen werden, sind doch Masterstudien Photonik an manchen europäischen Universitäten mit entsprechend hoher Zahl an Studierenden etabliert, beispielsweise in Jena, Karlsruhe, Münster, oder am Imperial College London. Einen besonders interessanten Ansatz verfolgt das von Universitäten in Marseille, Karlsruhe, Barcelona, Tampere und Vilnius gemeinsam durchgeführte **EuroPhotonics** Masterstudium. Dadurch wird der gesamteuropäische Aspekt photonischer F&E bereits im Studium vermittelt und die breite fachliche Ausbildung, die Mobilität, aber auch die Vernetzung künftiger photonischer Fachkräfte gefördert.

Ein langfristiges Ziel muss auch die Erhöhung der Anzahl der Studierenden sein. Um die Photonik geschlechtsneutral „cool“ zu machen, sind erweiterte und neue Ansätze bei der Vermittlung photonischer Themen in der **schulischen Ausbildung** aller Altersstufen nötig. Beispielsweise steht mit dem **Photonics Explorer** ein bewährtes Lehrmittel zur Verfügung, dessen Nutzung durch die Schüler*innen, begleitet von Programmen zur Lehrer*innen-Fortbildung samt frei zugänglichen Anleitungsvideos im Bundesgebiet deutlich ausgeweitet werden kann. Dies gilt einerseits auch für bewährte Formate, welche photonische Inhalte in spielerischer und altersgerechter Form vermitteln, wie etwa Kinderuniversitäten oder spezielle Angebote bei Veranstaltungen wie der Langen Nacht der Forschung (z.B. *FH Vorarlberg*²). Andererseits wurden in letzter

Zeit vermehrt individuelle Schulpartnerschaften aufgesetzt, wie die Kooperation der *FH Technikum Wien* mit den *Hertha Firnberg Schulen* oder neu entwickelte partizipative hands-on Formate der *FH Technikum Wien*³ im Rahmen des Wissenstransferzentrums Ost und entsprechende Programme der *FH Vorarlberg*.⁴

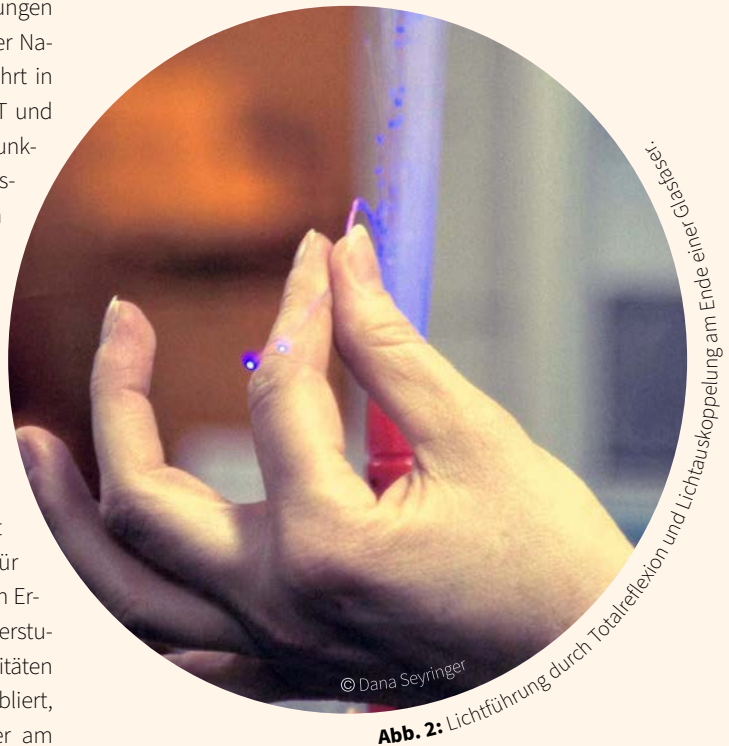


Abb. 2: Lichtführung durch Totalreflexion und Lichtauskoppelung am Ende einer Glasfaser

Auch die Möglichkeiten nach dem Studium, Stichwort Lebenslanges Lernen, können und sollen systematisch weiter ausgebaut werden. Berufsbegleitende **Univer-sitätslehrgänge** mit Photonik-Schwerpunkten wurden punktuell bereits eingerichtet, naturgemäß richten sich diese nach der Nachfrage aus Wirtschaft und Industrie. Jedenfalls sollte es Informations- und Weiterbildungsangebote zum Übergang in das Berufsleben geben. Auch hier sind neue Konzepte zu erarbeiten und zu evaluieren, wie es sich beispielsweise das derzeit (2020-2022) laufende *EU Projekt CARLA (The European Photonics Career Launch Path*⁵) zum Ziel gesetzt hat.

Initiativen wie diese adressieren den steigenden Bedarf nach neuen Arbeitskräften im Photoniksektor. Als zentraler Aspekt muss dabei die Erhöhung der **Diversitätsaspekte** in der Ausbildung gelten. Photonik-Arbeitskräfte rekrutieren sich traditionell aus technischen Studienrichtungen wie Physik, Mathematik und Ingenieurwissenschaften – vielfach stark männerdominierte Studien. Allerdings werden auch in vielen anderen Studien wie Biologie oder Lebenswissenschaften notwendige Grundlagen für die Photonik gelehrt. Aus diesem Grund werden in Österreich auch Initiativen – unter

anderem von CARLA – durchgeführt, um die Photonik auch in diesen erweiterten Studienrichtungen bekannt zu machen. Durch etablierte Strategien wie weibliche Vorbilder publik zu machen, Social Media Kampagnen zur Diversität und inklusiven Events wie den CARLA Camps, soll die Offenheit des Sektors Photonik kommuniziert werden, sodass sein derzeit noch geringer Frauenanteil signifikant erhöht und generell die Diversität im Sektor gesteigert wird.

Generell sind Initiativen wünschenswert, die regelmäßig (unter anderem anlässlich des Internationalen **Tag des Lichts** am 16. Mai) und nachhaltig die Photonik im öffentlichen Bewusstsein verankern. Dieser Punkt inkludiert natürlich auch Überzeugungsarbeit auf allen politischen Ebenen. Anknüpfungspunkte liegen auf der Hand, ist die Nutzung photonischer Technologien in vielen Fällen – digitale Innovation, automatisierte Fertigung, Medizintechnik et cetera – doch einfach als innovativ, effizient und umweltfreundlich vermittelbar. Keinesfalls sollen solche Initiativen auf technologische und naturwissenschaftliche Kreise beschränkt sein, ist doch das Anwendungspotential in den Sozial- und Kulturwissenschaften und auch der Kunst nicht weniger hoch.

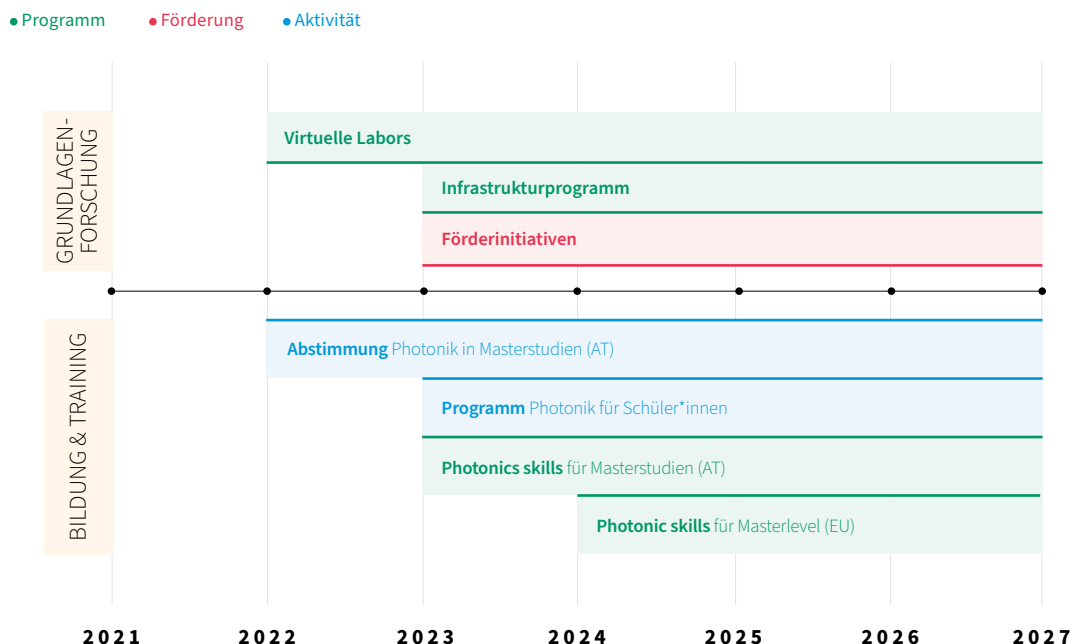
Grundlagenforschung

Die rasche Entwicklung einer Vielzahl von Umsetzungen photonischer Technologien macht die zentrale Rolle von Forschung und Innovation deutlich, wie aus der Diskussion der anwendungsspezifischen Abschnitte in dieser Roadmap ersichtlich. Neben der unmittelbar anwendungsorientierten Forschung ist

die gesellschaftliche Innovationskraft aber nur durch **Grundlagenforschung** ohne unmittelbaren Anwendungszweck zu erhalten, umso mehr, als auch deren nachhaltig positive Auswirkungen auf die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung bekannt und dokumentiert sind.^{6,7} Gerade im Feld der Photonik gibt es auch eine lange Reihe von Beispielen dafür, wie Ergebnisse aus Grundlagenprojekten in kurzer Zeit in die Anwendung übernommen wurden: Hier sei einerseits an Ultrakurzpulslaser erinnert, andererseits illustrieren beispielsweise die Nobelpreise für Physik 2009 (CCD-Chips), 2014 (blaue LED) oder 2018 (Femtosekunden-Technologie, optische Fallen) diesen Sachverhalt.

Die **photonische Grundlagenforschung benötigt kostenintensive Infrastruktur**, wie Equipment zur Mikro- und Nanofabrikation, Mikroskopie- und Spektroskopiesysteme, Lasersysteme mit ultrakurzen Pulsen und hohen Intensitäten, quantenoptische Systeme et cetera. Jedoch ist für die Forschungseinrichtungen die Anschaffung oder Erneuerung dieser Infrastruktur immer wieder mit finanziellen Unabwägbarkeiten verknüpft, was eine langfristige und nachhaltige Planung schwierig macht. Gerade in einem hoch dynamischen und stark wachsenden Bereich wie der Photonik ist es daher notwendig, die internationale Wettbewerbsfähigkeit der nationalen Grundlagenforschung durch entsprechende Infrastrukturmittel sicherzustellen. Dabei kann durch gemeinsame Anschaffungen und Betrieb durch mehrere Forschungseinrichtungen ein großes Synergiepotential genutzt werden, weshalb anzuregen ist, zukünftige Anschaffungen zur koopera-

TIMELINE





tiven Nutzung zu priorisieren. Dazu gehören auch begleitende Maßnahmen zur effizienten Vernetzung, wobei auf entsprechende Ansätze, wie beispielsweise die Forschungsinfrastruktur-Datenbank des *Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF)* zurückgegriffen werden kann. Forschungseinrichtungen mit komplementärer Infrastruktur könnten sich zu **virtuellen Labors** zusammenschließen und in Folge weitere Investitionen abstimmen. Dabei sollten auch andere Forschungsbereiche, die zukünftig eine wichtige Rolle für die photonischen Technologien spielen werden (z.B. Computerwissenschaften/KI), beziehungsweise Forschungsbereiche, die unter interdisziplinären Ge-

sichtspunkten für die thematische Schwerpunkte dieser Roadmap von Relevanz sind in die Planungen mit einbezogen werden, um hier in einer gesamtheitlichen Sicht vernetzte Laborinfrastrukturen aufzubauen und interdisziplinäre Forschungsansätze zu stärken. Natürlich können und sollen auch die gemeinsame Nutzung von Forschungsinfrastruktur und akkordierte Forschungsprogramme unter einem Dach verfolgt werden, mit dem **Graz Center of Physics** (geplanter Bezug 2030) als jüngstes Beispiel.

Die Photonik ist eng mit weiteren Forschungs- und Entwicklungsfeldern (Mikroelektronik, neuartige Materialien, Biowissenschaften, Mikro- und Nanofabrikation, KI, Robotik etc.) verknüpft und schafft durch



Abb. 3: An der Kinderuni der FH Vorarlberg zeigen Kinder reges Interesse am spannend präsentierten Thema Laser und arbeiten motiviert mit.



Abb. 4: Kinder erfahren mittels Taschenlampen wie Kommunikation durch Licht möglich ist.

wechselseitige Synergien völlig neue Möglichkeiten und Perspektiven. Entsprechend breit ist auch das thematische Umfeld im Aufbau der Forschungsinfrastruktur anzulegen.

Der mit den technischen und umweltthematischen Anforderungen an die Photonik wachsende Forschungsbedarf muss sich in einer Schwerpunktsetzung in den nationalen Förderprogrammen niederschlagen. Dazu bedarf es einer entsprechenden Überzeugungsarbeit bei den Entscheidungsträgern.

Im Rahmen internationaler Forschungsförderung liegt die verstärkte Nutzung europäischer Programme nahe. Neben spezifischen thematischen Ausschreibungen gilt es hier die Möglichkeiten des Field Effect Transistor Quantum Flagships zu nutzen, als auch Mittel des ERC Programms einzuwerben, folgend dem *European Research Council (ERC) Starting Grant* an Bernhard Schenk, AIT.

Resümee

Die österreichische Bildungs- und Forschungstätigkeit im Bereich der Photonik steht im internationalen Vergleich auf hohem Niveau. Um dieses weiter zu halten, bedarf es jedoch zusätzlicher Anstrengungen und Maßnahmen. Im schulischen Umfeld muss es gelingen noch mehr Jugendliche für das Thema zu begeistern, indem die Photonik beispielsweise geschlechtsneutral „cool“ präsentiert wird. Die Forschung sieht sich mit steigenden Infrastrukturkosten konfrontiert. Eine gemeinsame Nutzung kostenintensiver Infrastruktur ist eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen. Gemeinsam mit den Herausforderungen der zunehmenden Interdisziplinarität photonischer Forschungsthemen erfordert dieser Aspekt neue Ansätze in der Organisation und Kooperation auf bundesweiter Ebene, wie sie ansatzweise bereits durch die Gründung des **Graz Center of Physics** realisiert werden. ●

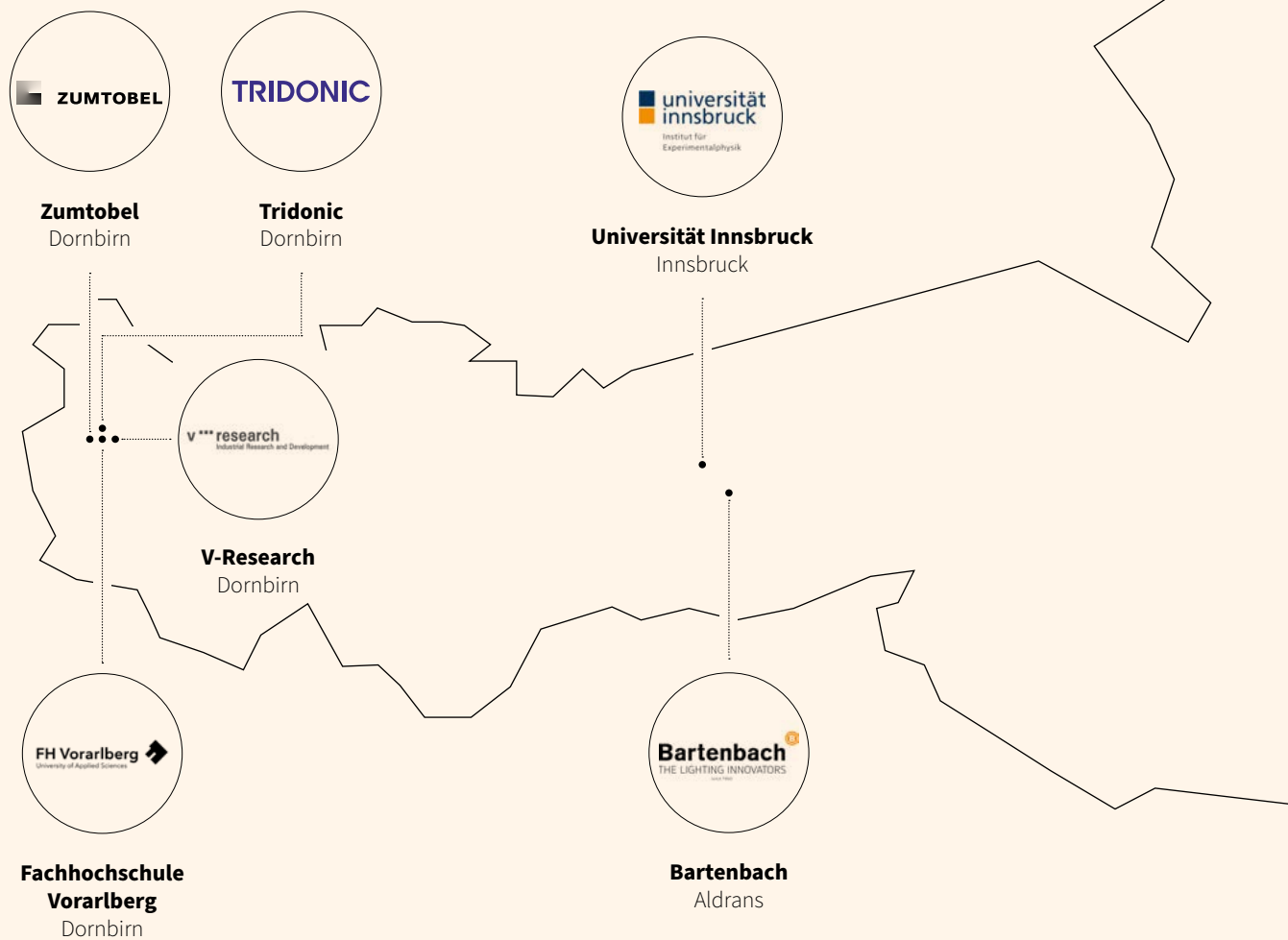
Quellen:

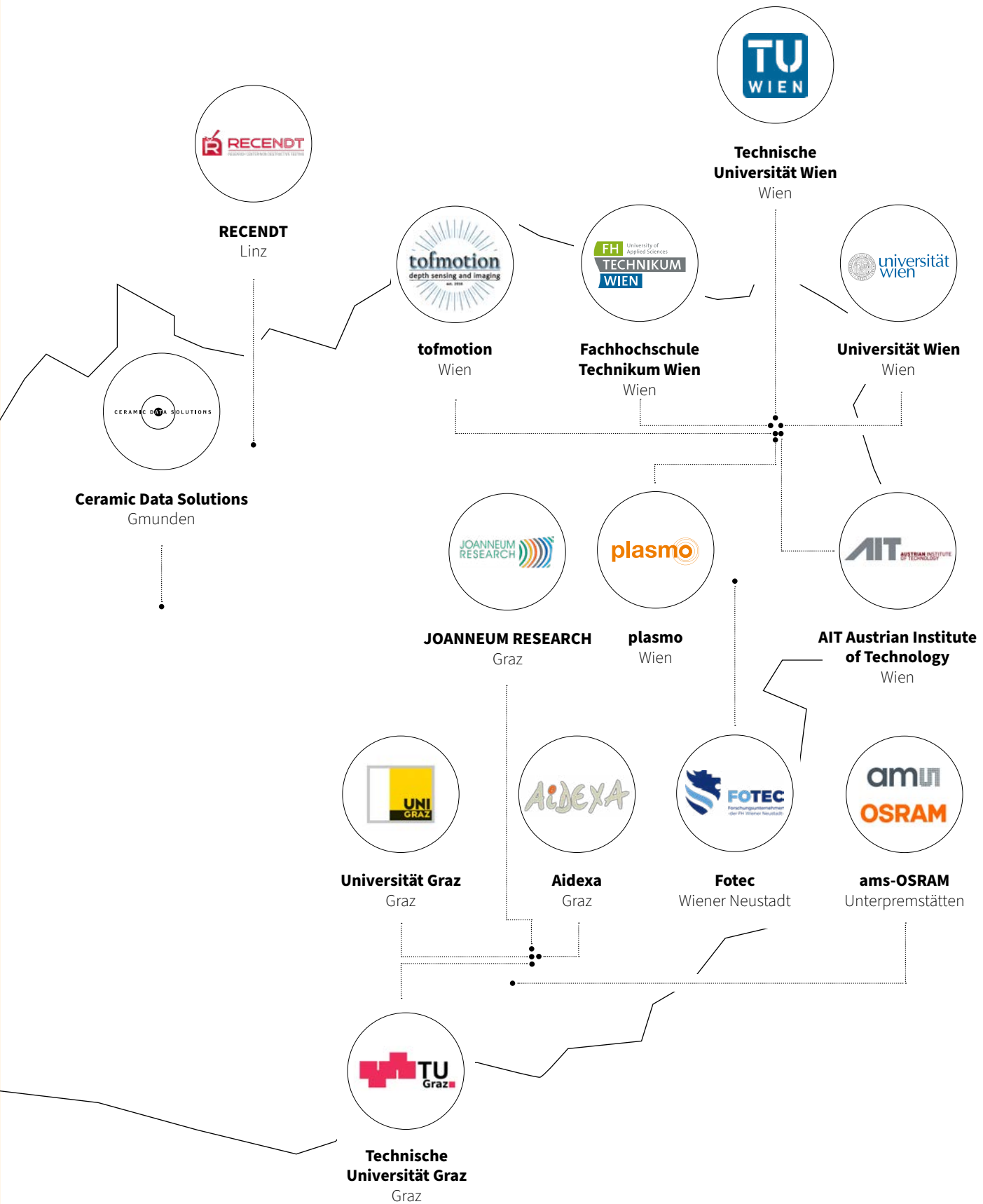
¹ Phorsch! – Photonik für Schulen, <https://projekte.ffg.at/projekt/3761898> (abgerufen 20.5.2021). | ² D. Seyringer, C. Burtcher, G. Piredda, A. Prasad and J. Zehetner, The Night of Science: Optics and Photonics for All, The European Conference on Technology in the Classroom 2016 (ECTC2016). | ³ Wissenstransferzentrum Ost – KV MINT, <https://www.wtz-ost.at/schwerpunkte/mint/> (abgerufen 20.5.2021). | ⁴ D. Seyringer, Children's University: Optics and Photonics for Children, *Journal of International Scientific Publications - Educational Alternatives*, 13, 130 (2015). | ⁵ The European Photonics Career Launch Path, H2020 ICT-05-2019, 2020-2022. | ⁶ A. J. Salter, B. J. Martin, The economic benefits of publicly funded basic research: a critical review, *Research Policy* 30, 509 (2001). | ⁷ M. Dalziel, J. Roswell, T. Tahmina, X. Zhao, Impact of government investments in research and innovation: a review of academic investigations, *Optimum Online: The Journal of Public Sector Management*, 42, 19 (2012).

Partner-Institutionen

Die dargestellten Organisationen trugen mit gewichtigen Beiträgen zur vorliegenden Roadmap bei, stellen allerdings nur einen kleinen Ausschnitt der breit aufgestellten österreichischen Photonik-Community dar. Weitere Inputs kamen von den Mitgliedern von Photonics Austria sowie von zahlreichen weiteren österreichischen Institutionen. ●

57





Autor*innen

Mag.^a (FH) Tia Maria Troch

tofmotion

DI Dr. Rainer Hainberger

AIT Austrian Institute of Technology

Ao. Univ.-Prof. DI

Dr. techn. Leitgeb Erich

Technische Universität Graz

DI Daniel-Eduardt Sandu, MBA

AiDEXA

Dr. Martin Litzenberger

AIT Austrian Institute of Technology

DI Robert Holzer

RECENDT – Research Center for
Non-Destructive Testing

Dr. Hannes Hübner

AIT Austrian Institute of Technology

Ing. Mag. Dr. Paul Müllner

AIT Austrian Institute of Technology

DI Dr. Franz-Peter Wenzl

JOANNEUM RESEARCH

Mag. Wilfried Pohl

Bartenbach

Ing. Arno Grabher-Meyer

V-Research

Dr. Heinz Seyringer

V-Research

Mag. Dr. Bernhard Blaschitz

AIT Austrian Institute of Technology

Dr. Gernot Fasching

ams-OSRAM

DI Dr. Robert Hranitzky

tofmotion

Univ.-Prof. DI Dr. Paul Hartmann

JOANNEUM RESEARCH

Marlene Anzengruber, BSc

JOANNEUM RESEARCH

DI (FH) Helmut Loibl, MSc

FOTEC

Michael Wurzinger, MSc

JOANNEUM RESEARCH

DI Arnold Braunsteiner

plasmo International

**Univ.-Prof. Dipl.-Phys.
Dr.-Ing. Andreas Otto**
Technische Universität Wien

Anja Schinner, BSc
JOANNEUM RESEARCH

Dr. Bernhard Schrenk
AIT Austrian Institute of Technology

Dr.ⁱⁿ Verena Vescoli
ams-OSRAM

DI Mag. Christian Pflaum
Ceramic Data Solutions

Maximilian Hartmann
JOANNEUM RESEARCH

Dr.ⁱⁿ habil. Dana Seyringer, PhD
Fachhochschule Vorarlberg

Katharina Keller
Zumtobel Lighting

**FH-Prof. Ing. Mag. Dr.
Gerd Christian Krizek**
Fachhochschule Technikum Wien

Ing. Dietmar Klien
Tridonic

**Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr.
Joachim Krenn**
Universität Graz

Clemens Kucera
Tridonic

Univ.-Prof. Dr. Gottfried Strasser
Technische Universität Wien

Univ.-Prof. Mag. Dr. Gregor Weihs
Universität Innsbruck

Michael Trupke, PhD
Universität Wien



Long Term Vision

ALFRED FELDER
VORSTANDSVORSITZENDER &
CEO ZUMTOBEL GROUP

Die Photonik wurde von der europäischen Kommission als **eine der wichtigsten Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert** eingestuft. Dank des Glasfasernetzwerkes war es zum Beispiel während der Corona-Krise möglich in großem Stil auf Homeoffice umzusteigen, Meetings, Vorlesungen und Schulunterricht online abzuhalten und selbst viele Maschinen von zuhause aus zu kontrollieren und steuern.

Genauso wie einst im Halbleiterbereich die Miniaturisierung und Integration diskreter Komponenten zu einem Siegeszug der Mikroelektronik geführt hat, die es ermöglichte, dass heute jeder tausend mal mehr Rechenleistung in seinem Smartphone ständig mit sich führt als für die erste Mondlandung zur Verfügung stand, ermöglicht Photonik heute die Integration komplexer Geräte in kleine, mobile Einheiten, welche die Daten mit Lichtgeschwindigkeit verarbeiten. Im Bereich der Augendiagnostik konnten dadurch zum Beispiel teure Geräte von der Größe eines Tisches auf kostengünstigere tragbare Geräte verkleinert werden, die jetzt auch leicht im Feldeinsatz verwendet werden können. Analog ermöglicht Photonik schon heute den präzisen Nachweis verschiedener Krankheiten, was insbesondere im Hinblick auf Pandemien von unschätzbbarer Bedeutung ist.

Auch wenn die Photonik unser tägliches Leben bereits heute stark prägt und **weder Smart Homes noch Streaming Dienste oder soziale Medien ohne Photonik möglich wären**, wird deren Bedeutung in Zukunft noch sehr stark zunehmen. Durch das hohe Bevölkerungswachstum wird es bald nicht mehr genügend Fläche für die Nahrungsproduktion geben, was dazu führen wird, dass man auf Vertical Farming umsteigen muss und die **Nahrungsmittel in Hochhäusern mit Kunstlicht produziert** werden müssen. Dadurch können lange Transportwege bei den Nahrungsmitteln vermieden werden und das Obst und Gemüse im Supermarkt muss im Idealfall nur noch von den oberen Stockwerken, wo es angebaut wird, in den Verkaufsbereich hinunterbefördert werden. Durch die Bereitstellung optimierter Lichtspektren, während dem Wachstum, wird es sogar möglich sein den Vitaminanteil und die Aromastoffe in den Früchten zu erhöhen und auf Kunstdünger und Insektizide zu verzichten, was unserer Umwelt zugutekommt.

Licht wird aber noch viel mehr können. Eine der großen Herausforderungen unserer Zeit ist es, den Klimawandel zu stoppen und die CO₂-Emission zu reduzieren. Wenn man in allen Bereichen die alten Beleuchtungsmittel durch neue LED-Lichtsysteme ersetzt, kann man nicht nur massiv Geld sparen, weil die Betriebskosten wesentlich niedriger sind, sondern spart massiv CO₂ und **leistet damit einen aktiven Beitrag für die Umwelt** (bei einer Stadt wie Wien würde die Reduktion im öffentlichen Bereich bereits über 40.000 Tonnen CO₂ pro Jahr betragen). Zuhause und in der Arbeit werden die neuen Beleuchtungssysteme aber noch deutlich mehr leisten: Sie werden durch aktivierendes Licht beim Aufstehen helfen, sie können unser Immunsystem stärken, die Konzentration fördern, das Risiko für bestimmte Krebsarten und andere Erkrankungen reduzieren, Schlafstörungen reduzieren oder im Alter bei der Synchronisierung des Tag-Nacht-Zyklus helfen.

Licht ist unsere Zukunft – nutzen wir es gemeinsam, um unser Leben zu verbessern und etwas für unsere Umwelt zu tun. ●



Executive Summary

Die Photonics Austria Roadmap gibt einen Überblick über die vielschichtige österreichische Photonik-Landschaft, ihren Status, ihre Ausrichtung und zukünftigen Forschungsbedarf. Österreich verfügt über zahlreiche Firmen internationalen Formats, welche zu den Marktführern und Vorreitern ihrer Branche gehören. Darüber hinaus beschäftigen sich zahlreiche universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sowie KMUs mit der Photonik, und leisten einen unschätzbaren Beitrag zur Innovation in den dargestellten Themenkomplexen. Photonische Technologien bieten Lösungen für die großen Herausforderungen unserer Gesellschaft, allen voran für den European Green Deal, mit einem Potential der Einsparung von 3 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr.¹

In der **Sensorik und Metrologie** spannen sich die Zukunftsthemen von der Entwicklung von Komponenten über Systeme und Anwendungen, die Prozessintegration und Datenauswertung bis zur Zertifizierung. Schlüsseltechnologien wie Time-of-Flight, strukturiertes Licht, aktives Stereosehen und deren Weiterentwicklungen werden zukünftig auch in Augmented Reality Anwendungen wichtig sein, und die Chemische Bildgebung (Hyper-Spectral Imaging) liefert Informationen über die orts aufgelöste chemische Beschaffenheit von Produkten. Obwohl in der industriellen Anwendung oft andere Faktoren wie die Robustheit von großer Bedeutung sind, gibt es zunehmend Überlappungen mit dem Consumer-Sektor, wie beispielsweise der Einsatz multispektraler Sensorik für das Steuern der Displayhelligkeit. Neben der Miniaturisierung bei verbesserten Sensoreigenschaften, sind die Optimierung der Schnelligkeit und des Preises weitere zentrale Entwicklungsthemen der kommenden Jahre.

Die österreichischen Akteure in der **Produktion und Qualitätssicherung** erforschen und bieten herausragende Lösungen in vielen Bereichen. Dazu gehören beispielsweise multiphysikalische numerische Simulationen von Materialbearbeitungsprozessen durch Laser, in-line Monitoring von laserbasierten Herstellungsprozessen oder die Laserbearbeitung und Ultraviolett-Mikrostrukturierung zur Herstellung funktionalisierter Oberflächen (Riblets) zur Reduktion von Strömungswiderständen. Auch Fotolithografie, neuartige optische Beschichtungsmethoden und photonische Materialien als Schlüsselemente zahlreicher Anwendungen sind im Fokus der Forschung und Entwicklung der kommenden Jahre. Da die erforderlichen Ressourcen für die Erforschung und Entwicklung beträchtlich sind, wird eine bessere Vernetzung, sowohl zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen wie auch zwischen den Forschungseinrichtungen untereinander angestrebt, um einen weiteren Innovationsschub zu bewirken.

Eine außerordentliche Rolle spielen die heimischen Forschungs- und Entwicklungs-Aktivitäten in der Photonik für **Life Science, Gesundheit, Landwirtschaft und Umwelt**. In den kommenden Jahren wird die Photonik durch den Einsatz in der medizinischen Forschung, der Prävention, der Diagnose und den Behandlungsmethoden einen signifikanten Beitrag zur Weiterentwicklung des Gesundheitssystems leisten. Im Umweltschutz werden mit photonischen Methoden aus der Luft kontinuierlich Feinstaubpartikel und Schadstoffe gemessen und die Informationen in Echtzeit bereitgestellt. Ähnliches gilt für die Überwachung der Wasserqualität, den Gewässerschutz und die Abwasserentsorgung. In der Land- und Forstwirtschaft erfasst die hyperspektrale bildgebende Technologie Flächen mit hoher räumlicher Auflösung, um Waldbrände zu registrieren und Schäden zu bewerten. Sie hilft Erträge zu erhöhen und zugleich den Einsatz von Düngemitteln, Pestiziden und Herbiziden zu reduzieren oder Daten für Vorhersagemodelle zu liefern. Die Weiterentwicklung dieser Technologien und Anwendungen sowie die Datenaufbereitung sind vordringliche Ziele.

Informationssysteme und Kommunikationstechnologie werden bereits lange von der Photonik bestimmt. Österreichische Unternehmen und Forschungseinrichtungen tragen maßgeblich dazu bei, beispielsweise durch die Erforschung und Entwicklung von Photonischen Integrierten Schaltungen wie monolithisch integrierter Silizium-Optoelektronik oder dauerhafter Datenspeicher basierend auf keramischen Beschichtungen auf Saphirglas-Wafern. In der optischen Datenkommunikation liegt die große Herausforderung in der weiteren simultanen Steigerung der Performance und Energieeffizienz. Durch ihre Vorteile gegenüber Mikroelektromechanischen Systemen sind Photonische Integrierte Schaltungen nicht nur für 6G Anwendungen interessant. Das große Ziel ist es,

frei programmierbare photonisch integrierte Schaltkreise zu realisieren. Für deren derzeit noch geringe Integrationsdichte zeichnet sich eine stetige Performancesteigerung ähnlich dem Moore'schen Gesetz ab.

Licht ist nicht nur zum Sehen (visuell), sondern hat auch einen großen Einfluss auf unsere Stimmung, unser Wohlbefinden und unsere Gesundheit (nicht-visuell). Adäquate **Beleuchtung für Intelligente urbane und rurale Lösungen** wird in Zukunft deshalb an Bedeutung zunehmen. Eckpfeiler des Human Centric Lighting sind Sensoren und intelligente, Internet-of-Things-fähige LED-Treiber. Es bedarf der Entwicklung optimierter, nachhaltiger, effizienter und kostengünstiger Treiber, aber auch neuer Optiken. Freiformflächen-Optiken, Nanostrukturen auf optischen Flächen, neue Materialien und zahlreiche andere Technologien sind zu erforschen, um neue Anwendungen im Smart Lighting zu erschließen und gleichzeitig die Ökologisierung der Technologie weiterzutreiben. Dabei sind Digital Engineering Methoden wie der „Digitalen Zwilling“ sowie neue, verbesserter Simulationsmethoden- und Systeme von höchstem Interesse. Um mit Human Centric Light, Smart Lighting und Horticultural Lighting den Stellenwert des Lichtes in der Gesellschaft zu stärken bedarf es also weiterer intensiver Forschung.

Vernetzte Mobilität, Transport und Sicherheit sind spannende Zukunftsthemen mit sehr unterschiedlichen Aspekten - auch für die Photonik. Bekannte, realisierte Beispiele sind Matrix-LED-Scheinwerfer und die auf Laserdioden gestützte Fernlichttechnologie. Die Ausstattung von Unmanned Aerial Vehicles, Drohnen mit LiDAR, optischem Richtfunk durch Free Space Optics oder chemische, biologische, radioaktive, nukleare oder explosive Sensoren erlaubt Einsatzkräften die gefahrlose Analyse unbekannten Terrains - dank österreichischer Forschung zukünftig auch in Echtzeit. Autonome Driver Assistance Systeme legen den Grundstein für zukünftiges vollautomatisiertes Fahren. Frequency Modulated Continuous Wave Light Detection and Ranging, flash-/LiDAR, Time-of-Flight und deren Evolution spielen dabei eine tragende Rolle. Faseroptische Distributed Acoustic Sensing ermöglicht erstmals eine lückenlose Zustands-, Verkehrs- und Sicherheitsüberwachung mit einem einzigen, schon verlegten Lichtwellenleiter-Kabel. Um dies alles zu entwickeln und Realität werden zu lassen erfordert es weiterer Anstrengungen, aber auch einer frühen Zusammenarbeit von Innovationstreibern und Normierungsinstituten.

Österreich ist seit den frühen 1990er Jahren führend in der Quanten-Grundlagenforschung, der Basis moderner Informationstechnologien. Heute gibt es erste serienreife Quantencomputer „Made in Austria“. Im Fokus der zukünftige Forschung und Entwicklung der **photonischen Quantentechnologie** stehen Quantenkommunikation, Quantencomputer und Quantensensorik. Um beispielsweise die sicherheitsrelevante Quantenschlüsselübertragung breitflächig zu etablieren, wird eine Miniaturisierung der elektro-optischen Elemente angestrebt. Für photonische Quantencomputer ist, um mit der internationalen Konkurrenz mithalten zu können, Forschung in zahlreichen Schlüsseltechnologien erforderlich, wie beispielsweise zu präzisen Lasern oder verlustarmen Wellenleitertechnologien in integrierten Schaltkreisen. Ein großer Nutzen der Quantensensorik ist unter anderem die Erhöhung der Messgenauigkeit und Empfindlichkeit der Messgeräte. Aber auch hier ist noch viel theoretische und praktische Forschungsarbeit erforderlich.

Die österreichische **Bildung, Training und Grundlagenforschung** in der Photonik steht im internationalen Vergleich auf hohem Niveau. Schlüsselemente in der Jugendarbeit bilden der Photonics Explorer und Projekte wie „Phorsch! – Photonik für Schulen“. Darauf aufbauend gilt es die Photonik auf inklusive Weise zu vermitteln, um die Anzahl der Studierenden zu erhöhen. In Folge müssen die Lehrpläne der Masterstudien entsprechend dem raschen technologischen Fortschritt der Photonik kontinuierlich überprüft und angepasst werden und durch berufsbegleitende Universitätslehrgänge mit Photonik-Schwerpunkten ergänzt werden. Die gesellschaftliche Innovationskraft bedarf aber auch einer Grundlagenforschung ohne unmittelbaren Anwendungszweck, umso mehr, als auch deren nachhaltig positive Auswirkungen auf die allgemeine wirtschaftliche Entwicklung bekannt und dokumentiert sind. Die Forschung sieht sich jedoch mit steigenden Infrastrukturkosten konfrontiert. Nur eine gemeinsame Nutzung kostenintensiver Infrastruktur und neue Ansätze in der Organisation und Kooperation auf bundesweiter Ebene könnten dieses Problem lindern.

Die innovative, international anerkannte österreichische Photonics Community ist in vielen Bereichen führend. Um diese Position zu halten, besser noch, auszubauen, bedarf es aber großer gemeinsamer Anstrengungen. Kooperation, abgestimmte Forschungspläne und organisatorische und finanzielle Unterstützung sind erforderlich. Dies betrifft nicht ein einzelnes, sondern alle Themengebiete gleichermaßen. ●

Abkürzungsverzeichnis

ADAS	Autonome Driver Assistance System	FSO	Free Space Optics
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit	FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie
BD	Big Data	FWF	Österreichischer Fond zur Förderung wissenschaftlicher Forschung
BMBWF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung	GaN HEMT	Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor
CARLA	The European Photonics Career Launch Path	HCL	Human Centric Lighting
CBRNE	chemisch, biologisch, radioaktiv, nuklear oder explosiv	HDD	Hard Disk Drive
CCD	Charged-Coupled Device	HPC	High Performance Computing
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
CT	Computertomographie	IoT	Internet of Things
CV-QKD	Continuous-Variable QKD	IR-ON	InfraRed Optical Nanostructures
cw	continuous wave	KET	Key-Enabling Technology
DALI	Digital Addressable Lighting Interface / digitale, programmierbare Beleuchtungsschnittstelle	KI	Künstliche Intelligenz
DVD	Digital Versatile Disc	KMU	kleine und mittlere Unternehmen
EEA	European Environment Agency / Europäische Umweltagentur	KW	Kurzwellen
EEL	Edge-Emitting Laser	LED	Light-Emitting Diode / Licht emittierende Diode
ERC	European Research Council	LIBS	Laser-Induced Breakdown-Spectroscopy
F&E	Forschung und Entwicklung	LiDAR	Light Detection and Ranging / Light Imaging, Detection and Ranging
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft	LiFi	Light Fidelity / breitbandiger optischer Funk
FMCW LiDAR	Frequency Modulated Continuous Wave LiDAR	M2M	Machine-to-Machine
FMLA	Freeform Micro-Lens Array / Freiform-Mikrolinsen-Array	MEMS	Mikroelektromechanische Systeme
FPGA	Field Programmable Gate Array	MIR	Mittleres Infrarot
fs	Femtosekunden	ML	Machine Learning
		MMI	Multimodeinterferenz-Koppler

NDT	Non-Destructive Testing / zerstörungsfreie Testmethoden
NGOA	Nächste Generation von Access
NIR	Nahinfrarot
NRATF	Network Resilience Aware Topology Formation
OCT	Optical Coherence Tomography / optische Kohärenztomographie
OLED	Organic Light Emitting Diode / organische Leuchtdiode
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PAT	Process Analytical Technologies / prozessintegrierte Analytik
PC	Photonic Crystal
PCB	Printed Circuit Board / Leiterplatte
PDK	Photonic Design Kit
PIC	Photonic Integrated Circuits (photonisch integrierter Schaltkreis)
PMMA	Polymethylmethacrylat
PSSP	Photonic Sensing for Smarter Processes
QKD	Quantum Key Distribution / Quantenschlüsselübertragung
QRNG	Quantum Random Number Generator / Quantenzufallszahlengenerator
R2P	Role2Plate
R2R	Role2Role
SSD	Solid State Drive
THz	Terahertz
ToF	Time-of-Flight
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Drohne)
UV-C	Ultraviolettstrahlung-C im Bereich zwischen 100 und 280 nm

VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (Oberflächenemitter)
VOC	Volatile Optical Compound
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XCT	X-ray Computed Tomography
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

